

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DESARROLLO DE UN APLICATIVO PARA DETERMINAR LOS
PARÁMETROS DE EXPOSICIÓN RADIOGRÁFICA DE UN
GENERADOR DE RAYOS X CON CAPACIDAD DE HASTA 300 KV**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

Bach. César Eduardo Torres Peralta

ASESOR:

Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

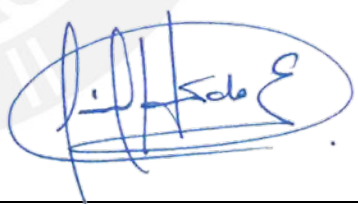
Lima, Diciembre, 2024

Informe de Similitud

Yo, **RAÚL CARLOS HURTADO ESPEJO**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: **DESARROLLO DE UN APLICATIVO PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE EXPOSICIÓN RADIOGRÁFICA DE UN GENERADOR DE RAYOS X CON CAPACIDAD DE HASTA 300 KV**, del autor **CÉSAR EDUARDO TORRES PERALTA**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **9%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **06/12/2024**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 06 de diciembre de 2024.

Apellidos y nombres del asesor: HURTADO ESPEJO, RAÚL CARLOS	
DNI: 10610827	Firma 
ORCID: 0000-0002-8511-1767	

RESUMEN

El deterioro por tiempo de uso de un equipo generador de rayos X requiere de la actualización de sus diagramas de exposición para mantener la eficiencia en los tiempos de ensayo. Este estudio tuvo como finalidad el desarrollo de un aplicativo para determinar el tiempo de exposición radiográfica a través de la obtención de un diagrama de exposición actualizado para acero ASTM-36 empleando un equipo generador de rayos X de hasta 300kV con un desgaste considerable debido a su uso prolongado, así como un diagrama de exposición de aluminio derivado del diagrama de acero. El desarrollo de las curvas de exposición para acero se realizó mediante una metodología experimental y para ello se contó con tres patrones tipo cuña escalonada con espesores entre 1 a 80 mm en total, así como películas AGFA STRUCTURIX D7 para el revelado. Las curvas preliminares de densidad-espesor y densidad-tensión se obtuvieron mediante la proyección de rayos X a exposiciones de 5, 10, 15, 20, 30 y 50 mA.min a diferentes espesores de las cuñas patrón, con una variación de voltaje entre 100 a 300kV con aumentos de 20 kV. El diagrama de exposición fue obtenido seleccionando los valores útiles de las curvas preliminares para obtener curvas a una densidad de 2.5. Tras esto, se procedió con la aplicación de factores de corrección para obtener el diagrama de exposición del aluminio a 100, 150 y 220 kV. En adición, se detallan los factores de corrección para la variación de FFD y tipo de película. Con el diagrama de exposición de acero y aluminio se desarrolló un aplicativo para el cálculo del tiempo de exposición. y se realizó la validación de mediante ensayos experimentales. El aplicativo permite el ingreso de material, voltaje, espesor de material, FFD y tipo de película para obtener el tiempo de exposición, lo que otorga al usuario mayor versatilidad y precisión en sus ensayos.

Palabras clave: Radiografía Industrial, Curvas de exposición, Rayos X, FFD, Diagrama de exposición, Generador de rayos X.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : **Desarrollo de un aplicativo para determinar los parámetros de exposición radiográfica de un generador de rayos X con capacidad de hasta 300 kV**

ÁREA : Materiales

PROPUESTO POR : Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

ASESOR : Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

TESISTA : Bach. César Eduardo Torres Peralta

CÓDIGO : 20170740

FECHA : 2024

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Debido al desgaste del equipo generador de rayos X con rango de trabajo de 100 a 300kV del Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú por su uso prolongado a través de los años, este estudio busca el desarrollo de un aplicativo para determinar las variables de exposición radiográfica a través de la obtención de un diagrama de exposición actualizado para acero. Una inmersión a la radiografía industrial y los parámetros que afectan a la exposición son presentados al inicio para abordar los factores involucrados en las curvas de exposición y el cálculo del tiempo de exposición. El desarrollo de las curvas de exposición para acero ASTM-36 se realizará mediante un método experimental y para ello se contará con tres patrones tipo cuña escalonada con espesores

que varían entre 1 a 80 mm en total, así como películas AGFA STRUCTURIX D7 para el revelado tras la exposición a rayos X.

Se realizará el desarrollo de las curvas preliminares para obtener las curvas de exposición: densidad-espesor y densidad-tensión. Será necesario proyectar los rayos X a los diferentes espesores de las cuñas, con variación de los parámetros que afectan a la exposición. Con esto, se corregirá el diagrama de exposición para una densidad de 2.5.

Tras esto, se procederá a aplicar los factores de corrección para obtener el diagrama de exposición de otros metales como aluminio o cobre. En paralelo, se contemplará el desarrollo de un aplicativo para el cálculo del tiempo de exposición. y se realizará la validación de este con la data obtenida de las curvas de exposición del acero corregida para otros metales mediante los factores de corrección

Objetivo general:

Desarrollo de un aplicativo para determinar los parámetros de exposición radiográfica del generador de rayos X con capacidad de hasta 300 kV

Objetivo específico 1:

Corrección de los diagramas de exposición para el equipo mediante el desarrollo de las curvas preliminares de densidad vs espesor y densidad vs tensión.

Objetivo específico 2:

Determinar los parámetros geométricos que afectan a los diagramas de exposición

Objetivo específico 3:

Desarrollo de los diagramas de exposición para diferentes metales mediante la variación de los parámetros que afectan la exposición y los factores de corrección.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Desarrollo de un aplicativo para determinar los parámetros de exposición radiográfica de un generador de rayos X con capacidad de hasta 300 kV

Introducción

1. Marco Teórico
2. Métodos experimentales
3. Análisis de resultados
4. Desarrollo de aplicativo

Conclusiones

Recomendaciones y Observaciones

Bibliografía

Anexos



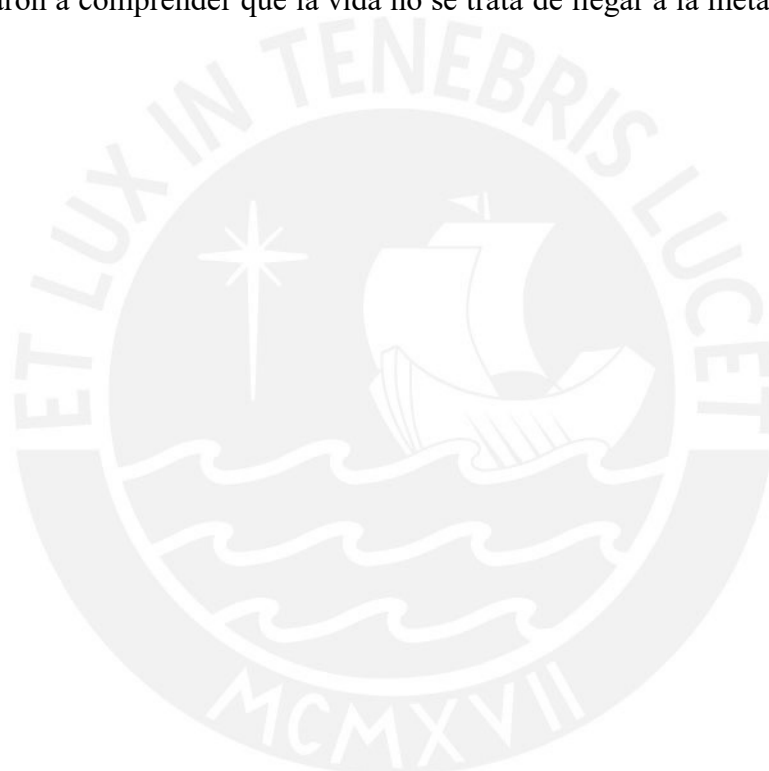
Mag. Ing. Raúl Carlos

Hurtado Espejo

Asesor

DEDICATORIA

A mi padres, Víctor y Saida, por siempre brindarme su confianza y cariño incondicional, todo lo que he conseguido se los debo a ellos. A mi hermana Valery por acompañarme a lo largo de todo mi crecimiento y brindarme su soporte. Finalmente, a todas las personas que estimo, las cuales me ayudaron a comprender que la vida no se trata de llegar a la meta, sino de disfrutar el camino.



AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento a mis padres y a mi hermana por todo su apoyo emocional a lo largo de este proceso. Su constancia, ánimo incondicional y la fortaleza que siempre me brindaron hicieron posible que pudiera culminar este trabajo. Gracias por estar siempre a mi lado, por confiar en mí, y por ser mi principal fuente de motivación.

Le expreso mi más sincero agradecimiento al Mag. Ing. Raúl Hurtado por su mentoría y paciencia. El tiempo invertido en las asesorías, ensayos y sugerencias han sido fundamentales para la culminación de este trabajo de investigación. En este sentido, le doy también las gracias al personal del CITE materiales por su colaboración al brindarme el acceso y recursos de las instalaciones.

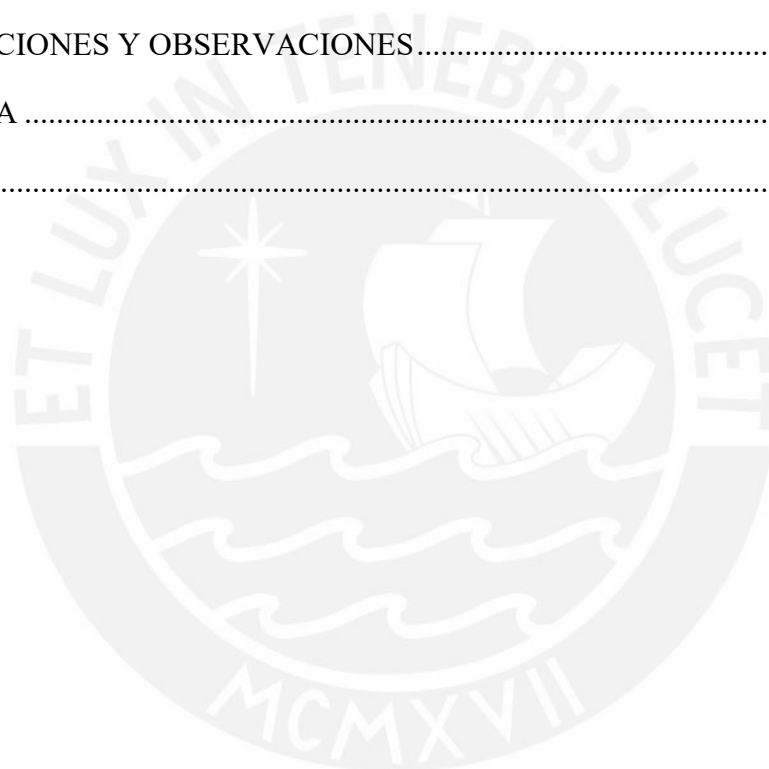
A las personas que estuvieron a lo largo de mi camino profesional, las cuales me brindaron invaluable enseñanzas, sin las que no habría sido posible la publicación de este estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. Introducción a la Radiografía Industrial.....	2
1.2. Rayos X	3
1.3. Factores de influencia en imagen radiográfica	6
1.3.1. Sensibilidad Radiográfica	7
1.3.2. Radiación dispersa	8
1.3.3. Penumbra geométrica.....	9
1.3.4. Ley inversa del cuadrado	10
1.3.5. Exposición.....	11
1.4. Películas radiográficas	12
1.4.1. Densidad radiográfica	13
1.4.2. Velocidad de película.....	14
1.4.3. Curvas Sensitométricas.....	14
1.4.4. Clasificación	16
1.4.5. Clasificación según AGFA	17

1.5. Indicadores de Calidad de Imagen o Penetrómetro	20
1.6. Diagramas de exposición.....	23
1.7. Elaboración de un diagrama de exposición	24
1.8. ASME V: Examinación no destructiva – Art. 2	26
CAPÍTULO II.....	28
2. MÉTODOS EXPERIMENTALES	28
2.1. Materiales	28
2.1.1. Cuñas Escalonadas.....	28
2.1.2. Películas	30
2.2. Equipos	30
2.2.1. Generador de Rayos X.....	30
2.2.2. Densitómetro.....	33
2.3. Variables y parámetros de exposición.....	34
2.4. Procedimiento experimental.....	34
2.5. Proceso de revelado	38
2.6. Medición de densidad.....	41
CAPÍTULO III.....	44
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
3.1. Visualización de películas reveladas	44
3.2. Diagramas preliminares	48
3.2.1. Densidad vs Espesor	48
3.2.2. Tensión vs Espesor	52
3.3. Diagrama de exposición	53
CAPÍTULO IV.....	56
4. Desarrollo de aplicativo	56
4.1. Corrección de diagramas para otros metales	56

4.2. Factor de corrección película.....	58
4.3. Factor de corrección por distancia.....	59
4.4. Interfaz de usuario de aplicativo.....	59
4.5. Datos de entrada	60
4.6. Datos de Salida.....	64
4.7. Validación de uso	65
4.8. Corrección de voltaje interpolado.....	71
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	81



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación de Rayos X en tubo metálico-cerámico	3
Figura 2. Punto focal efectivo	5
Figura 3. Distribución de rayos X.....	6
Figura 4. Variables de la calidad radiográfica	8
Figura 5. Penumbra geométrica	10
Figura 6. Esquema de la ley de inversa del cuadrado	11
Figura 7. Capas de una película radiográfica.....	12
Figura 8. Curvas Sensitométricas para películas X, Y, Z	15
Figura 9. Uso de curva sensitométrica.....	16
Figura 10. Curvas características para STRUCTURIX	20
Figura 11. Tipos de penetrómetros	23
Figura 12. Diagrama de exposición para acero desde 100kV hasta 220kV.....	24
Figura 13. Diagramas preliminares de densidad vs espesor	25
Figura 14. Diagrama intermedio de voltaje vs espesor a densidad 2.....	25
Figura 15. Rango total de espesores de 1 a 80 mm para patrones escalonados.....	29
Figura 16. Progresión de escalones de cada patrón	29
Figura 17. Película STRUCTURIX D7 PB ROLLPAC 100mmx90m.....	30
Figura 18. Dimensiones de equipo generador de Rayos X.....	31
Figura 19. Rango de trabajo del equipo generador de Rayos X	32
Figura 20. Diagrama de exposición actual del generador de Rayos X	33
Figura 21. Densitómetro	34
Figura 22. (a) Módulo de revelado (b) Luces de seguridad	39
Figura 23. Porta películas	39
Figura 24. Fases de revelado (a)Revelado (b)Enjuague (c)Fijado.....	40
Figura 25. Secado de películas.....	41
Figura 26. (a) Densitómetro no cerado (b) Densitómetro cerado	42

Figura 27. Escalón de calibración.....	43
Figura 28. Películas reveladas con exposición 5mA.min	44
Figura 29. Películas reveladas con exposición 10mA.min	45
Figura 30. Películas reveladas con exposición 15mA.min	45
Figura 31. Películas reveladas con exposición 20mA.min	46
Figura 32. Películas reveladas con exposición 30mA.min	46
Figura 33. Película revelada con exposición 50mA.min	47
Figura 34. Medición de densidad de películas reveladas.....	48
Figura 35. Densidad vs Espesor a 5mA.min.....	49
Figura 36. Densidad vs Espesor a 10mA.min.....	49
Figura 37. Densidad vs Espesor a 15mA.min.....	50
Figura 38. Densidad vs Espesor a 20mA.min.....	50
Figura 39. Densidad vs Espesor a 30mA.min.....	51
Figura 40. Densidad vs Espesor a 50mA.min.....	51
Figura 41. Tensión vs Espesor a densidad 2.5	53
Figura 42. Diagrama de exposición base	54
Figura 43. Diagrama de exposición base a escala logarítmica	54
Figura 44. Diagrama de exposición para el acero a densidad 2.5.....	55
Figura 45. Diagrama de exposición preliminar para el aluminio a densidad 2.5.....	58
Figura 46. Entorno del aplicativo.....	60
Figura 47. Datos de entrada	63
Figura 48. Error de entrada en valores permitidos de espesor	63
Figura 49. Error de valor de entrada no numérico en espesor	64
Figura 50. Tiempo de exposición fuera de rango operacional.....	64
Figura 51. Datos de salida.....	65
Figura 52. Tiempos de exposición para voltajes ensayados en acero	66
Figura 53. Tiempos de exposición para voltajes no ensayados en acero	67

Figura 54. Muestra de aluminio de (a) 11.6 mm (b) 44.6 mm.....	68
Figura 55. Tiempos para ensayos de comprobación del aluminio a 100 y 150 Kv	68
Figura 56. Películas de comprobación reveladas	69
Figura 57. Densidad vs Espesor para voltajes ensayados en acero.....	69
Figura 58. Densidad vs Espesor para voltajes no ensayados en acero.....	70
Figura 59. Tiempos de exposición corregidos para 150kV en acero y aluminio.....	73
Figura 60. Diagrama de exposición del aluminio a densidad 2.5	74
Figura 61. Variación de voltaje a 100 kV	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre transmitancia y densidad de película	13
Tabla 2. Especificaciones técnicas del generador de Rayos X	31
Tabla 3. Amperaje máximo de trabajo por voltaje	32
Tabla 4. Especificaciones técnicas de densitómetro	33
Tabla 5. Variables y parámetros de exposición	34
Tabla 6. Configuración de ensayos a 5mA.min	35
Tabla 7. Configuración de ensayos a 10mA.min	36
Tabla 8. Configuración de ensayos a 15mA.min	36
Tabla 9. Configuración de ensayos a 20mA.min	37
Tabla 10. Configuración de ensayos a 30mA.min	37
Tabla 11. Configuración de ensayos a 50mA.min	38
Tabla 12. Valores de espesor a densidad 2.5	52
Tabla 13. Valores de espesor proyectados a densidad 2.5	52
Tabla 14. Factores radiográficos equivalentes	57
Tabla 15. Factor de corrección por película STRUCTURIX	59
Tabla 16. Factor de corrección por distancia	59
Tabla 17. Lista de voltajes seleccionables para el acero en aplicación	61
Tabla 18. Lista de voltajes seleccionables para el aluminio en la aplicación	61
Tabla 19. Ensayos de comprobación para acero con voltajes ensayados	66
Tabla 20. Ensayos de comprobación para acero con voltajes no ensayados	66
Tabla 21. Ensayos de comprobación para aluminio	67
Tabla 22. Densidades para películas de comprobación	70
Tabla 23. Error absoluto en densidades	71
Tabla 24. Valores MAPE e interpretación	71

INTRODUCCIÓN

La precisión y eficiencia en la inspección radiográfica es de alta relevancia para los servicios de ensayos no destructivos en los cuales se busca constantemente la optimización de tiempos y mejora de resultados por parte del operador (Cely , Jami, & Sotomayor, 2018). Sin embargo, debido al desgaste de los equipos a través de los años, es posible que estos brinden resultados que requieran de correcciones, es por ello que este estudio se busca la obtención de un aplicativo para la determinación de la exposición radiográfica mediante un diagrama de exposición actualizado para metales con el equipo de Rayos X del laboratorio de materiales con un voltaje máximo de trabajo de 300kV, el cual es empleado en servicios de radiografía industrial. Una inmersión a la radiografía industrial y los parámetros que afectan a la exposición son presentados al inicio para abordar los factores involucrados en las curvas de exposición y el cálculo del tiempo de exposición.

Con las bases para el entendimiento de los parámetros, se realizan ensayos a cuñas escalonadas para acero ASTM-36 con espesores variables entre 1 a 80 mm para un rango de tensión entre 100 a 300 kV, de acuerdo con la especificación técnica del equipo. Previamente se construyen diagramas de Densidad vs Espesor y Tensión vs Espesor y a través de los puntos obtenidos se construyen las curvas de exposición para una densidad de 2.5 y se analizan los resultados.

En la última sección, se desarrolla un aplicativo con la finalidad de determinar la exposición radiográfica para diferentes metales, basado en el diagrama de exposición hallado experimentalmente para acero estructural. Para conseguirlo, se realizará un método de corrección con factores para obtener los diagramas de los metales adicionales.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

A rasgos generales, los Ensayos No Destructivos (END) son pruebas de inspección que aseguran calidad y confiabilidad de diversos productos y operaciones en la industria, lo que se traduce en el ahorro de costos y tiempos. Los END no alteran los objetos de inspección de manera permanente y conservan las propiedades físicas y químicas de estos. De acuerdo a la ubicación de las discontinuidades detectadas, los END pueden clasificarse como superficiales o volumétricos:

- **Superficiales:** Proporcionan información sobre el estado superficial de los objetos que se inspeccionan. Dentro de los más representativos se tienen a los ensayos de líquidos no penetrantes, inspección visual, electromagnetismo y partículas magnéticas.
- **Volumétricos:** Informan sobre el estado interno de los objetos analizados, con lo que se pueden detectar discontinuidades internas o subsuperficiales. Se pueden mencionar a los ensayos de ultrasonido, emisión acústica y radiografía industrial (Palencia).

1.1. Introducción a la Radiografía Industrial

De todos los END empleados en la industria moderna, la radiografía industrial es el método más empleado debido a ventajas como alta confiabilidad, versatilidad y la emisión de pruebas permanentes (FUJIFILM, 2009). Con este ensayo volumétrico, es posible detectar discontinuidades en soldaduras, fundiciones y productos forjados.

El principio que rige la radiografía industrial es la absorción diferencial de radiación penetrante de un objeto (Staton, 2005), ya sea radiación electromagnética o de partículas como Rayos Gamma o Rayos X. Con este método se obtienen imágenes que permiten observar discontinuidades internas de los objetos al disparar con radiación elevada a estos.

1.2. Rayos X

Cuando electrones a alta velocidad colisionan con materiales específicos, su elevada velocidad es frenada y una pequeña porción de su energía es transformada en Rayos X, los cuales son formas de radiación electromagnética con longitudes de onda entre 10^{-9} a 10^{-13} m (Halmshaw, 1995). El tubo de vacío que utiliza este principio para la generación de Rayos X es llamado Tubo de Rayos X y se compone de las siguientes partes:

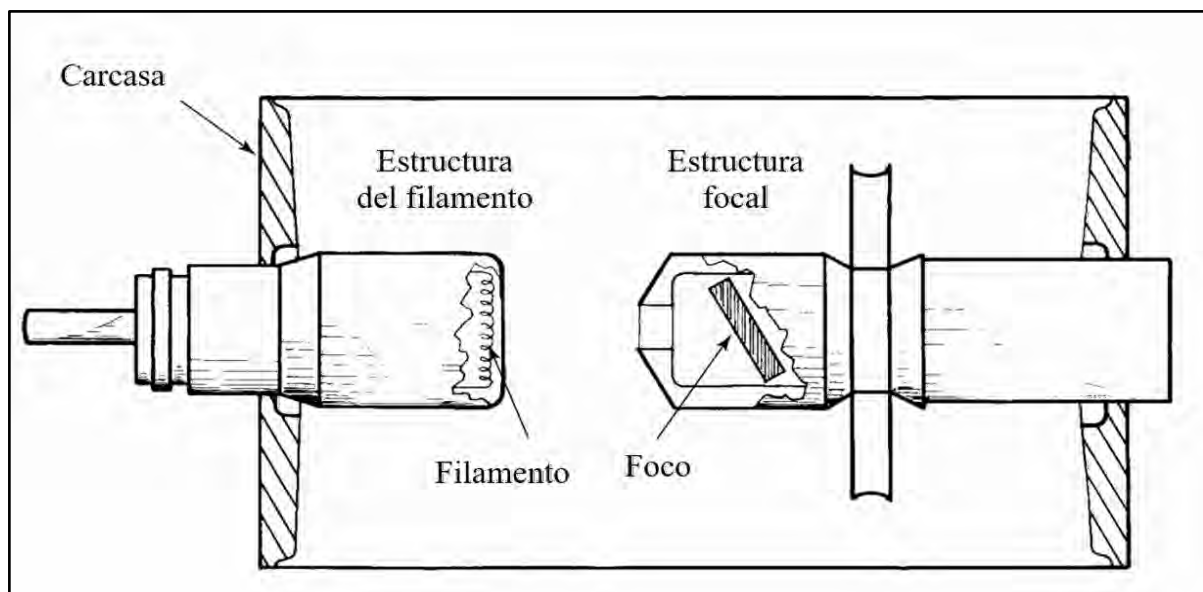


Figura 1. Generación de Rayos X en tubo metálico-cerámico

Tomado de “*Radiographic Testing*”, American Society of Non-Destructive Testing, 2002

- **Carcasa o coraza protectora:** En la Figura 1, se observa el cuerpo del tubo, hecho de una combinación de metal y cerámico. Como material opcional, también se cuentan con carcasas hechas de vidrio, las cuales son ampliamente usadas, con la desventaja de contar con sobrecalentamientos. Todos los tubos modernos están contenidos en una carcasa protectora para evitar la exposición nociva de rayos X.
- **Cátodo:** El polo negativo del tubo de rayos X. Contiene un filamento de tungsteno que emite los electrones mediante el efecto termoiónico. Con un transformador controlado de manera separada, el filamento es energizado con corriente alterna desde 50 a 60 Hz. El rango usual de corriente varía entre 1 a 10 A para el filamento, mientras

que la corriente entre el ánodo y cátodo a través de los electrones es mayor a 20 mA para unidades convencionales de radiografía industrial (American Society of Non Destructive Testing, 2002).

- **Filamento:** Una corriente de bajo valor es capaz de calentarlo hasta causar el desprendimiento de electrones suficientes para causar el transporte de estos hacia el ánodo debido a las propiedades del material del que está compuesto: el tungsteno.
- **Ánodo:** Electrodo comúnmente hecho de cobre por sus altas propiedades conductivas y térmicas, Unido a él, se encuentra el foco u objetivo, hecho generalmente de tungsteno, el cual queda frente al cátodo y sirve directamente para la generación de rayos X.

En la Figura 2, se observa un esquema del tamaño de foco. El haz de electrones es producido desde el cátodo y choca en la sección de punto focal, la cual se encuentra unida al ánodo. Esta sección se encuentra a elevadas temperaturas, por lo que su área necesita de un tamaño suficiente para evitar un sobrecalentamiento que pueda dañar el ánodo. Se pueden identificar otros dos conceptos principales en el esquema mostrado:

- **Tamaño de foco real:** proyección perpendicular al punto focal, esta técnica, en la práctica, permite producir tamaños de focos reales entre 1 a 3mm.
- **Tamaño de foco efectivo:** corresponde al tamaño de foco que se obtiene experimentalmente. El área efectiva de foco es una porción del tamaño real, debido a la manipulación de la inclinación del foco.

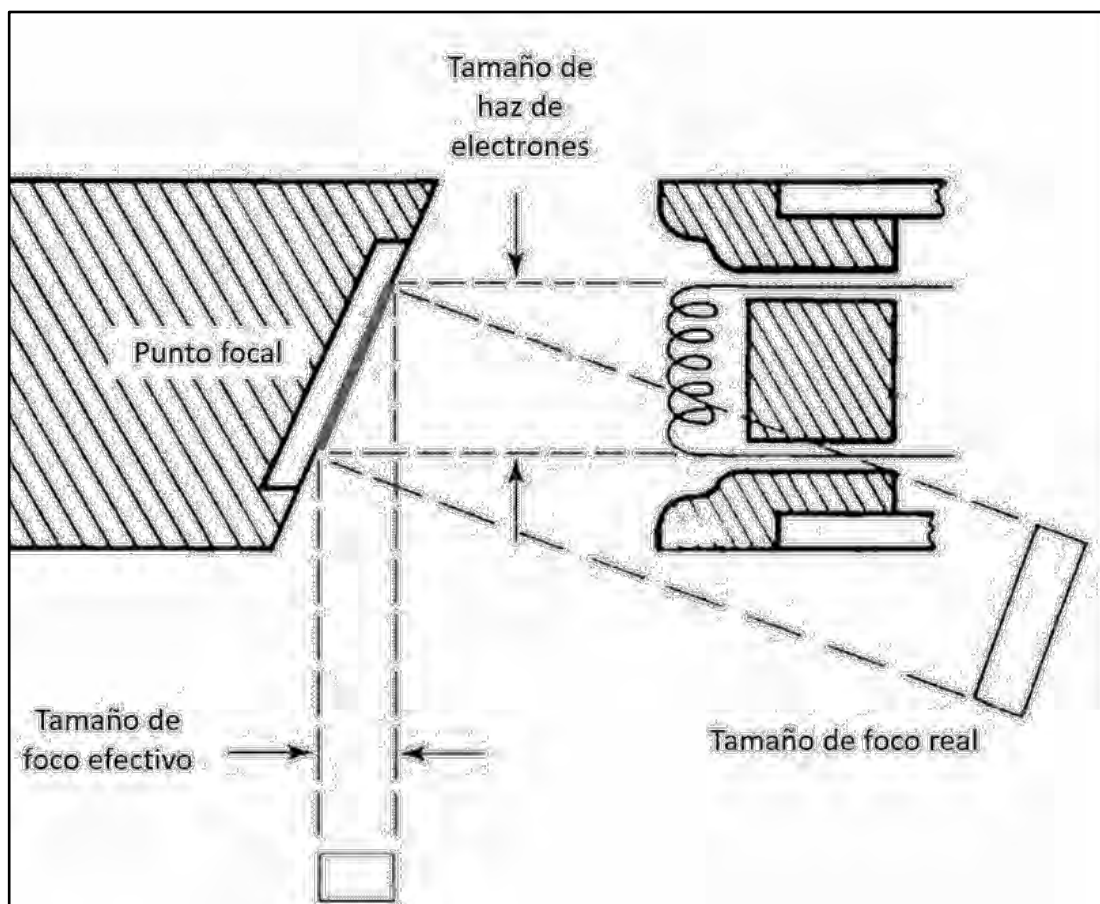


Figura 2. Punto focal efectivo

Tomado de “*Radiographic Testing*”, American Society of Non-Destructive Testing, 2002

La orientación del foco con respecto al haz de electrones influye fuertemente en el tamaño y la forma del punto focal. Las orientaciones de 0 a 30° se utilizan para diversas aplicaciones. El valor de 0 se suele utilizar para unidades panorámicas, mientras que un ángulo de 20° se utiliza para unidades direccionales porque la distribución de los rayos X en este ángulo predominan en la dirección perpendicular al eje del tubo, como se muestra en la Figura 3. Además, en este gráfico se muestra que la mayor intensidad se produce a unos 12° aproximadamente.

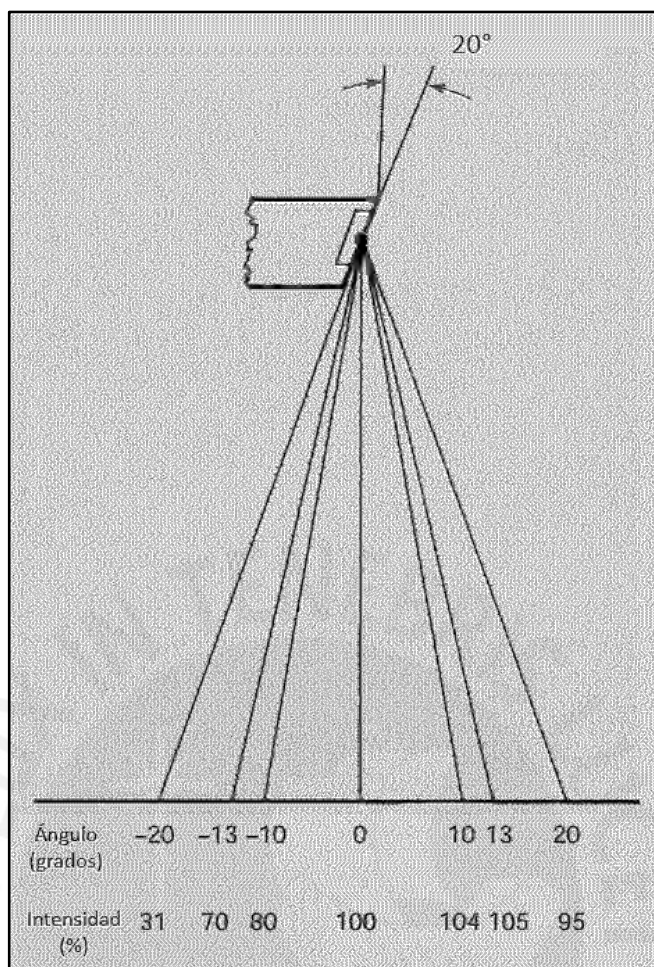


Figura 3. Distribución de rayos X

Tomado de “*Radiographic Testing*”, American Society of Non-Destructive Testing, 2002

1.3. Factores de influencia en imagen radiográfica

La materialización de una sombra proyectada sobre una película correspondiente a un objeto colocado entre la película y la fuente emisora de radiación es lo que se conoce como radiografía. El principal objetivo de una radiografía es la generación de una imagen que muestre la mayor cantidad de detalles posibles, por lo que se requiere del control cuidadoso de una cantidad de variables que afectan a la imagen. De esto, se tiene que las relaciones que gobiernan la discernibilidad de los defectos en una radiografía con son principalmente:

- **Geométricos:** tamaño de la fuente, distancia de la fuente al objeto, distancia del defecto a la película

- **Propiedades de película:** estas rigen la calidad de la imagen que se obtiene en la radiografía y son el contraste, definición y penumbra inherente.
- **Radiación:** la intensidad de la radiación de la fuente, así como la radiación dispersa de esta afectan a la calidad de la imagen.

1.3.1. Sensibilidad Radiográfica

La sensibilidad hace referencia al tamaño del detalle más pequeño observable en una radiografía o la facilidad con la que se puede detectar imágenes con detalles pequeños.

La sensibilidad es dependiente de la definición y el contraste:

- **Definición radiográfica:** hace referencia a la claridad o resolución de la imagen radiográfica. Es controlada por factores, en su mayoría, geométricos como el tamaño de la fuente de radiación, distancia de la fuente al objeto, distancia objeto a película, pantallas usadas, entre otros.
- **Contraste radiográfico:** se refiere a la diferencia de densidad de dos regiones adyacentes. El contraste está afectado principalmente por la energía de radiación. Asimismo, otros factores como el tipo de película, variación de espesor del objeto, radiación dispersa, entre otros, también afectan este parámetro.

Para mayor detalle, observar el esquema planteado en la Figura 4, en la cual se muestra la bifurcación de variables de las cuales depende la sensibilidad radiográfica.

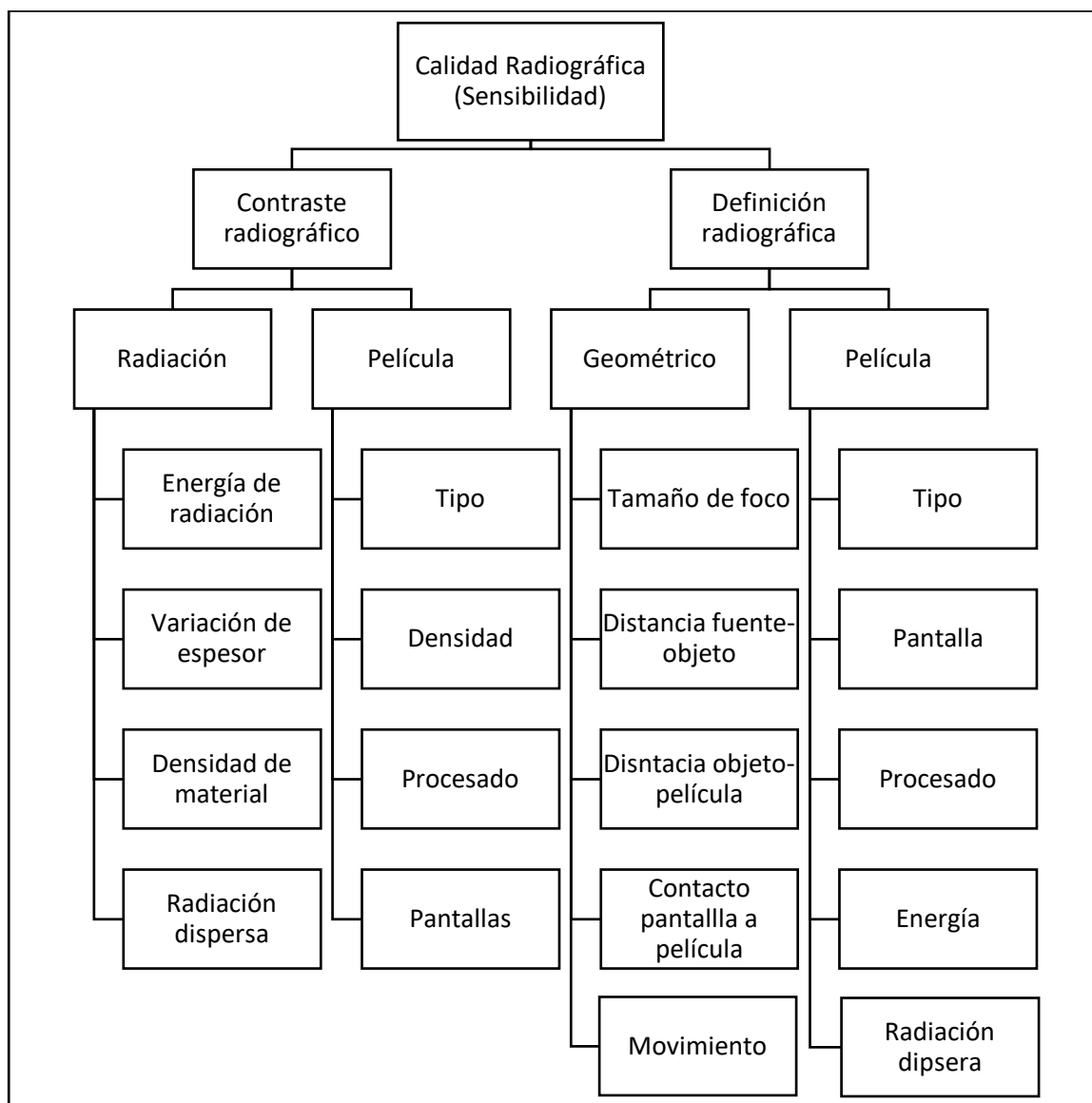


Figura 4. Variables de la calidad radiográfica

Tomado de “*Radiographic Testing*”, American Society of Non-Destructive Testing, 2002

1.3.2. Radiación dispersa

Al proyectar los Rayos X sobre un objeto, parte de esta radiación es absorbida, parte dispersada y otra pasa a través del objeto. De forma análoga a como la luz se dispersa con la niebla, los electrones de los átomos del objeto dispersan la radiación en todas las direcciones (EASTMAN KODAK COMPANY). Este proceso de dispersión, genera que la radiación original disminuya su intensidad, por lo que la radiación dispersa siempre es

menor a la primera. En este sentido, cualquier material adyacente que reciba la radiación directa se convierte en una fuente de radiación dispersa.

El contraste de una radiografía puede ser reducido por la radiación dispersa causada por los materiales que lo rodean, pues a la película no estarán llegando solo fuentes de radiación primaria, sino que se le sumarán las dispersas, lo que tiende a nublar la imagen. Esto se puede reducir utilizando pantallas de plomo, máscaras o filtros (Torres, Torres, & Montanez, 1988). La practica más utilizada consiste en colocar una pantalla de plomo posterior a la película que se está radiografiando.

1.3.3. Penumbra geométrica

A consecuencia de factores geométricos, la imagen de la película presenta una zona borrosa con un ancho específico, esta es conocida como penumbra geométrica y está definida en la ecuación (1). Se observa que es directamente proporcional al tamaño de foco y la distancia entre el objeto y la película. Además, guarda una relación inversa con la distancia de la fuente al objeto. En la Figura 5 se pueden observar estos parámetros gráficamente.

$$Ug = \frac{F * d}{Do} \quad (1)$$

Donde:

Ug= Penumbra geométrica

F=Tamaño de foco

d=distancia objeto-película

Do=distancia fuente-objeto

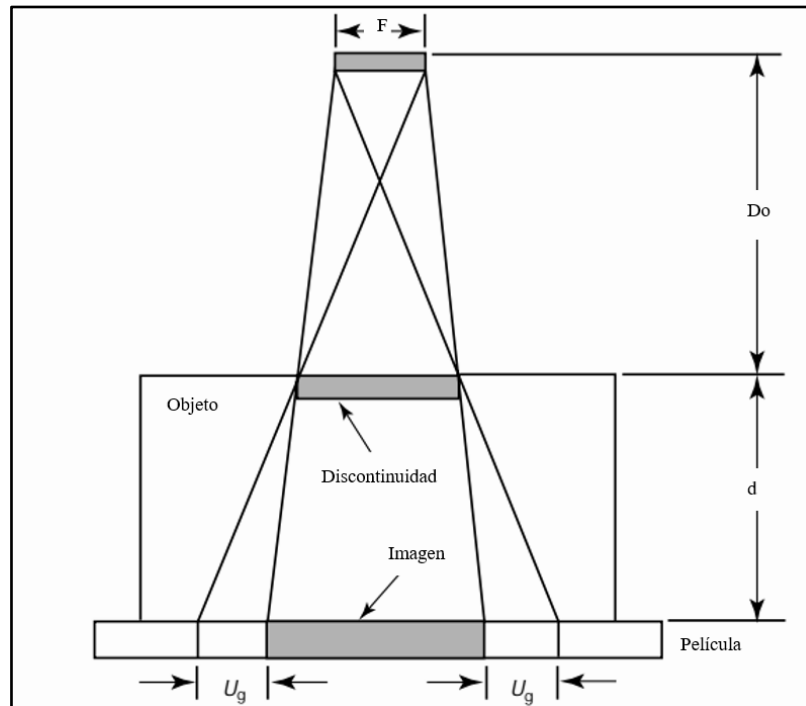


Figura 5. Penumbra geométrica

Tomado de “*Radiographic Testing*”, American Society of Non-Destructive Testing, 2002

1.3.4. Ley inversa del cuadrado

Cuando la emisión de rayos X se mantiene constante, la intensidad de la radiación que alcanza al objeto está gobernada por la distancia entre la fuente y el objeto, de tal manera que varía de manera inversamente proporcional con el cuadrado de esta distancia.

Los rayos X se ajustan a las leyes de la luz, estos cubren una superficie cada vez mayor, pero con menor intensidad a medida que recorren más distancia desde su fuente de emisión. Con la suposición de que la emisión de los rayos X de la fuente permanece constante, en la Figura 6 se tiene que a una distancia D (fuente-objeto), el área cubierta en C1 cubre un área de 4 cuadrados con una intensidad I₁. Ahora, si se duplica la distancia D, el área se expande a 16 cuadrados a una intensidad I₂. En la ecuación (2) se expresa esta relación, donde I₁ e I₂ son las intensidades a las distancias D₁ y D₂, respectivamente.

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

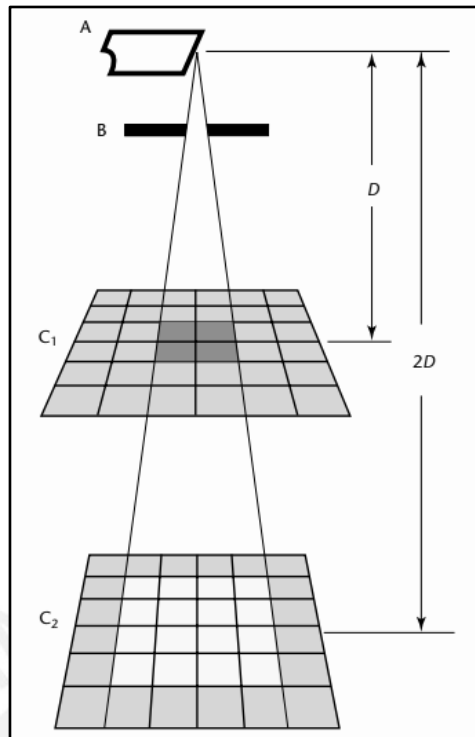


Figura 6. Esquema de la ley de inversa del cuadrado

Tomado de “Radiographic Testing”, American Society of Non-Destructive Testing, 2002

1.3.5. Exposición

Se define a la exposición como el producto de la intensidad de la radiación de un objeto con el tiempo al cual se encuentra expuesta a esta. En la ecuación (3), se coloca matemáticamente la relación:

$$E = I * t \quad (3)$$

Donde:

E= exposición (mA.s)

I= intensidad de radiación o corriente que pasa a través del tubo (mA)

t= tiempo de exposición (segundos)

A un kilo voltaje específico, esta expresión permite expresar el resultado de la exposición en miliamperios-segundos para los Rayos X.

1.4. Películas radiográficas

Las películas radiográficas constan de tres capas principales: protectora de 1 micra, emulsión de 10 a 15 micras y una base de poliéster teñida de azul de aproximadamente 175 micras de espesor (ver Figura 7). La capa de emulsión recubre la capa base y a su vez están son recubiertas por dos capas protectoras que ayudan contra la abrasión. La emulsión se compone de haluros de plata (bromuro o cloruro de plata), los cuales generan una imagen cuando se les aplica rayos X o gamma, debido a su sensibilidad para la absorción estos rayos penetrantes. Además, estas dos capas de emulsión ayudan a aumentar el contraste y la densidad de la imagen en las radiografías (FUJIFILM, 2009).

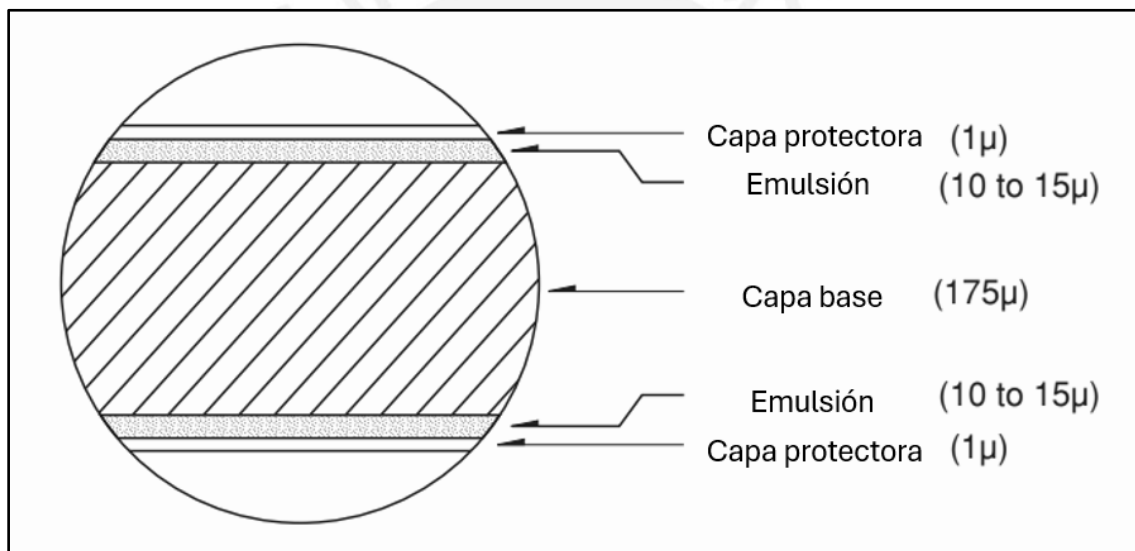


Figura 7. Capas de una película radiográfica

Tomado de “*The Fundamentals of Industrial Radiography*”, FUJIFILM, 2009

Cuando los rayos X inciden sobre los granos de haluro de plata sensibles, algunos iones de bromuro son liberados y capturados por los iones de plata. Este cambio no puede ser detectado por métodos físicos ordinarios y se denomina imagen latente u oculta; sin embargo, los granos expuestos se convierten sensibles a la exposición de un revelador químico, lo cual desencadena una formación de plata negra metálica. Esta plata, la cual se encuentra

suspendida en la solución gelatinosa de la emulsión, la que genera la imagen (IOWA STATE UNIVERSITY, s.f.).

1.4.1. Densidad radiográfica

La densidad radiográfica es una medida del grado de oscurecimiento de la película. Se puede expresar como el logaritmo de la intensidad de la luz incidente en la película y la intensidad de la luz transmitida a través de la película, de acuerdo con la ecuación (4). La relación descrita es la inversa de la transmitancia.

$$D = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right) \quad (4)$$

En la Tabla 1 se observa como el logaritmo de la inversa de la transmitancia (opacidad) brinda valores más sencillos de usar y comparar.

Tabla 1. Relación entre transmitancia y densidad de película

Transmitancia (I_t/I_0)	Porcentaje de transmitancia	Inversa de transmitancia (I_0/I_t)	Densidad de Película ($\text{Log}(I_0/I_t)$)
1	100%	1	0
0.1	10%	10	1
0.01	1%	100	2
0.001	0.10%	1000	3
0.0001	0.01%	10000	4
0.00001	0.00%	100000	5
0.000001	0.00%	1000000	6
0.0000001	0.00%	10000000	7

Tomado de “*Non Destructive Evaluation Techniques*” Center of Non Destructive Evaluation

Además, se puede observar que la densidad de 2 ocurre cuando solo 1% de la luz incidente traspasa la película. Cuando la densidad es 4, solo un 0.01% atraviesa la película. Debido a esto, los estándares industriales requieren densidades típicas entre 2 y 4 para una visibilidad aceptable con luces comunes. Por encima de 4, se requieren de luces extremadamente altas para poder visualizar la imagen. Para consideraciones prácticas,

una densidad entre 2 y 3 logra un equilibrio entre visibilidad de detalles y debido a que es lo suficientemente oscuro para revelar detalles, pero no tan oscuro para requerir luces extremadamente brillantes.

La densidad de las películas se mide con un densitómetro, el cual es un aparato que tiene un sensor fotoeléctrico que mide la cantidad de luz transmitida a través de un trozo de película. La película se coloca entre la fuente de luz y el sensor, de esta manera una lectura de la densidad es mostrada por el aparato.

1.4.2. Velocidad de película

La velocidad de una película se define como el valor que expresa la respuesta del receptor a la radiación penetrante bajo condiciones específicas (ASTM International, 2024) o, en otras palabras, la exposición que necesita la película para obtener una densidad específica. Es decir, una película rápida requiere de una exposición en un tiempo breve para alcanzar cierta densidad, mientras que una película lenta necesita de mayor tiempo de exposición para alcanzar la misma densidad.

Para ilustrar lo mencionado de manera gráfica, en la Figura 8, se puede observar que la película X es más sensible que la Y.

1.4.3. Curvas Sensitométricas

La sensitometría es la ciencia encargada de medir la respuesta de las emulsiones fotográficas a la luz o radiación. Los fabricantes de películas comúnmente caracterizan sus productos para determinar la relación entre la exposición aplicada y la densidad resultante, esta data es presentada en forma de curvas denominadas H y D (en honor a Hurter y Driffield) o Sensitométricas.

Para comprimir el eje horizontal, los valores de exposición relativa se presentan en escala logarítmica y usualmente sin unidades. En el eje vertical se encuentran los valores de

densidad de película, como se ilustra en la Figura 8. Este gráfico facilita la comparación de dos conjuntos de valores, el cual es el uso principal que se les da a las curvas. Además, estas curvas se usan para ajustar la exposición utilizada para producir una radiografía a cierta densidad a otra que producirá una de menor o mayor radiografía (IOWA STATE UNIVERSITY, s.f.).

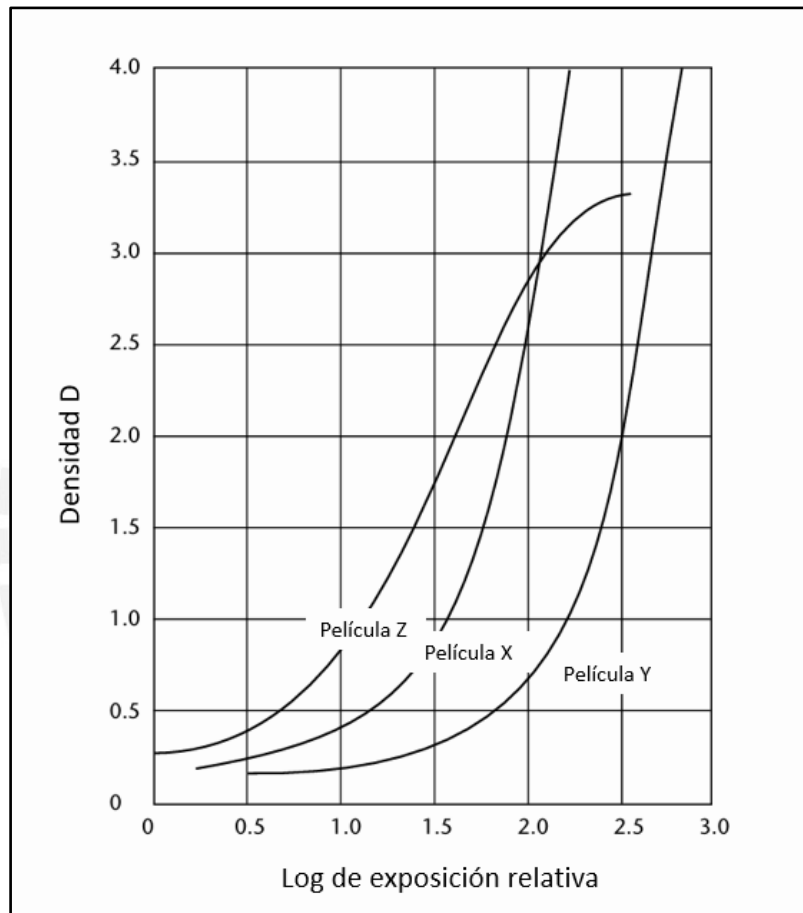


Figura 8. Curvas Sensitométricas para películas X, Y, Z

Tomado de “*Radiographic Testing*”, American Society of Non-Destructive Testing, 2002

Tomando de ejemplo la película Z mostrada en la Figura 9, supongamos que una radiografía hecha a esta película con una exposición de 12 mA.min tiene una densidad de 0.8 en la región de interés. Sin embargo, se desea aumentar la densidad a 2 con la finalidad de poder incrementar el contraste. Se tiene que:

En el punto 1: $\text{Log}E$ a $D=0.8$ es 1.62

En el punto 2: $\text{Log}E$ a $D=2$ es 1

De la diferencia, en 3: $\text{Log}E=0.62$. El antilogaritmo de esta diferencia es 4.2.

Con este cálculo, se multiplica la exposición original de 12 mA.min por el factor de 4.2 obteniendo aproximadamente 50 mA.min para producir una densidad de 2. De esta manera, se realizó un ajuste a la exposición para poder obtener un valor de densidad de película deseado (American Society of Non Destructive Testing, 2002).

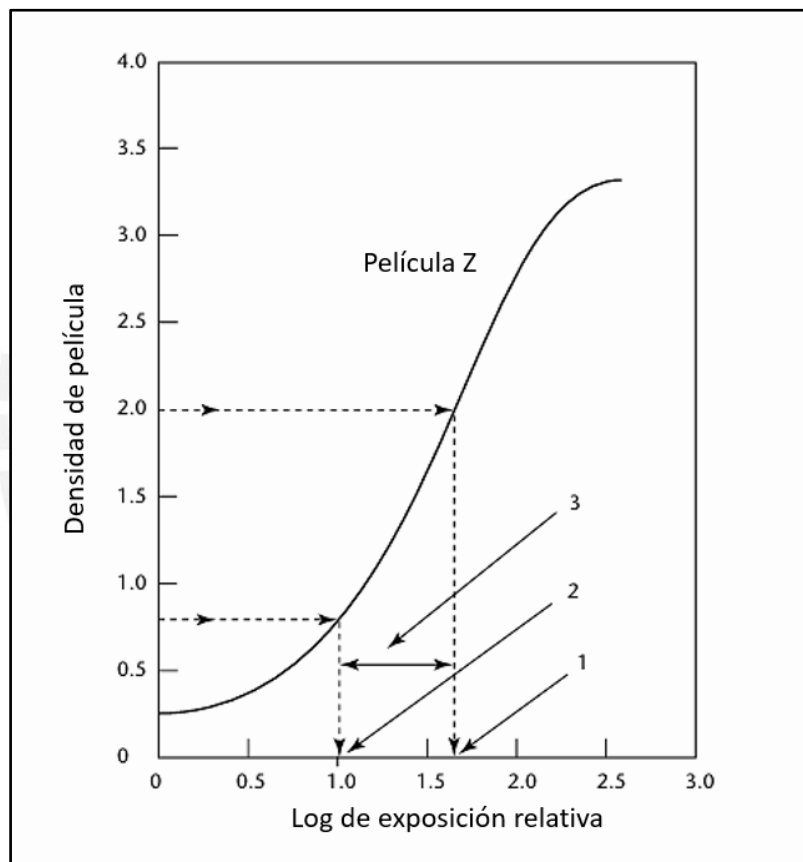


Figura 9. Uso de curva sensitométrica

Tomado de “*Radiographic Testing*”, American Society of Non-Destructive Testing, 2002

1.4.4. Clasificación

Hay cuatro clasificaciones generales para las películas radiográficas, de acuerdo con ASTM E1815 (ASTM International, 2018):

- **Clase I:** De granulometría extra fina, alta capacidad de contraste y baja velocidad. Es usado con materiales de baja densidad y puede usarse con o sin pantallas de plomo (exposición directa).
- **Clase II:** Grano fino, alto contraste y velocidad media. También son usados para materiales de baja densidad o espesores pequeños de metales pesados con una alta energía. Son más usados que la clase I y se pueden usar con o sin pantallas de plomo.
- **Clase III:** Películas de alta velocidad, de granulometría no muy fina y que requieren de bajo tiempo de exposición. Usadas generalmente para altas emisiones de rayos X o gamma. El uso de las pantallas de plomo depende del operador. Se consideran de contraste medio.
- **Clase IV:** De tipo especial, cuentan con alto contraste y velocidad cuando se utilizan con pantallas intensificadores fluorescentes. El contraste es bajo cuando se utilizan pantallas de plomo o se realiza mediante exposición directa.

1.4.5. Clasificación según AGFA

Según la norma, la clasificación de las películas puede presentar variaciones. Aparte de ASTM E1815, se pueden encontrar variaciones en la clasificación según norma AGFA. Sobre esta última, se cuenta con nueve clasificaciones, diferenciadas principalmente por la aplicación (General Electric Company, 2014):

- **STRUCTURIX D2:** Grano extremadamente fino con un contraste muy alto. Adecuado para exposiciones que requieren la mejor representación de detalles posible. Usados en componentes electrónicos, materiales compuestos, fundiciones de metales ligeros y aleaciones.

- **STRUCTURIX D3:** Grano ultrafino con muy alto contraste y gran capacidad para representación de detalles. Adaptable para la exposición con pantallas de plomo, utilizando rayos X o rayos gamma. Usados en componentes electrónicos, materiales compuestos, fundiciones de metales ligeros y aleaciones, soldaduras de alta calidad, calidad nuclear e industria aeroespacial.
- **STRUCTURIX D4:** Película de grano extra fino con muy alto contraste. Aplicable para la exposición con pantallas de plomo, utilizando rayos X o rayos gamma. Usados en los mismos sectores que el STRUCTURIX D3.
- **STRUCTURIX D5:** De grano muy fino con alto contraste. Excelente desempeño para la visualización de discontinuidades. Su uso está diseñado para ir acompañada con pantallas de plomo, ya sea con rayos X o rayos gamma. Usados en soldaduras, fundiciones, construcción naval, industria aeroespacial y aeronáutica.
- **STRUCTURIX D7:** De grano fino con alto contraste y alta velocidad. Usados a exposición directa o con pantallas de plomo. Para la exposición con pantallas de plomo, se recomienda el uso de rayos X o rayos gamma. Áreas de aplicación similares al STRUCTURIX D5.
- **STRUCTURIX D8:** De grano medio con alto contraste y muy alta velocidad. Se puede utilizar para exposición directa o con pantallas de plomo. Como principal característica, ofrece una buena calidad de imagen con tiempos de exposición cortos. Si se requiere una velocidad aún mayor, se deben usar pantallas fluorescentes. Áreas de aplicación similares al STRUCTURIX D5.

- **STRUCTURIX WIDE LATITUDE:** Especialmente diseñadas para radiografías internas y para inspeccionar objetos dentro de un rango de espesor amplio. Usadas para inspección en hormigón y fundiciones.
- **STRUCTURIX D4W:** Grano extra fino con contraste medio y muy alta velocidad. Utilizado a exposición directa o con pantallas de plomo. Usado en fundiciones de espesor múltiple, fundiciones ferrosas/ no ferrosas y soldaduras no críticas.
- **STRUCTURIX D6W:** De grano fino y alto contraste que combina una buena calidad de imagen y una amplia latitud. Aplicaciones similares al STRUCTURIX D4W.

Además, se muestra la Figura 10, con curvas Sensitométricas para las películas STRUCTURIX, las cuales pueden ser usadas tal como se explicó en el capítulo 1.4.3.

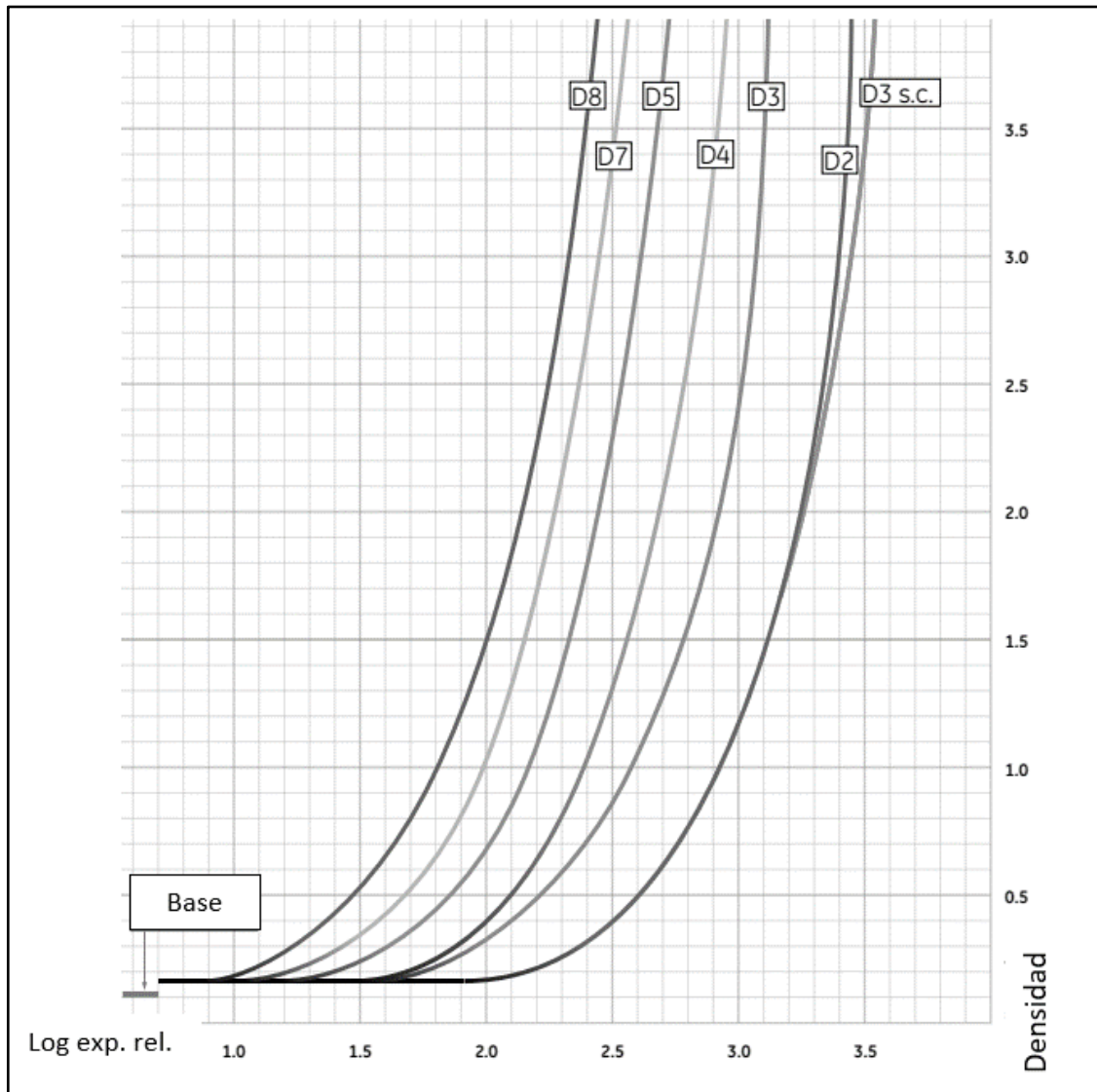


Figura 10. Curvas características para STRUCTURIX

Tomado de “*STRUCTURIX Film*”, General Electric Company, 2014

1.5. Indicadores de Calidad de Imagen o Penetrámetro

Como una verificación de la calidad del método radiográfico, se suele colocar una pieza de prueba estandarizada en cada radiografía. Estas son conocidas como penetrámetro o indicador de calidad de imagen (IQI del término “Image Quality Indicator”). El IQI es una forma geométrica sencilla compuesta del mismo material que se está radiografiando. Está compuesto de alguna estructura pequeña como agujeros, alambres u otros, cuyas dimensiones se relacionan numéricamente con el espesor de la pieza radiografiada. El IQI sirve como una prueba permanente de que la radiografía se realizó en óptimas condiciones.

En la Figura 11, se observan cinco tipos diferentes de penetámetros, su origen y descripción figuran en las siguientes normas:

- EN 462-01 (Europa) – (a)
- BS 3971 (Reino Unido) – (b)
- ASTM E1025 (Estados Unidos)– (c)
- ASTM 747 (Estados Unidos) – (d)
- AFNOR NF A 04-304 (Francia) – (e)

Se pueden observar IQI tipo alambre (a, b y d), escalón (e) y agujero (c). Los IQI tipo escalón tienen su origen en Francia: consisten en cuñas escalonadas del mismo material que el objeto, con el espesor de los escalones aumentando aritméticamente. Estos escalones presentan orificios con un diámetro igual al grosor del escalón. Para que se considere que un escalón es visible, todos los agujeros de dicho escalón deben observarse claramente en la película. En general, para los penetrámetros tipo escalón se puede definir la sensibilidad como se muestra en la ecuación (5):

$$s\% = \frac{e}{t} * 100 \quad (5)$$

Donde:

e= espesor de la capa más delgada visible en el objeto radiografiado

t= espesor del material

Por otro lado, los IQI tipo agujero contienen tres orificios con diámetros 1T, 2T y 4T. La T hace referencia al espesor de la placa. Se solía utilizar una placa del 2% del espesor de la muestra; sin embargo, en la actualidad son utilizadas placas con 1% o 4%. Si T es el 2% del espesor de la muestra y el orificio 2T es visible en la radiografía, entonces el nivel

de sensibilidad alcanzado se muestra como “2-2T”. Además, se muestra la relación matemática que define la sensibilidad equivalente α del penetámetro en la ecuación (6):

$$\alpha = \frac{\left(\frac{e * d}{2}\right)^{\frac{1}{2}}}{t} * 100 \quad (6)$$

Donde:

e= espesor del penetámetro

d= diámetro del agujero

t= espesor del objeto

Varios diseños de IQI tipo cable son utilizados, como se mostró en la Figura 11. Estos consisten en cables de diversos diámetros sellados en un empaque de plástico con símbolos para su identificación. La calidad de la imagen es definida por la visibilidad del cable más delgado en la radiografía. Estos IQI en la norma ASTM están disponibles en tres grupos de metales livianos y cinco de metales pesados. La sensibilidad requerida (D.E.%) para estos penetámetros se define en la ecuación (7):

$$D.E. \% = \frac{\emptyset}{D_{total}} * 100 \quad (7)$$

Donde:

\emptyset = diámetro del hilo visible más fino

D_{total} = espesor radiografiado

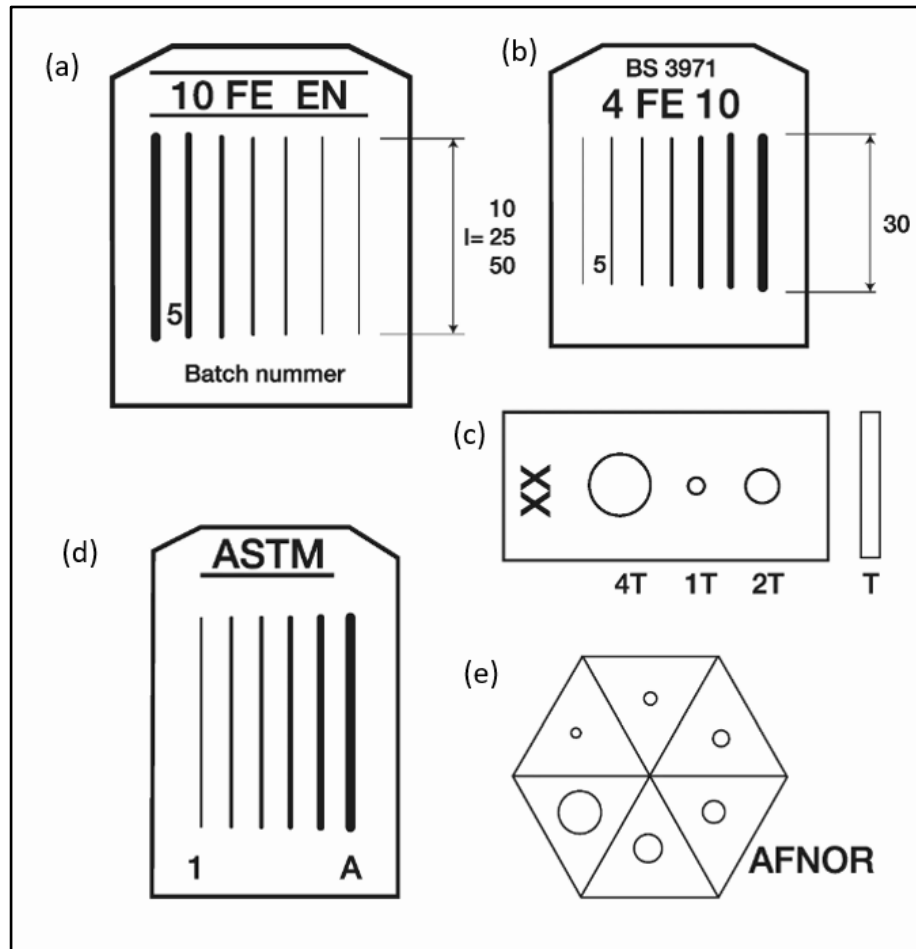


Figura 11. Tipos de penetrómetros

Tomado de “*Industrial radiography: Image Forming Techniques*”, GE Company, 2006

1.6. Diagramas de exposición

Los gráficos de exposición muestran la relación entre el espesor del material, el kilo voltaje y la exposición. Son adecuados para determinar las exposiciones en la radiografía de placas uniformes; sin embargo, solo sirven como guías aproximadas para fundiciones complicadas y objetos complejos que tienen gran variación de grosor. Estas tablas son brindadas comúnmente por los fabricantes de equipos de rayos X, es por esto que no se pueden utilizar para diferentes máquinas de rayos X. En consecuencia, los laboratorios suelen preparar sus propios diagramas para sus equipos con la finalidad de optimizar los tiempos de exposición y mejorar la eficiencia en sus operaciones. En la Figura 12 se muestra un diagrama de exposición para acero desde 100kV a 220kV.

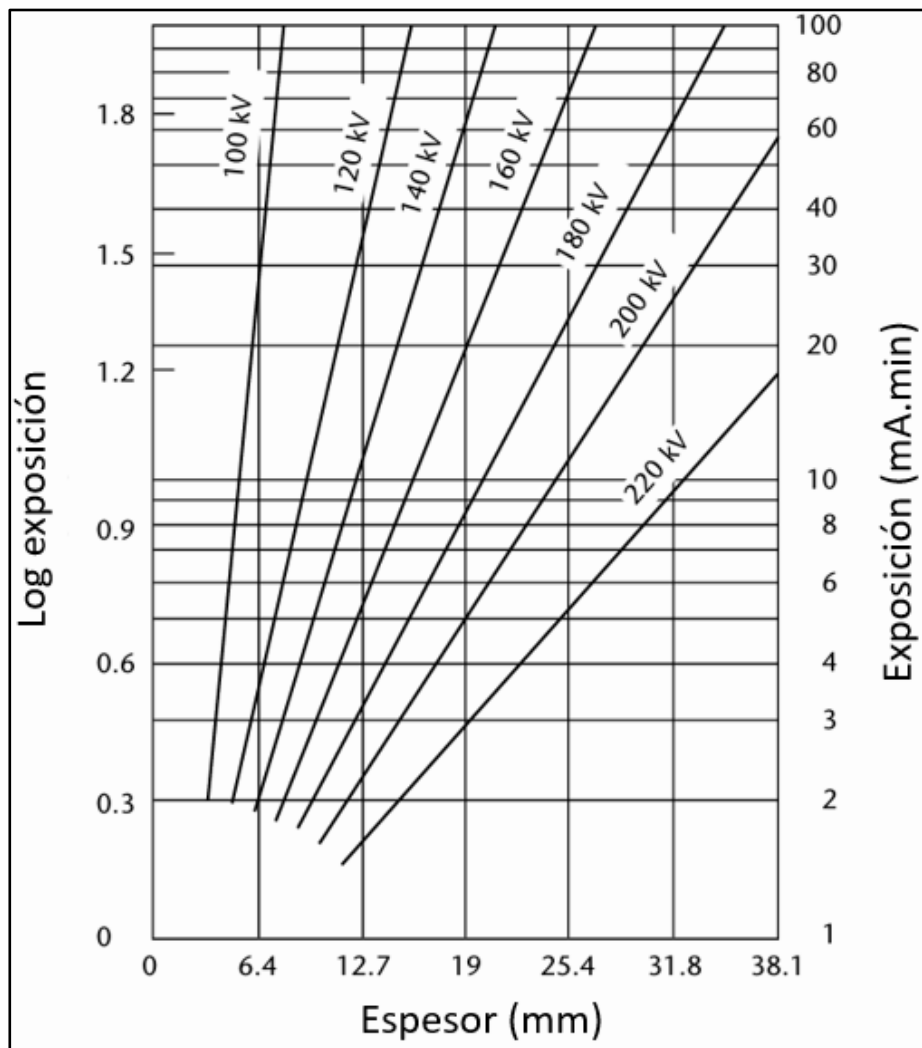


Figura 12. Diagrama de exposición para acero desde 100kV hasta 220kV

Tomado de "Radiographic Testing", American Society of Non-Destructive Testing, 2002

1.7. Elaboración de un diagrama de exposición

Para la elaboración de los diagramas de exposición, es necesario contar con dos diagramas preliminares para su elaboración: espesor vs densidad y voltaje vs espesor.

Por ejemplo, utilizando un tubo de rayos X a parámetros como FFD, película y material contantes, se utiliza un escalón de un material para ser irradiado por rayos X a voltajes entre 75 y 195 kV a dos diferentes exposiciones: 8 y 200 mA.min. Tras los ensayos, se miden las densidades y se grafican en función al espesor del material. Se obtendrán dos gráficos a 8 y 200 mA.min con líneas curvas que unen los puntos a voltajes particulares

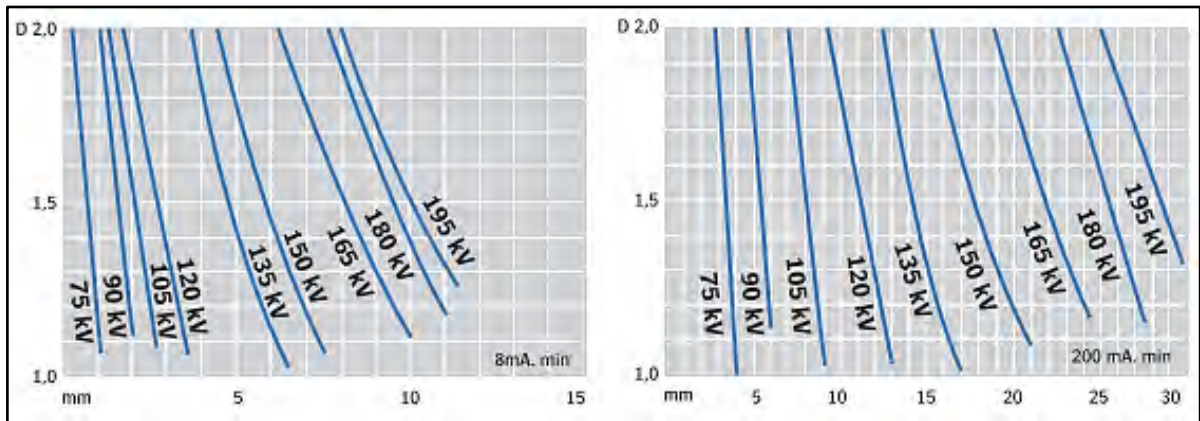


Figura 13. Diagramas preliminares de densidad vs espesor

Tomado de “*Industrial Radiography: Image Forming techniques*”, GE Company, 2006

Ambos gráficos brindan los datos requeridos para elaborar un gráfico que evite cualquier inexactitud. Es así como se obtiene un gráfico intermedio a una densidad específica (en este caso, suponiendo una densidad de 2) utilizando estos datos y se le nombra como gráfico de tensión vs espesor. Esto resulta bastante útil, debido a que se pueden compensar desviaciones resultado de las radiografías en este gráfico intermedio (General Electric Company, 2006).

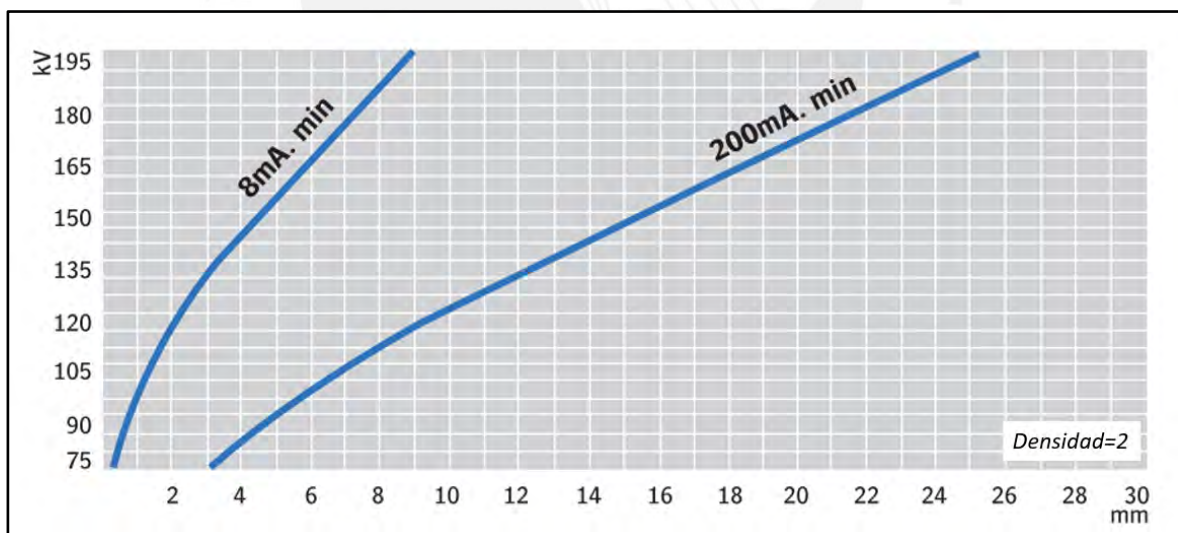


Figura 14. Diagrama intermedio de voltaje vs espesor a densidad 2

Tomado de “*Industrial Radiography: Image Forming techniques*”, GE Company, 2006

Finalmente, el gráfico de exposición se dibuja en una escala logarítmica, donde el espesor del material se presenta en el eje X y el valor del logaritmo de la exposición o tiempo de exposición en el eje Y, dependiendo de las necesidades del usuario (Figura 12).

1.8. ASME V: Examinación no destructiva – Art. 2

La norma ASME “Boiler and Pressure Vessel Code – Non destructive examination” sección V, cubre las generalidades de la examinación radiográfica en su artículo 2. El artículo impone los requisitos mínimos para obtener una examinación correcta: descripción de procedimientos de examinación (indicación de material, distancia fuente-objeto, pantallas usadas, voltaje, entre otros) y demostración de la calidad del procedimiento. Además, en la normativa se recalca la necesidad de implementar las medidas de seguridad requeridas para evitar una sobreexposición a la radiación al personal.

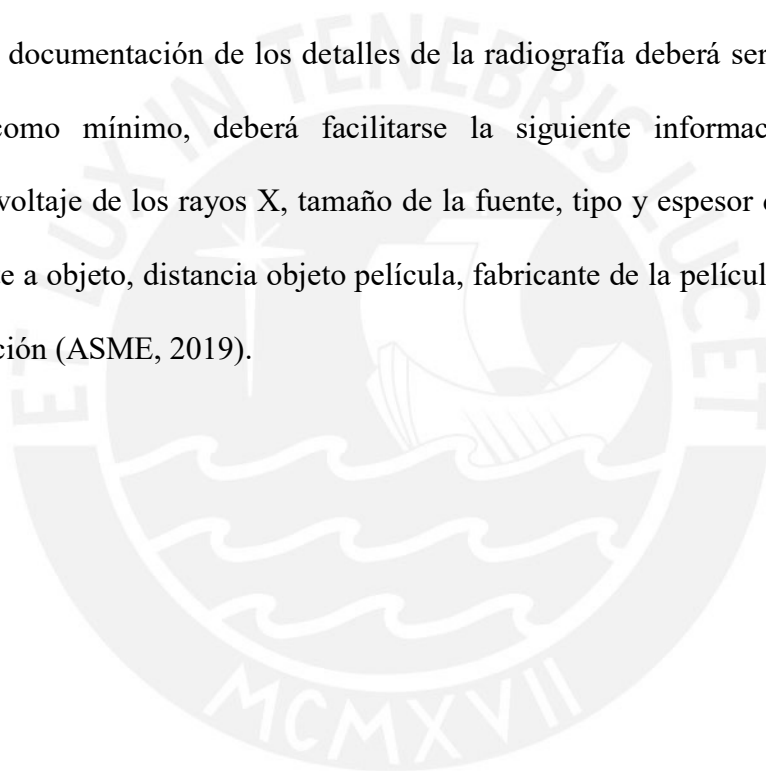
Una vez se culmina con la selección de la película más adecuada, esta debe colocarse en una porta película para no causar daños a la emulsión. Se aclara que las películas que no han sido expuestas deben almacenarse de tal manera que se protejan de los efectos de la luz, la presión y calor excesivos, gases o vapores dañinos o radiación penetrante. El procedimiento remite a la norma ASTM E1254, donde se advierte que temperaturas mayores a 38°C pueden acelerar la producción de manchas en la película o temperaturas debajo del punto de rocío incrementan la humedad de las radiografías o la producción de hongos, ocasionando que estas se peguen (ASTM International, 2023)

Continuando con el procedimiento, la distancia fuente-objeto seleccionada servirá para posicionar correctamente el objeto con respecto a la fuente de radiación, centrar el mismo y ubicar la película en el lado posterior al objeto para obtener la radiografía. Al momento de realizar la exposición a los rayos X, cada película debe encontrarse correctamente identificada, de tal manera que exista una correlación única entre la parte radiografiada y la película. La norma recomienda el uso de una letra como “R” seguido de guion y número (como -1 o -2), pero esto puede variar de acuerdo con las necesidades del usuario. En adición, al momento de realizar la radiografía, se recomienda seguir las recomendaciones de ASTM

E94 y añadir pantallas de plomo en la parte trasera de la película para proporcionar una adecuada protección ante la radiación dispersa (ASTM International, 2022).

Una vez realizada la proyección de los rayos X, las películas podrán ser interpretadas y visualizadas mediante la ayuda de negatoscopio, dispositivo que debe contar con una carcasa que contenga una pantalla iluminada para visualizar las películas. Este dispositivo deberá contar con un reóstato o un circuito eléctrico para variar la intensidad de la luz (ASTM International, 2021).

Finalmente, la documentación de los detalles de la radiografía deberá ser preparado por el personal y, como mínimo, deberá facilitarse la siguiente información: número de exposiciones, voltaje de los rayos X, tamaño de la fuente, tipo y espesor del material base, distancia fuente a objeto, distancia objeto película, fabricante de la película y designación y tipo de exposición (ASME, 2019).



CAPÍTULO II

2. MÉTODOS EXPERIMENTALES

El objetivo de la sección es desarrollar un método para obtener los diagramas de exposición para tres cuñas de acero a una densidad de 2.5 con el equipo actual de rayos X del laboratorio de materiales con voltaje de trabajo entre 100 y 300kV. Se presentarán los materiales y equipos que se emplearán para el desarrollo experimental y se ahondará en el procedimiento para obtener los diagramas.

2.1. Materiales

En esta sección se detallan los materiales para la llevar a cabo los ensayos y sus configuraciones.

2.1.1. Cuñas Escalonadas

Se cuenta con tres cuñas escalonadas, como se observa en la Figura 15:

- **Patrón I:** El primer patrón contiene con espesores entre 1 a 10mm con una progresión aritmética de 1mm.
- **Patrón II:** El segundo patrón contiene espesores entre 12 y 30 mm con una progresión aritmética de 2mm.
- **Patrón III:** El primer patrón contiene espesores entre 35 y 80 mm con una progresión aritmética de 5mm.

Todas las cuñas son de acero y cada una tiene 10 escalones en total, debido a la configuración detallada (observar Figura 16). Las cuñas serán los objetos que se expondrán a la exposición de rayos X para obtener la configuración del diagrama de exposición deseado. Para el detalle de las dimensiones, dirigirse al Anexo I.

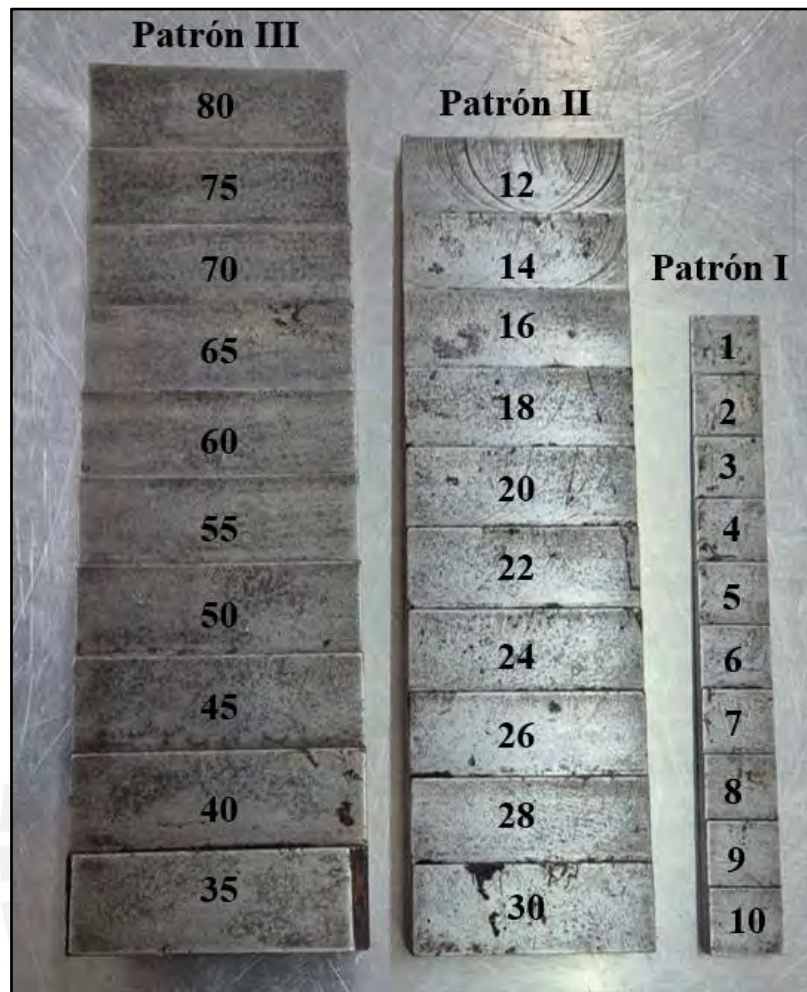


Figura 15. Rango total de espesores de 1 a 80 mm para patrones escalonados

Elaboración propia. Tomado en CITEMateriales PUCP

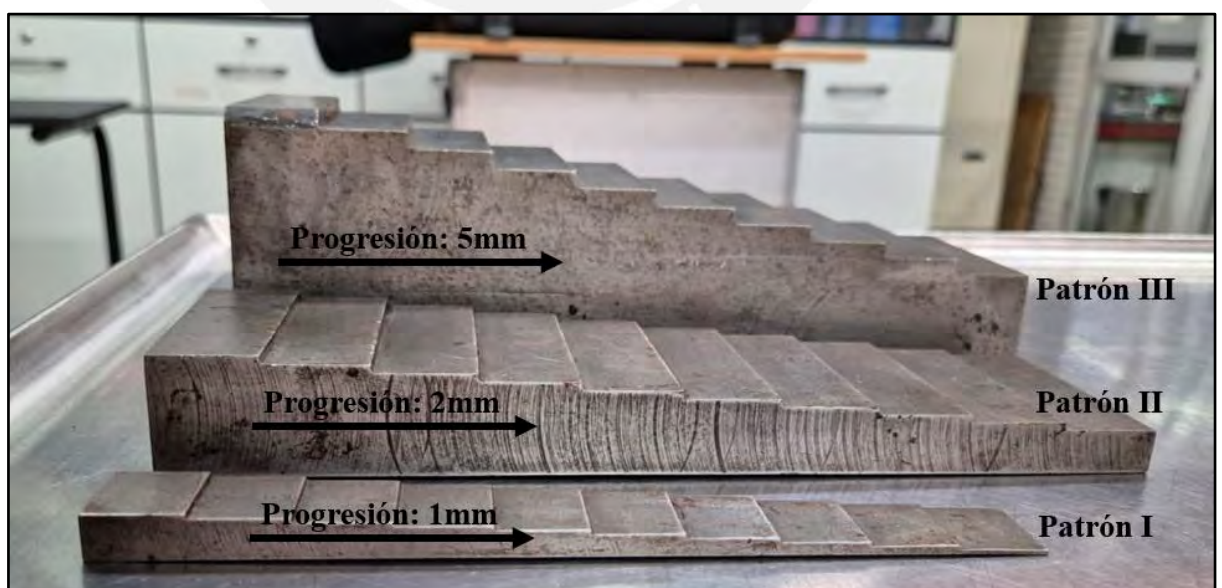


Figura 16. Progresión de escalones de cada patrón

Elaboración propia. Tomado en CITEMateriales PUCP

2.1.2. Películas

De lo detallado en el capítulo 1.4.5, se usará la película AGFA STRUCTURIX D7 PB ROLLPAC. Esta película está diseñada para ser expuesta a Rayos X y está acompañada de dos pantallas (frontal y posterior) de plomo de 0.027 mm.



Figura 17. Película STRUCTURIX D7 PB ROLLPAC 100mmx90m

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP

2.2. Equipos

2.2.1. Generador de Rayos X

Las unidades de equipos de rayos X se pueden clasificar en tres grupos de energía: generador de hasta 125kV son considerados de baja energía, generadores de 125 a 400 kV de energía media y mayores a 400 kV de alta energía. La mayor cantidad comercial de equipos se encuentra dentro de la gama media (Hellier). El equipo de energía media que se usará para la proyección de los Rayos X se encuentra en el laboratorio de materiales y tiene una antigüedad aproximada de 17 años. En la Tabla 2 se muestran las principales especificaciones técnicas del equipo (BALTEAU NDT). Entre las más

importantes se puede mencionar su rango de voltaje, con el cual se armará el diagrama de exposición. Además, la unidad de control para el generador es el dispositivo Hand-X, el cual es remoto y cuenta con una capacidad de memoria de hasta 100 exposiciones.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del generador de Rayos X

Especificaciones	Valores
Rango de voltaje (kV)	100 a 300
Rango de corriente (mA)	0.5 a 5
Peso (kg)	29
Temperatura de trabajo (°C)	70
Ángulo de haz (°)	40
Tamaño de foco (mm)	2.5 x 2.5
Carcasa	Cerámica
Refrigeración de ánodo	Por aire
Unidad de control	Hand-X

Nota. Obtenido de “BALTOSPOT CERAM 35”, Balteau NDT

Se muestran las principales dimensiones del equipo generador de rayos X en la Figura 18.

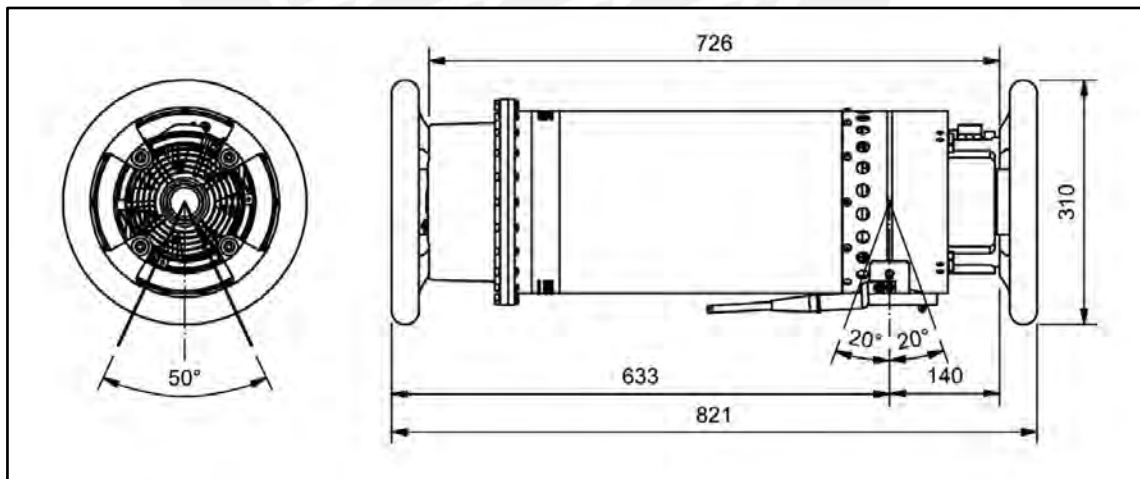


Figura 18. Dimensiones de equipo generador de Rayos X

Tomado de “BALTOSPOT CERAM35”, Balteau NDT.

El equipo muestra su rango de trabajo mediante una tabla comparativa de voltaje vs amperaje, en la cual se muestra el recorrido que es posible seguir como usuario para el

uso del equipo. Como observación, el amperaje máximo de trabajo se presenta en las curvas 1 y 2, mientras que los tres sobrantes trabajan con amperajes mínimos permitidos.

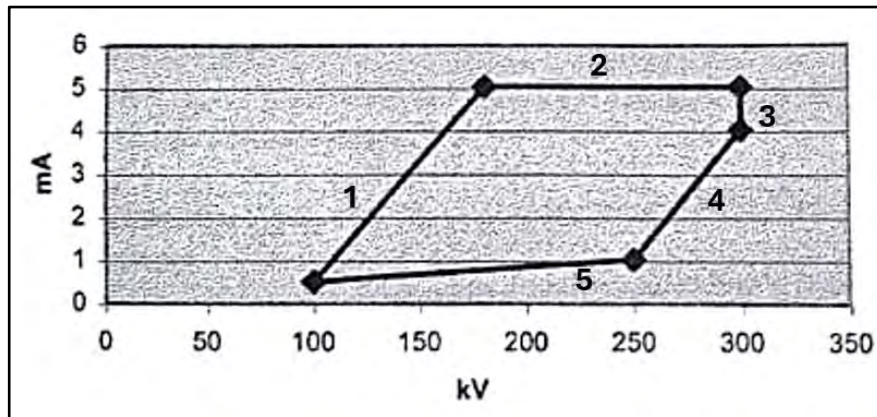


Figura 19. Rango de trabajo del equipo generador de Rayos X

Tomado de “OPERATING AND MAINTENANCE MANUAL: CERAM35 & CONTROL UNITS”, Balteau NDT.

De lo explicado, se muestra la Tabla 3, donde se puede ver reflejado el recorrido del polígono de trabajo del equipo. Como se observa, los voltajes menores a 180kV no llegan a alcanzar el amperaje máximo permitido por el equipo, el cual es 5mA. Por ejemplo, para el valor de 100kV, solo es posible trabajar a 0.5mA.

Tabla 3. Amperaje máximo de trabajo por voltaje

Amperaje máximo de trabajo (mA)	0.5	1.2	2	2.8	5
Voltaje (kV)	100	120	140	160	180 a 300

Nota. Elaboración propia

En adición, en la Figura 20 se muestra el diagrama de exposición brindado por el fabricante, en el cual se brinda información para voltajes de 140 a 300kV, diferenciando el trazo de las curvas por el amperaje usado: continuas a 5mA y discontinuas a 1mA (BALTEAU NDT).

Este diagrama no brinda actualmente valores reales al momento de realizar los ensayos; sin embargo, servirá de referencia para poder diseñar los ensayos de corrección.

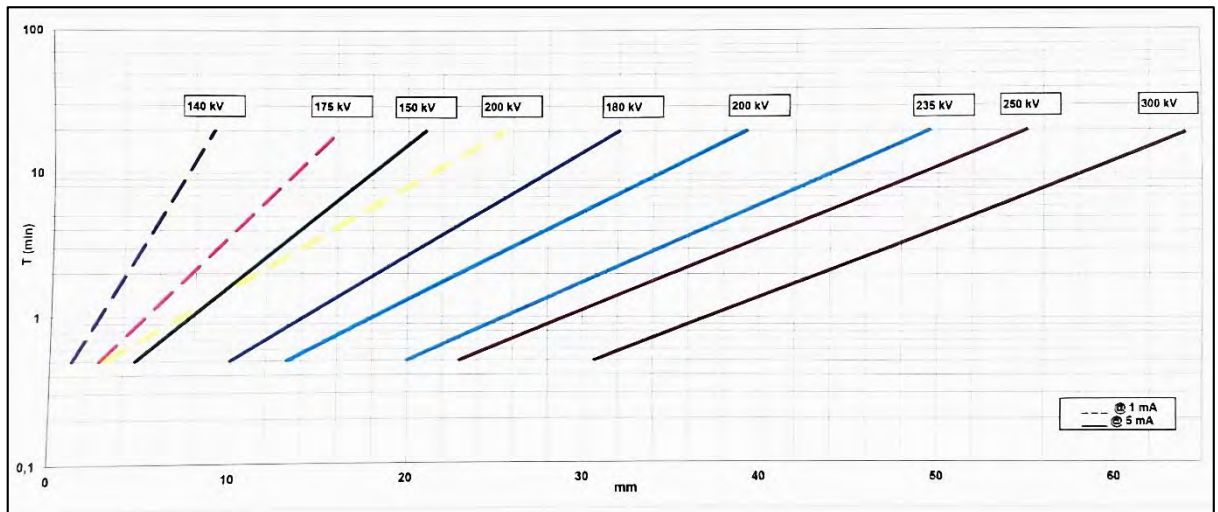


Figura 20. Diagrama de exposición actual del generador de Rayos X

Tomado de “*OPERATING AND MAINTENANCE MANUAL: CERAM35 & CONTROL UNITS*”, Balteau NDT.

2.2.2. Densitómetro

Se muestran las especificaciones técnicas del densitómetro (Figura 21) que se usará para determinar la densidad de películas reveladas se encuentra en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de densitómetro

Especificaciones	Valores
Rango	0 a 4 D con un 1mm de apertura
Exactitud	+/- 0.02 D o +/-1.5% D (1mm de apertura, 3.5 a 4 D)
Repetibilidad	+/- 0.01D
Temperatura de operación (°C)	10 a 40
Tiempo de calentamiento (min)	1

Tomado de “*301 Black & White Transmition Densitomer*”, X-rite.



Figura 21. Densitómetro

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP

2.3. Variables y parámetros de exposición

Para la realización de los ensayos, considerar la lista de variables y parámetros presentadas en la Tabla 5. Para los tres patrones se trabajará en un rango de tensiones entre 100 a 300 kV.

Tabla 5. Variables y parámetros de exposición

Variables	Descripción
Equipo	Generador de rayos X con rango de trabajo de 100 a 300kV
Distancia fuente película (FFD)	70 cm
Tipo de película	STRUCTURIX D7
Densidad	2.5
Proceso de revelado	Manual (ASTM E94)

Nota. Elaboración propia

2.4. Procedimiento experimental

La configuración de los ensayos totales se ha elaborado con la finalidad de obtener la mayor cantidad de puntos representativos para el diagrama de exposición final. De esta manera, se ha elaborado seis tablas a exposiciones de 5 mA.min (Tabla 6), 10 mA.min (Tabla 7), 15 mA.min (Tabla 8), 20 mA.min (Tabla 9), 30 mA.min (Tabla 10) y 50 mA.min (Tabla 11), con una suma total de 52 ensayos. El principal objetivo de este diseño es contar con al menos

tres puntos por cada curva de voltaje que se muestre en el diagrama de exposición final y así comprobar la tendencia lineal de las curvas en una escala logarítmica.

El diseño de estos ensayos se ha realizado contemplando como principal restricción el tiempo de exposición. Un limitante de 15 min se ha tomado como referencia para la mayoría de los ensayos, de tal manera que, al seleccionar el voltaje, exposición y el amperaje máximo mostrado en la Tabla 3, el tiempo no supere este límite. Sin embargo, se tienen dos casos excepcionales que corresponden al voltaje de 100kV para 10mA.min y 15mA.min, donde los tiempos son 20min y 30min respectivamente. Estos ensayos son de obligatoria realización para cumplir con el primer objetivo de obtención de tres puntos como mínimo para graficar la curva de 100 kV en el diagrama de exposición final.

Para 5 mA.min se programan once ensayos, cinco correspondientes al patrón I y seis al patrón II. El tiempo máximo para esta configuración es de 10 minutos, correspondiente a 100kV a 0.5mA.

Tabla 6. Configuración de ensayos a 5mA.min

Exposición 5mA.min					
#	Voltaje (kV)	Amperaje (mA)	Tiempo (min)	Patrón	Identificación
1	100	0.5	10	1	1 - P1
2	120	1.2	4.2	1	2 - P1
3	140	2	2.5	1	3 - P1
4	160	2.8	1.8	1	4 - P1
5	180	5	1	1	5 - P1
6	200	5	1	2	6 - P2
7	220	5	1	2	7 - P2
8	240	5	1	2	8 - P2
9	260	5	1	2	9 - P2
10	280	5	1	2	10 - P2
11	300	5	1	2	11 - P2

Nota. Elaboración propia

Para 10 mA.min se tienen once ensayos. El punto que supera el límite de tiempo de 15min, se identifican como “X-7”. En este caso, se están utilizando las tres probetas patrón desde esta exposición.

Tabla 7. Configuración de ensayos a 10mA.min

Exposición 10mA.min						
#	Voltaje (kV)	Amperaje (mA)	Tiempo (min)	Patrón	Identificación	
12.1	100	0.5	20	1	X - 7	
12	120	1.2	8.3	1	12 - P1	
13	140	2	5	1	13 - P1	
14	160	2.8	3.6	1	14 - P1	
15	180	5	2	2	15 - P2	
16	200	5	2	2	16 - P2	
17	220	5	2	2	17 - P2	
18	240	5	2	2	18 - P2	
19	260	5	2	2	19 - P2	
20	280	5	2	2	20 - P2	
21	300	5	2	3	21 - P3	

Nota. Elaboración propia

A 15 mA.min también se cuenta con once ensayos. El punto que supera el límite de tiempo de 15min, se identifican como “X-8”.

Tabla 8. Configuración de ensayos a 15mA.min

Exposición 15mA.min						
#	Voltaje (kV)	Amperaje (mA)	Tiempo (min)	Patrón	Identificación	
22.1	100	0.5	30	1	X - 8	
22	120	1.2	12.5	1	22 - P1	
23	140	2	7.5	1	23 - P1	
24	160	2.8	5.4	2	24 - P2	
25	180	5	3	2	25 - P2	
26	200	5	3	2	26 - P2	
27	220	5	3	2	27 - P2	
28	240	5	3	2	28 - P2	
29	260	5	3	2	29 - P2	
30	280	5	3	3	30 - P3	
31	300	5	3	3	31 - P3	

Nota. Elaboración propia

Con una exposición de 20mA.min, el voltaje mínimo de ensayo se configura en 140 kV y se comienza la proyección de rayos X desde el patrón II. Esto debido a que el tiempo requerido para valores de voltaje menores a 140kV es excesivo y no optimiza la configuración de los ensayos.

Tabla 9. Configuración de ensayos a 20mA.min

Exposición 20mA.min					
#	Voltaje (kV)	Amperaje (mA)	Tiempo (min)	Patrón	Identificación
32	140	2	10	2	32 - P2
33	160	2.8	7.1	2	33 - P2
34	180	5	4	2	34 - P2
35	200	5	4	2	35 - P2
36	220	5	4	2	36 - P2
37	240	5	4	2	37 - P2
38	260	5	4	2	38 - P2
39	280	5	4	3	39 - P3
40	300	5	4	3	40 - P3

Nota. Elaboración propia

Para 30 mA.min se continúa aplicando la misma lógica que para 20mA.min al comenzar desde 140kV. Finalmente, para 50 mA.min solo se contempla un ensayo a máximo voltaje permitido por el generador de rayos X, utilizando el patrón III y a un tiempo de exposición de 10min.

Tabla 10. Configuración de ensayos a 30mA.min

Exposición 30mA.min					
#	Voltaje (kV)	Amperaje (mA)	Tiempo (min)	Patrón	Identificación
41	140	2	15	2	41 - P2
42	160	2.8	10.7	2	42 - P2
43	180	5	6	2	43 - P2
44	200	5	6	2	44 - P2
45	220	5	6	2	45 - P2
46	240	5	6	3	46 - P3
47	260	5	6	3	47 - P3
48	280	5	6	3	48 - P3
49	300	5	6	3	49 - P3

Nota. Elaboración propia

Tabla 11. Configuración de ensayos a 50mA.min

Exposición 50mA.min					
#	Voltaje (kV)	Amperaje (mA)	Tiempo (min)	Patrón	Identificación
50	300	5	10	3	50 - P3

Nota. Elaboración propia

2.5. Proceso de revelado

Concluido el proceso de exposición de las películas a las configuraciones mencionadas, deben pasar por un proceso de revelado para posteriormente medir los valores de densidad. El laboratorio de Materiales de la sección de Ingeniería Mecánica contiene un cuarto con módulo de revelado manual para realizar este proceso. El módulo de revelado está equipado con las condiciones de temperatura y limpieza de acuerdo con ASTM E94. En la Figura 22 se observa el módulo de revelado con las luces de seguridad para el revelado encendidas. Estas luces son del espectro rojo y permite obtener suficiente luz para la operación de revelado sin dañar las películas.

El módulo no debe permitir la entrada de luz blanca de ninguna fuente, debido a que la película radiográfica, al momento de revelarse, es altamente fotosensible y podría causar problemas en el revelado como niebla o falta de contraste.

Las películas STRUCTURIX D7, puestas en la porta películas mostrados en la Figura 23, pasarán por cinco procesos en total:

- **Revelado:** En este proceso, las áreas que fueron expuestas a la radiación se tornan oscuras, debido a una reacción química en la cual se reducen los haluros de plata de la emulsión a plata metálica. En nivel de ennegrecimiento dependerá de la cantidad de radiación recibida. Es importante conservar la temperatura óptima de revelado, no sacar la película del baño de revelado y mover la película al interior del baño unos 30 segundos al inicio para evitar burbujas. Luego, cada 1 minuto, repetir el proceso de movimiento de

la película. Esta fase tiene un tiempo aproximado de duración de unos 5 minutos y en todo momento se deben conservar las luces de seguridad para el proceso.

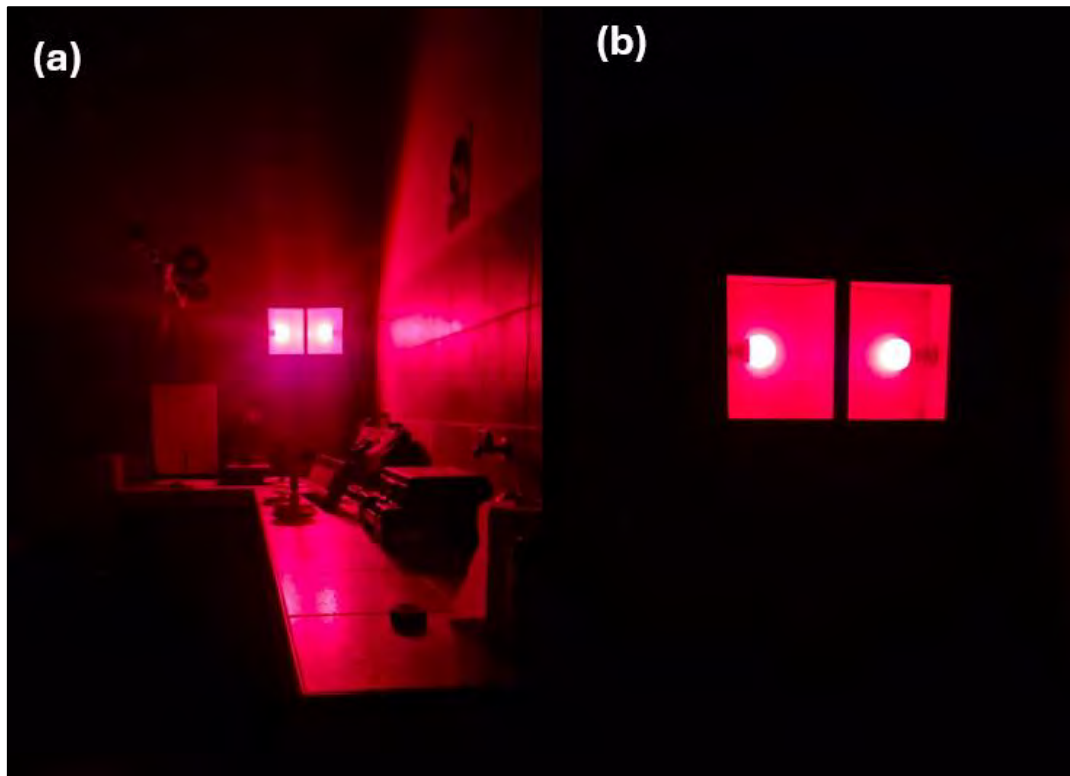


Figura 22. (a) Módulo de revelado (b) Luces de seguridad

Elaboración propia. Tomado en CITEmateriales PUCP



Figura 23. Porta películas

Elaboración propia. Tomado en CITEmateriales PUCP

- **Enjuague:** El objetivo es parar la acción del revelador en la película para evitar manchas y un revelado disparejo. Se utiliza generalmente agua con ácido acético o ácido acético glacial (35ml por litro de agua). Este proceso dura 2 minutos y debe ser agitado durante todo el primer minuto.
- **Fijado:** Su finalidad es eliminar toda la plata no metálica sobrante y endurecer la gelatina. Se eliminan los haluros de plata no revelados y la película adquiere un aspecto translúcido, solo dejando a la vista la zona oscura producida por la plata metálica. Es importante mantener limpio el fijador (libre de agentes contaminantes) y no dejar una diferencia de temperatura mayor a 10°C entre las temperaturas del revelador, baño de parada y fijador. En la Figura 24, se pueden observar las tres primeras fases del proceso. Al igual que el proceso de revelado, es necesario agitar los primeros 30 segundos y continuar agitando cada 1 min para evitar manchas en la película. En total, el tiempo en este proceso es de aproximadamente 15 minutos.

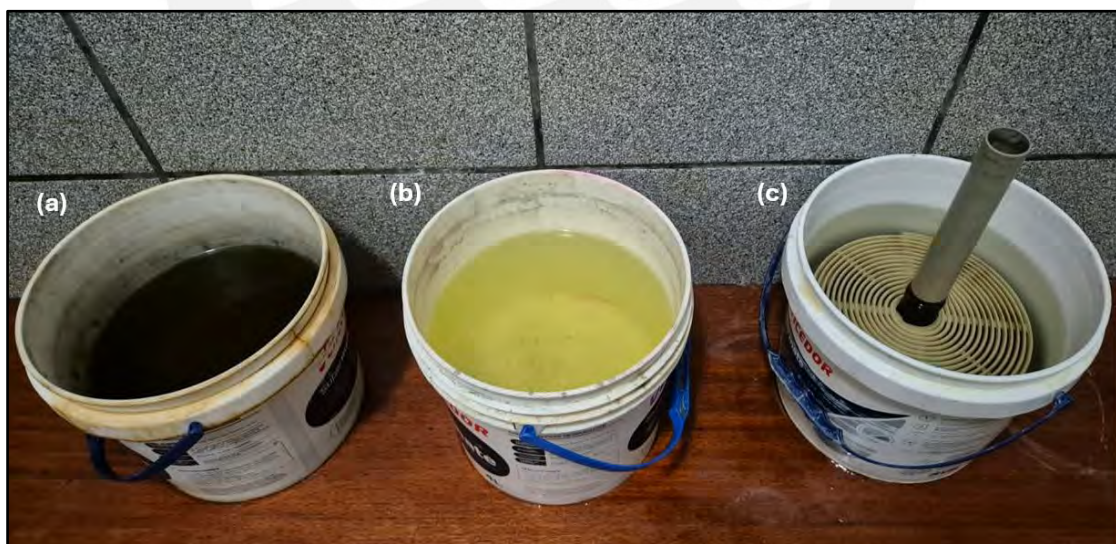


Figura 24. Fases de revelado (a)Revelado (b)Enjuague (c)Fijado

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP

- **Lavado:** En la penúltima fase, similar al proceso de enjuague intermedio, se remueve el fijador de la emulsión. Se agita la película durante un minuto en una solución de agua con

ácido acético o base similar al proceso de enjuague. La película debe exponerse a este baño de lavado durante unos 10 a 30 minutos.

- **Secado:** El último proceso debe realizarse en un ambiente libre de polvo o contaminaciones y con una corriente de aire constante, debido a que una corriente de aire desigual puede producir una deformación del acetato. Este proceso dura 24h (ver Figura 25).



Figura 25. Secado de películas

Elaboración propia. Tomado en CITEMateriales PUCP

2.6. Medición de densidad

Tras el proceso de secado, se hace uso del densitómetro para obtener los valores de densidad en los diferentes espesores de los patrones irradiados. Debido a pérdida de memoria eléctrica causada por el proceso de apagado, se debe cerar el densitómetro cada vez que se encienda (X-rite). Es por esto que antes de iniciar la operación de medición de densidad, es necesario dejar cerado el densitómetro para no obtener valores sin sentido. Se acciona la palanca hacia

abajo y se realiza un cerado en el valor de medición con el botón “NULL”. En la Figura 26, se observa el densitómetro antes y después del cerado

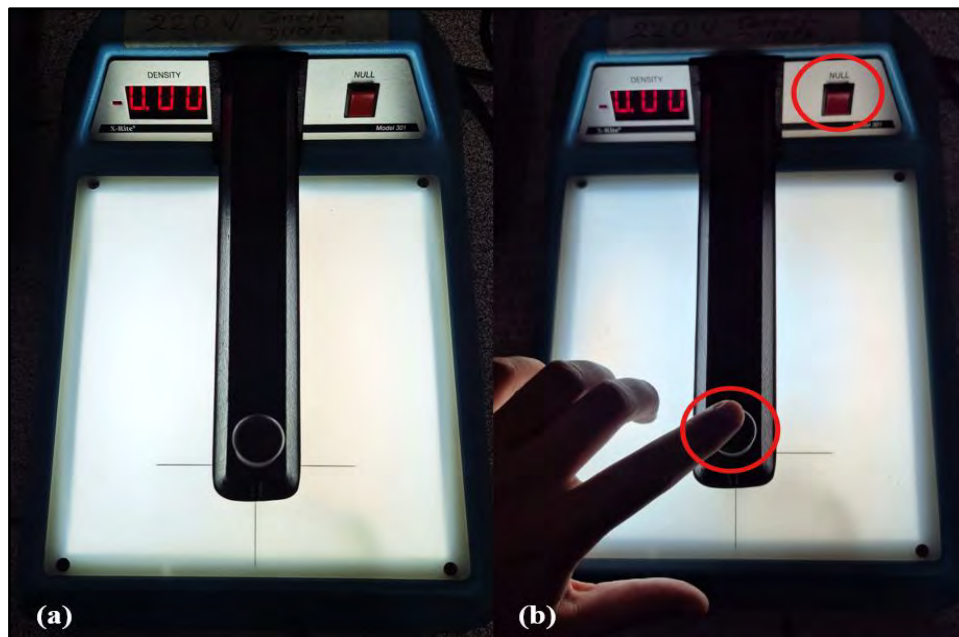


Figura 26. (a) Densitómetro no cerado (b) Densitómetro cerado

Elaboración propia. Tomado en CITEMateriales PUCP

Además, es necesario verificar la calibración del densitómetro antes usando un escalón de calibración, en el cual se debe comprobar que el densitómetro muestre un el valor del escalón “CAL” en su pantalla de lectura. De acuerdo con ASTM E1079, la densidad del densitómetro debe compararse con este escalón calibrado proporcionado por el fabricante y asegurarse de que el valor no difiera de ± 0.05 del valor mostrado en el escalón (ASTM International, 2021). El procedimiento descrito debe realizarle al menos cada 90 días, sin tomar en cuenta que reparaciones, reemplazos de partes o caída del equipo ameritan una calibración adicional. Comprobado esto, se puede empezar a medir la densidad de cada una de las películas con la luz del densitómetro encendida para poder visualizar correctamente las áreas de medición de densidad.

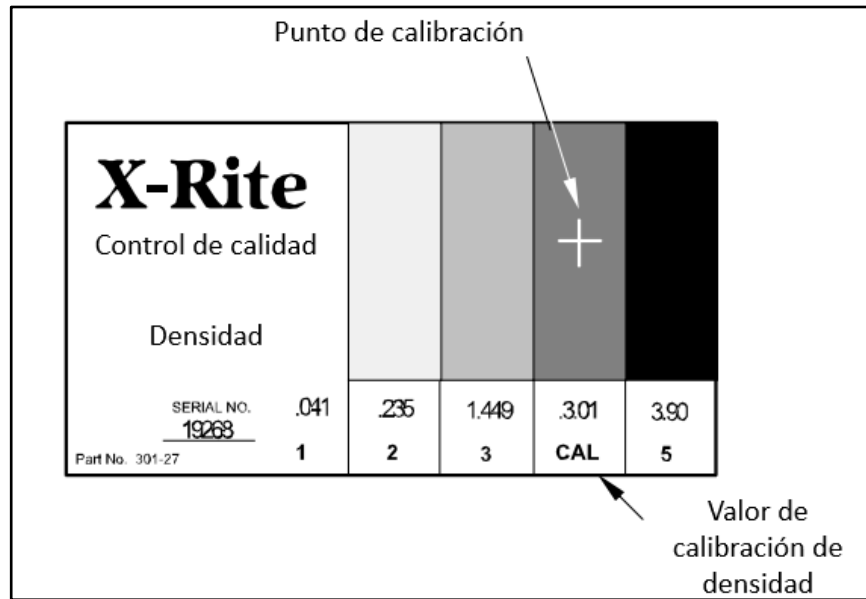


Figura 27. Escalón de calibración

Tomado de "301 Black & White Transmission Densitometer", X-rite.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el tercer capítulo se muestran los resultados del revelado de las películas y la realización de los diagramas preliminares para la construcción del diagrama de exposición. El objetivo principal de este capítulo es mostrar los datos obtenidos, elaborar los diagramas y comentar los resultados, de acuerdo con la teoría explicada en los dos primeros capítulos.

3.1. Visualización de películas reveladas

La configuración de los ensayos mostrados en la Tabla 6 contiene 6 exposiciones diferentes para los tres patrones. A continuación se muestran cinco imágenes de películas reveladas a cada exposición: a 5mA.min en la Figura 28, 10 mA.min en la Figura 29, 15mA.min en la Figura 30, 20mA.min en la Figura 31, 30mA.min en la Figura 32 y la única película revelada a 50mA.min en la Figura 33.

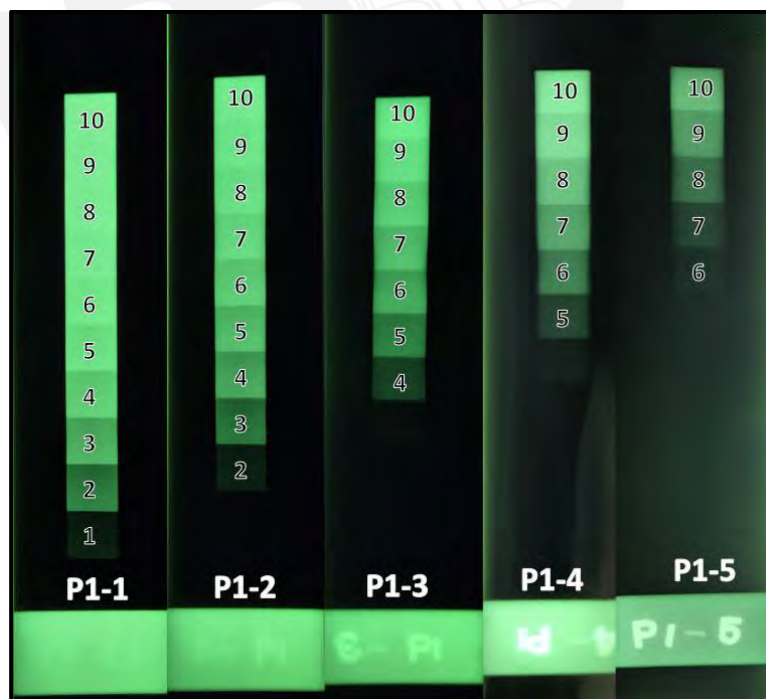


Figura 28. Películas reveladas con exposición 5mA.min

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP

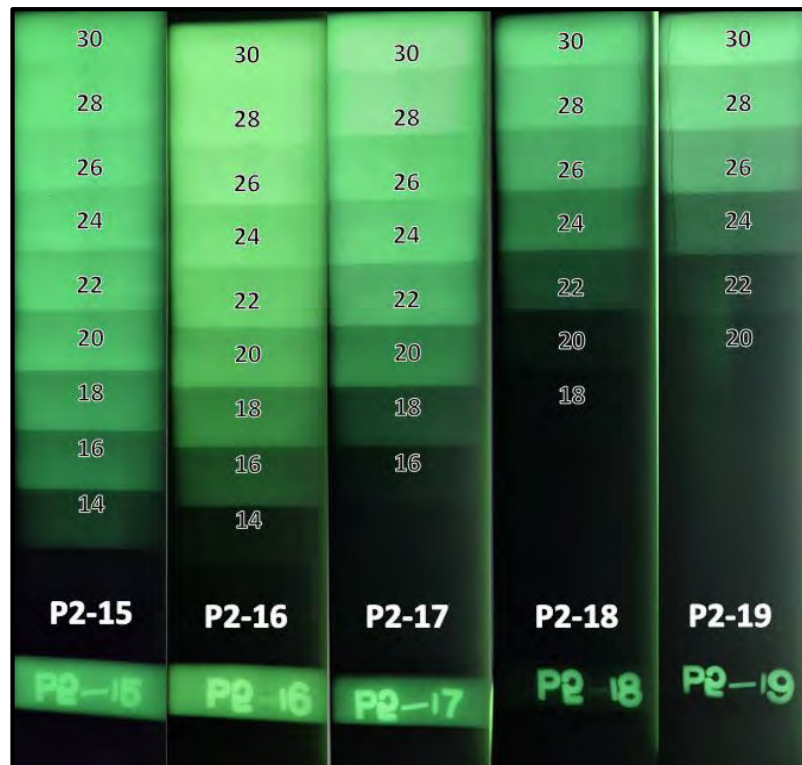


Figura 29. Películas reveladas con exposición 10mA.min

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP

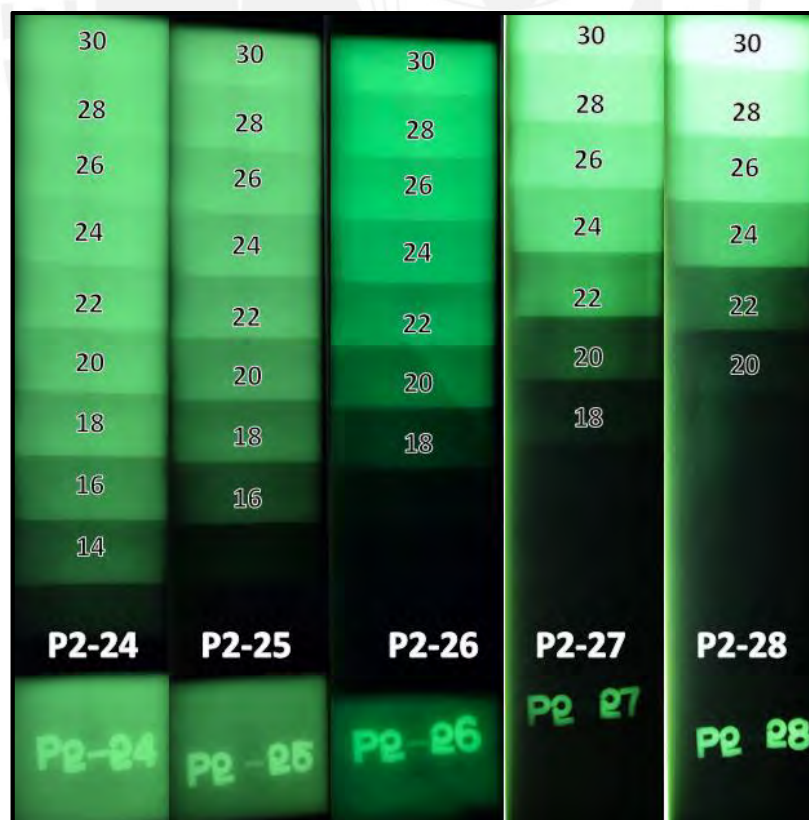


Figura 30. Películas reveladas con exposición 15mA.min

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP

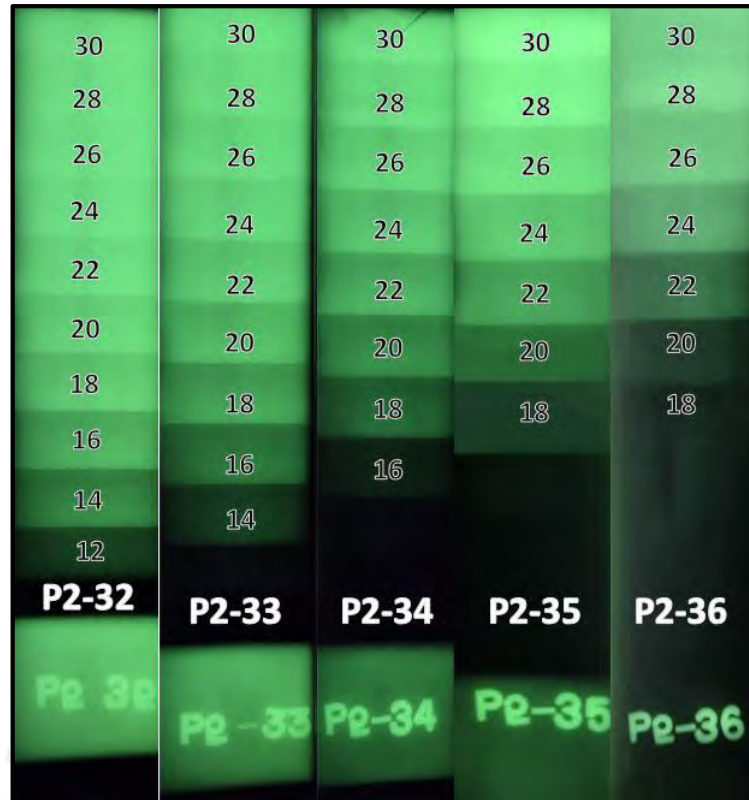


Figura 31. Películas reveladas con exposición 20mA.min

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP



Figura 32. Películas reveladas con exposición 30mA.min

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP

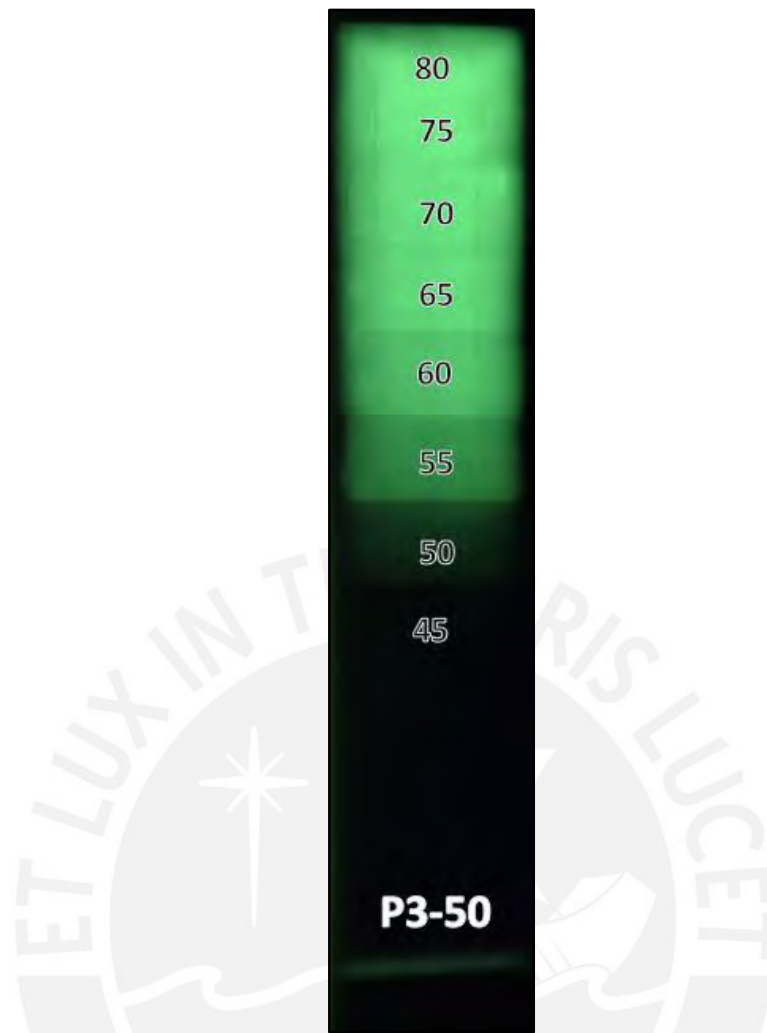


Figura 33. Película revelada con exposición 50mA.min

Elaboración propia. Tomado en CITEMateriales PUCP

Se mide la densidad para las 52 películas reveladas con el densitómetro apropiadamente cerrado y tomando valores de densidad de cada uno de los escalones de las películas. Es decir, por cada película se tienen 10 valores de densidad, obteniendo un total de 520 puntos de densidad en total. Sin embargo, en caso la densidad medida en uno de los escalones supere una densidad de 4, solo se considerará como mayor a 4 en el registro, debido a que no será útil para realizar el diagrama de exposición.

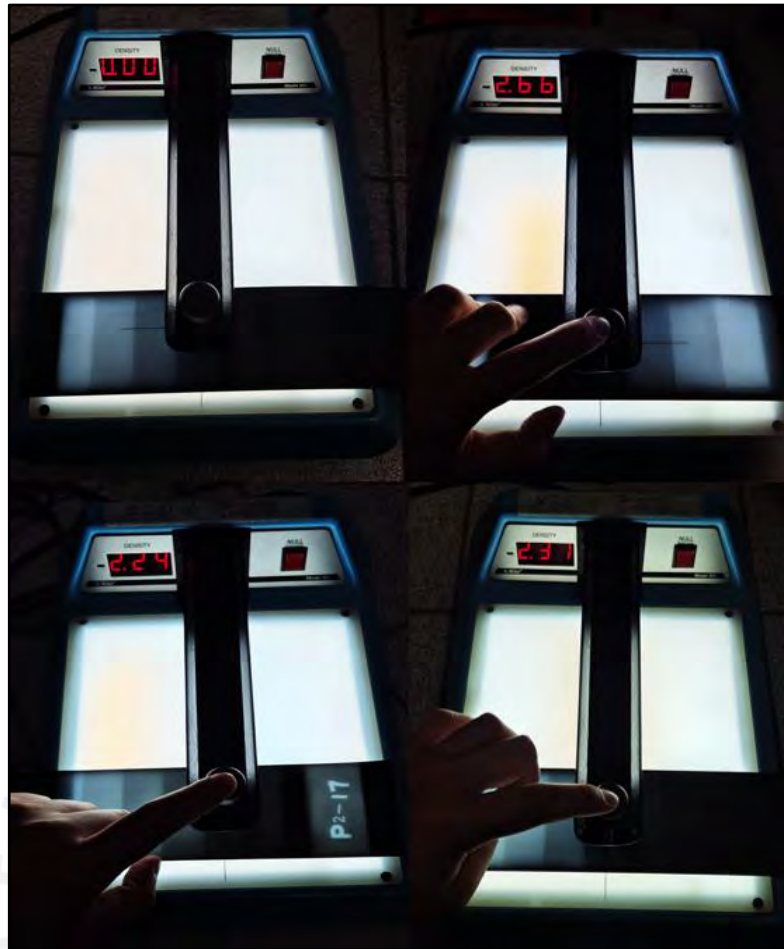


Figura 34. Medición de densidad de películas reveladas

Elaboración propia. Tomado en CITEMateriales PUCP

3.2. Diagramas preliminares

Se obtendrán dos diagramas preliminares necesarios para realizar el diagrama de exposición del acero: densidad vs espesor y tensión vs espesor.

3.2.1. Densidad vs Espesor

Se han obtenido seis gráficos de densidad vs espesor, agrupados por exposición (5, 10, 15, 20, 30 y 50 mA.min), las curvas en este gráfico están diferenciadas por la densidad aplicada en el momento del ensayo. A continuación, se muestran los gráficos y se comentan los datos obtenidos:

En el diagrama de 5mA.min (Figura 35), se visualizan curvas para todos los voltajes. Se visualiza un cambio desde el espesor de 10 mm, debido a que se cambia de patrón I a II.

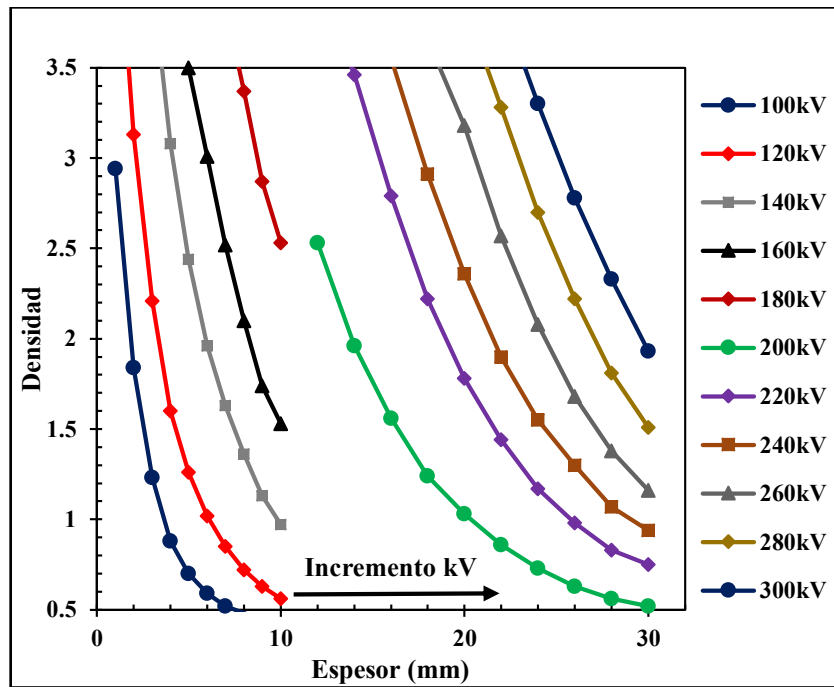


Figura 35. Densidad vs Espesor a 5mA.min

Elaboración propia

El diagrama de 10mA.min todos los puntos cruzan la línea horizontal de densidad 2.5.

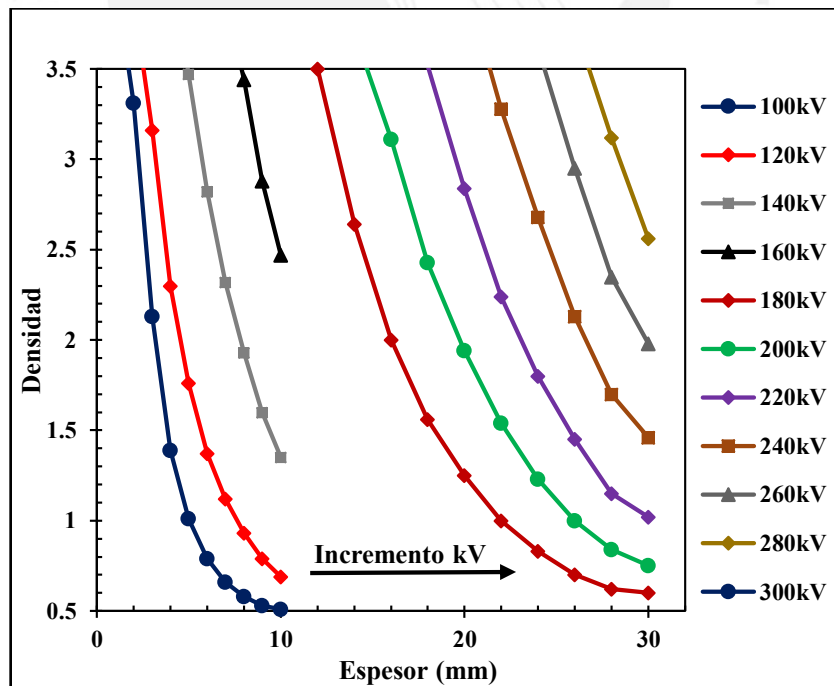


Figura 36. Densidad vs Espesor a 10mA.min

Elaboración propia

En el diagrama de 15mA.min, el voltaje de 260kV alcanza un valor mínimo de 2.85 en densidad, por lo que se obtiene una excepción de cruce en este punto.

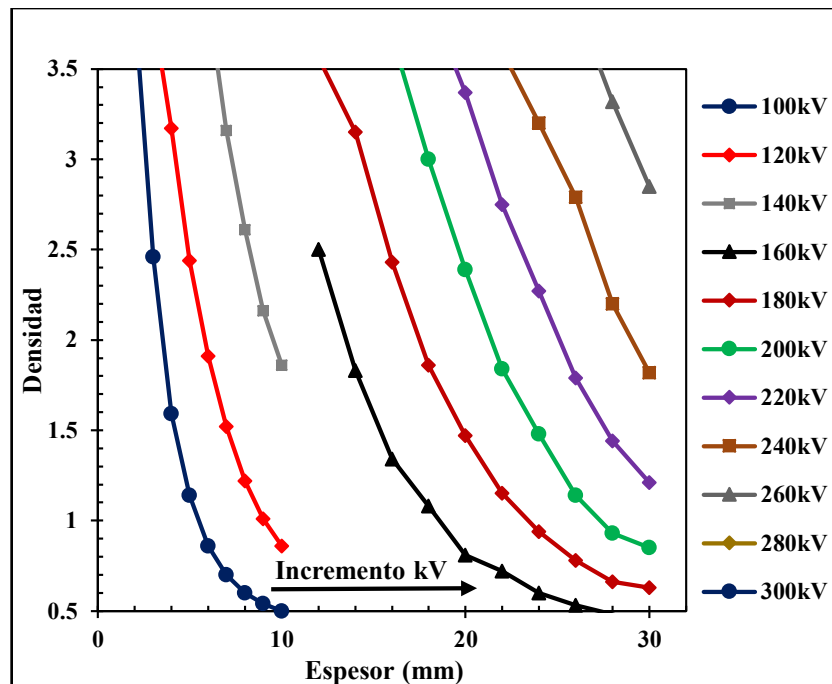


Figura 37. Densidad vs Espesor a 15mA.min

Elaboración propia

En el diagrama de 20mA.min, se comienza el diagrama desde el Patrón II. En este diagrama se obtienen dos curvas sin cruce: 140 y 260 kV.

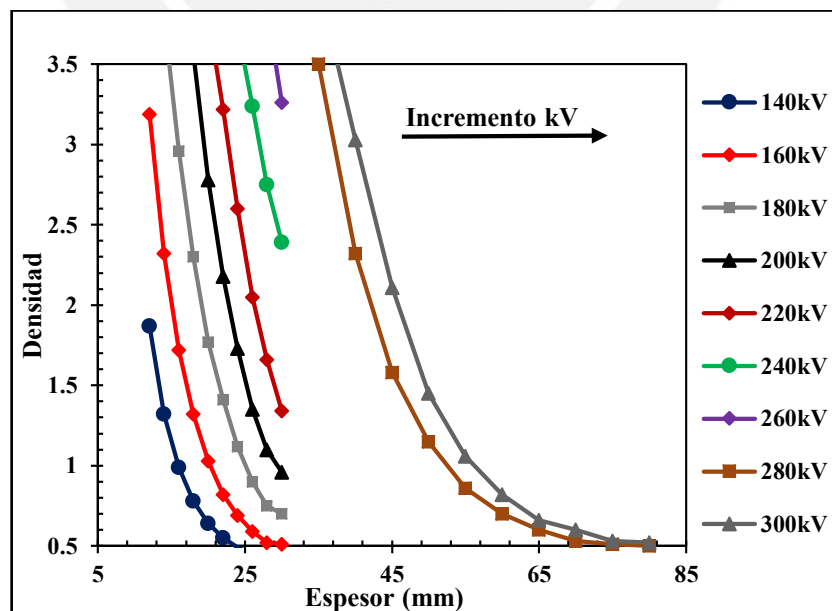


Figura 38. Densidad vs Espesor a 20mA.min

Elaboración propia

En el diagrama de 30mA.min, dos curvas no cruzan la línea de densidad 2.5: 140 kV y 240kV. Se observa como la misma tendencia que en los diagramas anteriores.

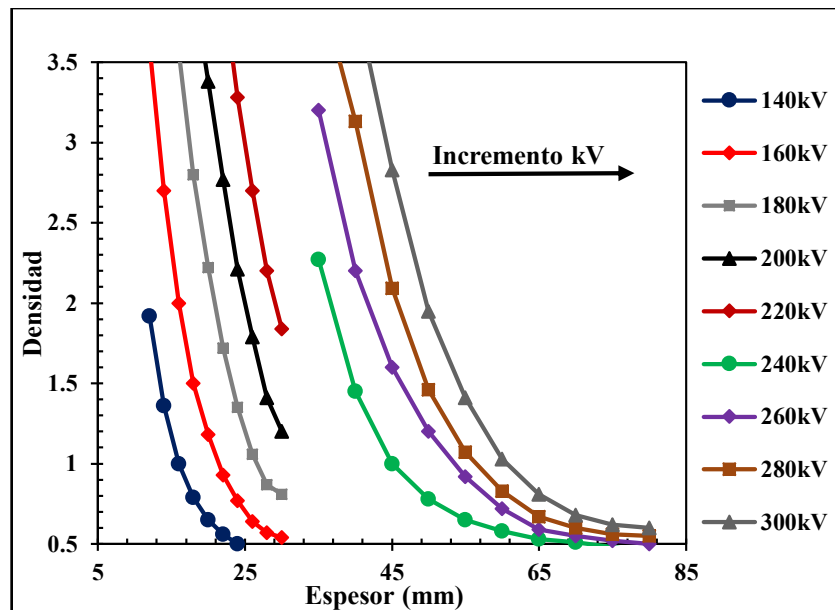


Figura 39. Densidad vs Espesor a 30mA.min

Elaboración propia

Finalmente, en el último diagrama de densidad vs espesor, solo se obtuvo una curva a 300 kV (tensión máxima), de acuerdo con las restricciones de tiempo explicadas en el Capítulo II.

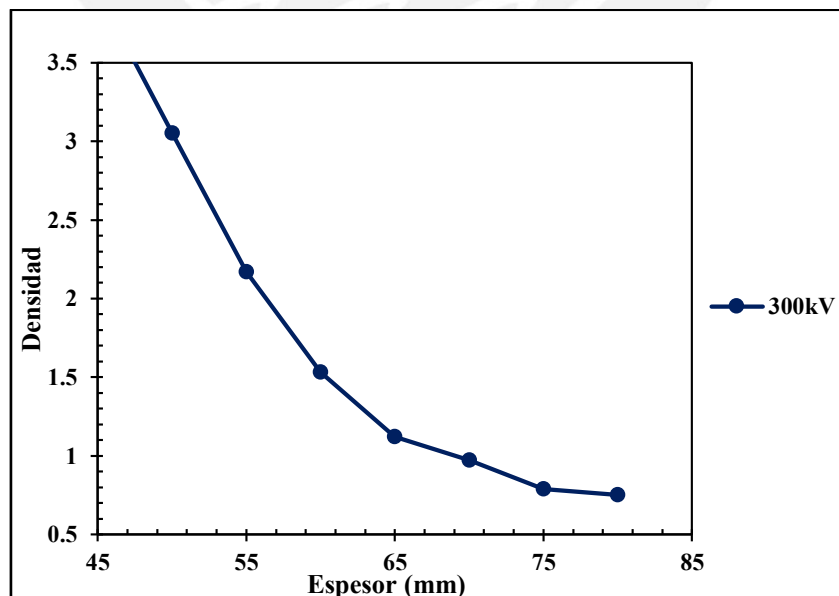


Figura 40. Densidad vs Espesor a 50mA.min

Elaboración propia

3.2.2. Tensión vs Espesor

Para la elaboración del diagrama de tensión vs espesor, se selecciona la densidad de 2.5 como base para su construcción. A continuación, se interceptan todas las curvas con esta densidad y se obtienen los valores de espesor para cada curva de tensión, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores de espesor a densidad 2.5

Tensión (kV)	Exposición (mA.min)					
	5	10	15	20	30	50
100	1.40	2.68	2.97			
120	2.68	3.77	4.92			
140	4.91	6.64	8.24			
160	7.05	9.93	12.00	13.59	14.68	
180	10.37	14.44	15.81	17.39	19.03	
200	12.11	17.79	19.64	20.93	22.96	
220	17.02	21.13	23.04	24.36	26.80	
240	19.49	24.65	26.98	29.32	-	
260	22.29	27.50	-	-	38.50	
280	24.83	30.17	36.88	39.24	43.03	
300	27.24	35.90	39.16	42.88	46.88	53.13

Nota. Elaboración propia

Para los cinco puntos sin cruce en la densidad de 2.5, se extienden las curvas en la misma tendencia y se obtienen los puntos de cruce en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de espesor proyectados a densidad 2.5

Tensión (kV)	Exposición (mA.min)					
	5	10	15	20	30	50
100	1.40	2.68	2.97			
120	2.68	3.77	4.92			
140	4.91	6.64	8.24	9.67	10.08	
160	7.05	9.93	12.00	13.59	14.68	
180	10.37	14.44	15.81	17.39	19.03	
200	12.11	17.79	19.64	20.93	22.96	
220	17.02	21.13	23.04	24.36	26.80	
240	19.49	24.65	26.98	29.32	33.24	
260	22.29	27.50	31.30	33.88	38.50	
280	24.83	30.17	36.88	39.24	43.03	
300	27.24	35.90	39.16	42.88	46.88	53.13

Nota. Elaboración propia

De la Tabla 13, se obtiene la Figura 41. Para el rango de espesores y voltajes mostrados, a partir de 120kV a 300kV se tiene una tendencia casi completamente lineal para la gráfica de tensión vs espesor. Como observación adicional, si bien solo se obtuvo un punto para la exposición de 50mA.min, este será de gran utilidad para la elaboración del diagrama de exposición, ya que nos proporciona un dato extra que nos ayudará a establecer una tendencia para la curva de 300kV.

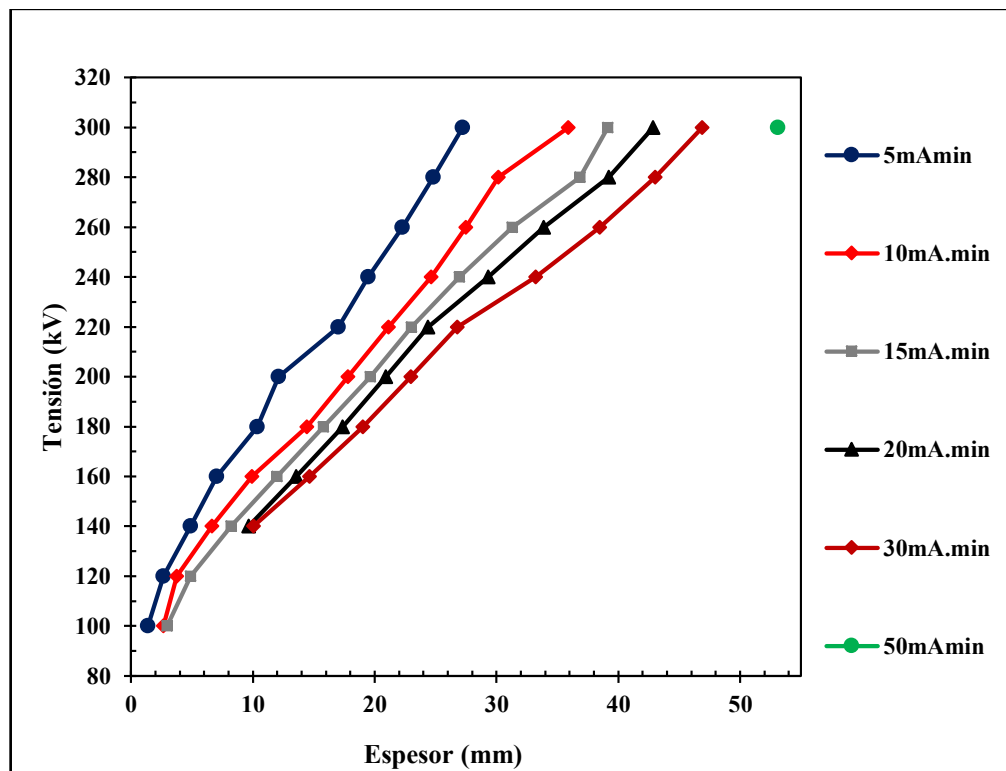
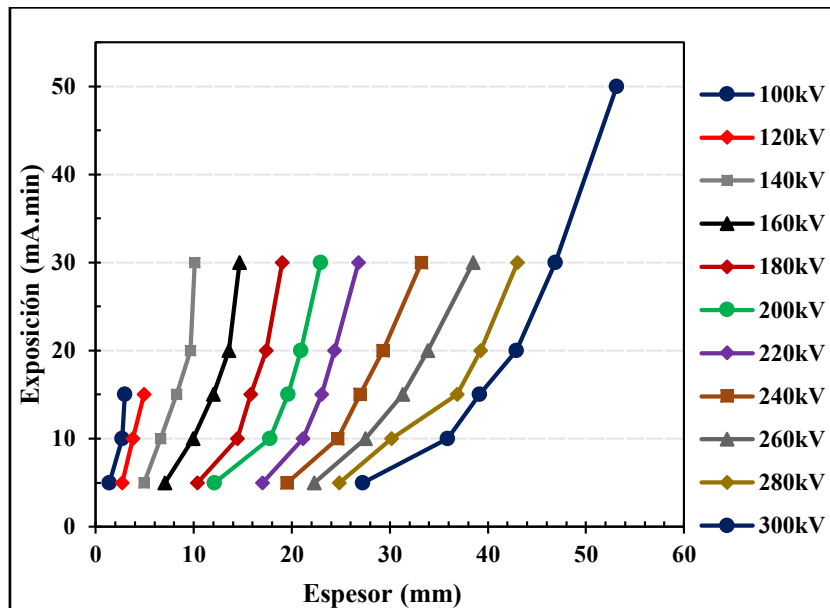


Figura 41. Tensión vs Espesor a densidad 2.5

Elaboración propia

3.3. Diagrama de exposición

A partir de la Figura 41, es posible establecer un diagrama de exposición preliminar con los datos obtenidos. La Figura 42 muestra la distribución de las curvas en un diagrama de espesor vs exposición. La tendencia de las curvas es exponencial y es posible aplicar una escala logarítmica. Observar la Figura 43, tras aplicar un ajuste logarítmico la tendencia de las curvas es visualmente lineal. Se ha prescindido del punto a 200kV y 5mA.min, debido a que representa un valor anómalo en la tendencia de las curvas.



estas consideraciones, se presenta el diagrama de exposición final para el acero en la Figura 44. Adicionalmente, se ha diferenciado por medio de líneas discontinuas los voltajes que no se encuentran a amperaje de 5mA. Para la visualización del diagrama a detalle, dirigirse al Anexo II.

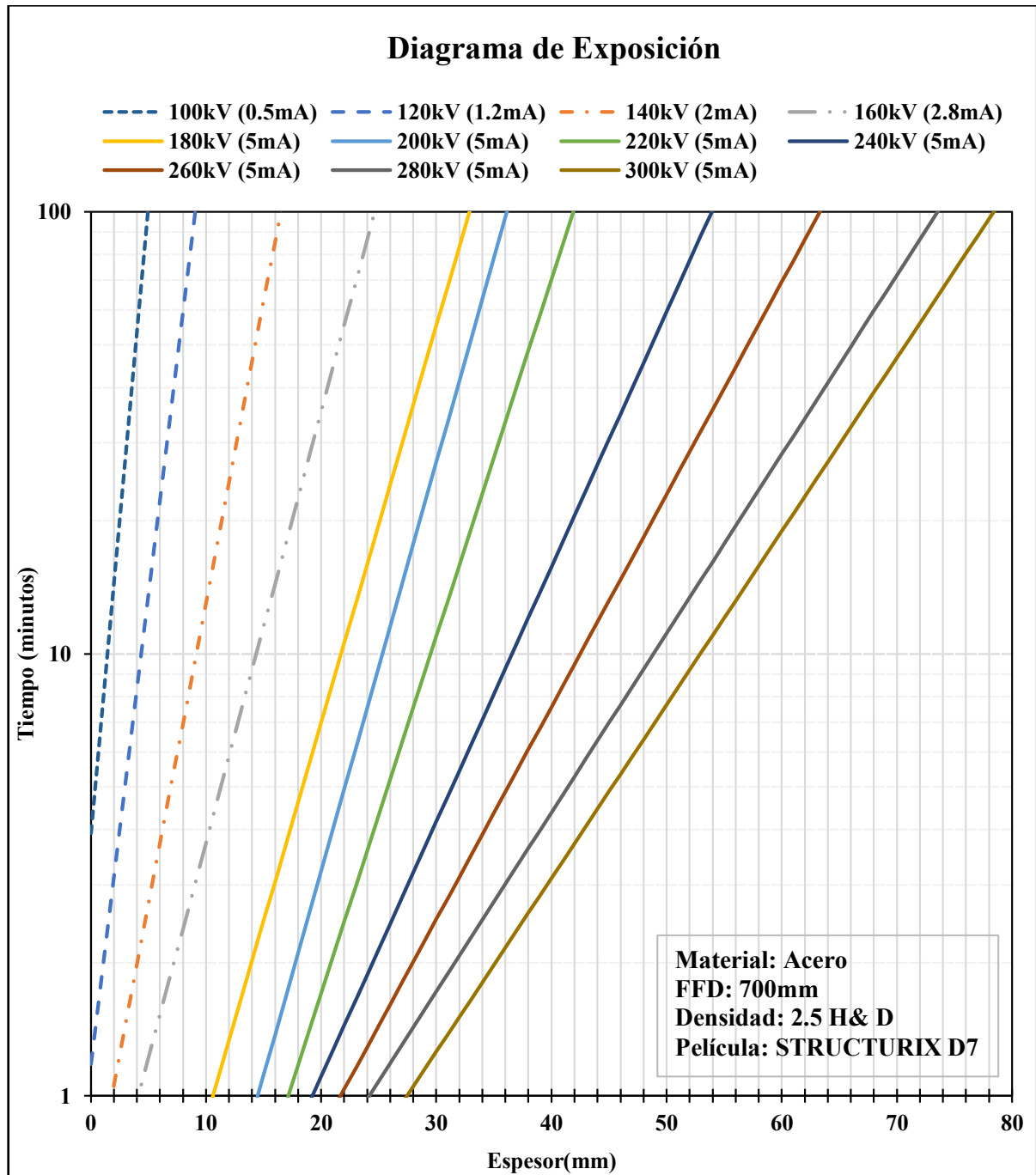


Figura 44. Diagrama de exposición para el acero a densidad 2.5

Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4. DESARROLLO DE APLICATIVO

En el último capítulo se aplicarán los datos obtenidos en el capítulo previo para el desarrollo de un aplicativo que permita a los usuarios del equipo de rayos X calcular el tiempo de exposición con un método rápido e interactivo. En adición, se aplicarán factores de corrección de materiales para poder ampliar el rango de aplicación del aplicativo. Finalmente, se mostrará el entorno del aplicativo, modo de uso y una verificación experimental de su eficacia de uso para laboratorio.

4.1. Corrección de diagramas para otros metales

El material base para los cálculos previos fue el acero. Sin embargo, de requerirse calcular los tiempos de exposición en otros metales, es posible hacerlo aplicando factores radiográficos equivalentes (FRE).

En la Tabla 14, se puede observar la tabla con FRE, donde el material base para voltajes de 50 y 100kV es el aluminio, mientras que de 150 a 400 kV es el acero. En este sentido, el material base tiene un FRE de 1. Cabe aclarar que los factores mostrados en la tabla son aproximados, pero suficientemente sólidos para poder establecer una técnica que permita al usuario aproximar el tiempo de exposición para otro material.

Por ejemplo, para calcular el tiempo de exposición y técnica para el aluminio a 220kV de 5 mm de espesor, se busca en la tabla el voltaje y el material, con lo que se obtiene un FRE de 0.18. A continuación, se procede a multiplicar 0.18 por 5 mm, correspondiente al espesor del aluminio, con lo que se obtiene 0.9 mm, espesor equivalente de acero. Es decir, se puede emplear una técnica equivalente usada el acero de 0.9 mm a 200kV.

Tabla 14. Factores radiográficos equivalentes

Material	Voltaje				
	50 Kv	100 kV	150 kV	220 kV	400 kV
Magnesio	0.6	0.6	0.5	0.08	
Aluminio	1	1	0.12	0.18	
Aleación de aluminio	2.2	1.6	0.16	0.22	
Titanio			0.45	0.35	
Acero		12	1	1	1
18-8 (Acero) aleación		12	1	1	1
Cobre		18	1.6	1.4	1.4
Zinc			1.4	1.3	1.3
Latón			1.4	1.3	1.3
Zirconio			2.3	2	
Plomo			14	12	
Uranio				25	

Nota. Tomado de “E94 Standard Guide for Radiographic Examination using Standard Radiographic Film”, ASTM, 2022

Con este ejemplo, es posible utilizar los datos de la Figura 44, correspondientes al diagrama de exposición del acero, y los FRE de la Tabla 14 para crear un diagrama de exposición equivalente para el aluminio. Para esto, se tomarán en cuenta las ecuaciones de las curvas de 100, 150 y 220kV para el acero, pues se cuenta con los FRE para estos voltajes. El valor de 150kV será calculado preliminarmente mediante una interpolación lineal de las curvas de 140 y 160 kV.

El diagrama de exposición preliminar para el aluminio a una densidad de 2.5 y con los parámetros usados para el acero, se muestra en la Figura 45. Como se puede observar, el eje Y, correspondiente al tiempo, se ha colocado en segundos, debido a que el aluminio requiere de menor tiempo de exposición que el acero para poder alcanzar la densidad objetivo de 2.5.

Se aclara que este es un diagrama preliminar, debido a que será necesaria realizar una corrección experimental del diagrama de aluminio posteriormente, debido a que una

interpolación lineal entre voltajes de amperajes diferentes (caso de voltaje 150kV) no garantiza un valor demasiado certero.

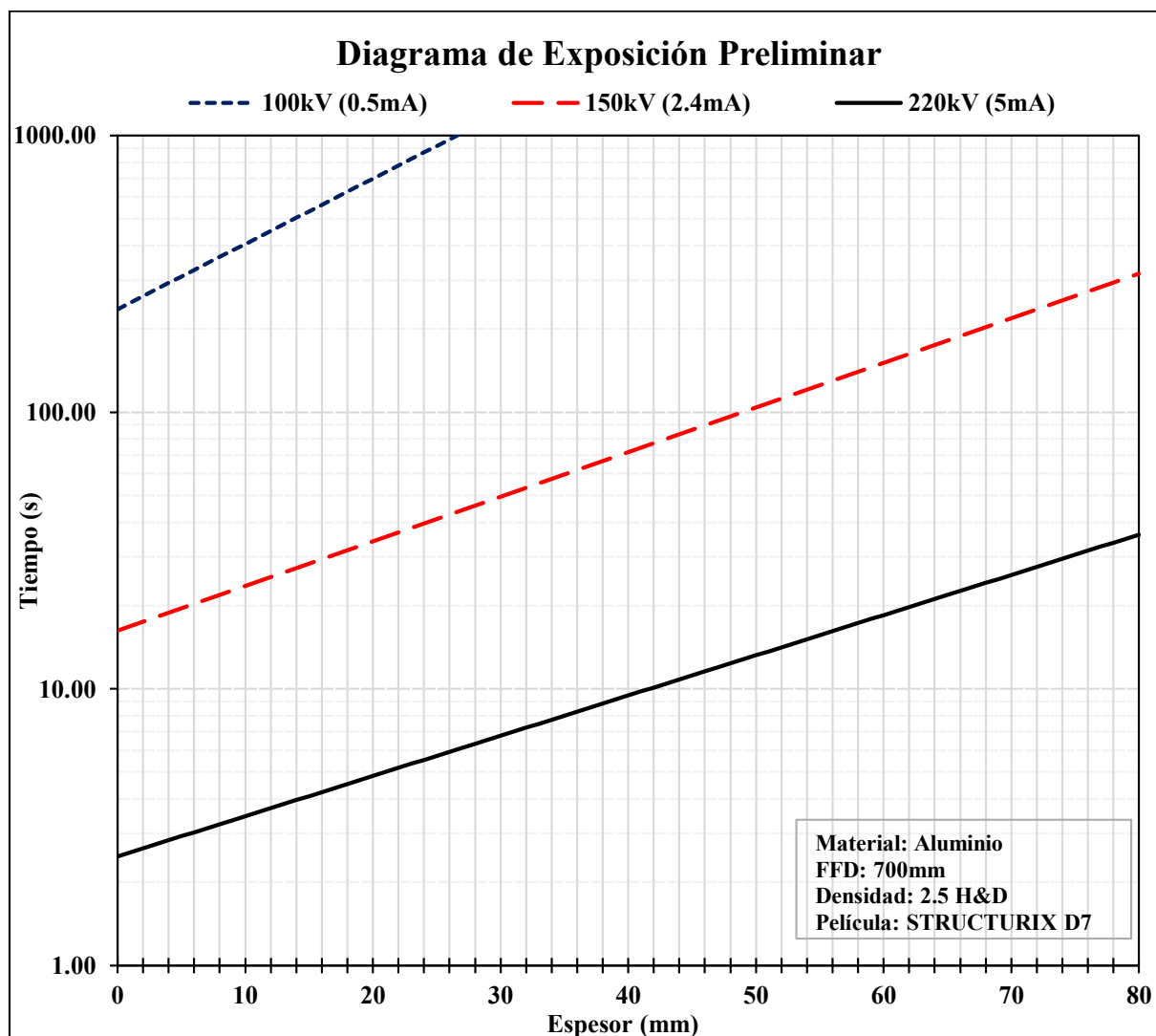


Figura 45. Diagrama de exposición preliminar para el aluminio a densidad 2.5
Elaboración propia

4.2. Factor de corrección película

La película utilizada en los ensayos realizados fue STRUCTURIX D7. En caso se desee cambiar de película por decisión del usuario, es posible corregir estos valores con los factores de corrección proporcionados por la ficha técnica de STRCTURIX, los cuales se muestran en la Tabla 15.

El detalle de cada una de las películas STRUCTURIX mencionadas en la tabla, así como sus diferentes aplicaciones dependiendo de las condiciones requeridas, se proporcionó en el Capítulo 1.4.5

Tabla 15. *Factor de corrección por película STRUCTURIX*

Tipo	Voltaje (kV)	
	100	200
D2	9	7
D3	4.1	4.3
D4	3	2.7
D5	1.7	1.5
D7	1	1
D8	0.6	0.65

Nota. Elaboración propia

4.3. Factor de corrección por distancia

En base a la ley de inversa al cuadrado, explicada a detalle en el Capítulo 1.3.4, se genera la Tabla 16. Los ensayos fueron realizados a una distancia de 700 mm, por lo que el factor de referencia se toma desde esta distancia y en base a este se multiplican los factores dependiendo de la variación de la distancia.

Tabla 16. *Factor de corrección por distancia*

Distancia fuente-película (mm)	Factor
350	0.25
500	0.5
700	1
1000	2
1400	4

Nota. Elaboración propia


4.4. Interfaz de usuario de aplicativo

Para diseñar el aplicativo, se debe tener en cuenta la facilidad de manejo para el usuario, los datos de entrada requeridos y el resultado final que será mostrado. Respecto al primer punto, el objetivo es presentar una aplicación que permita ser interactiva en cuanto al ingreso de datos, ya sea mediante selección de parámetros o ingreso de datos manualmente. En la Figura 46, se muestra el entorno principal diseñado para el aplicativo. Se ha colocado el título

principal y el logo identificador de la PUCP. La selección de datos se realiza mediante tres métodos: escoger una opción mediante un botón circular, seleccionar datos de una lista de rangos predeterminados e ingresar un valor dentro de un rango específico.

Tiempo de Exposición

Tiempo de exposición



Equipo de Rayos X

Seleccione el material

Acero
 Aluminio

Seleccione el voltaje (kV)

Amperaje de trabajo (mA)

Espesor de la pieza (mm)

Distancia de la fuente a la pieza (mm)

700

Tipo de película

D7

Calcular tiempo

Figura 46. Entorno del aplicativo

Elaboración propia

4.5. Datos de entrada

La aplicación permite la entrada de los principales parámetros requeridos por el usuario del generador de Rayos X, tales como el material, voltaje, espesor, distancia de la fuente a la película y el tipo de película. A continuación, se indicarán los detalles de selección de cada uno de ellos:

- **Material:** Mediante selección simple, podrá elegir entre acero y aluminio
- **Voltaje:** Al seleccionar como material al acero, se desplegará la lista de voltajes mostrada en la Tabla 17.

Tabla 17. Lista de voltajes seleccionables para el acero en aplicación

Voltaje (kV)	Amperaje (mA)
100	0.5
120	1.2
140	2
150	2.4
160	2.8
180	5
190	5
200	5
210	5
220	5
230	5
240	5
250	5
260	5
270	5
280	5
290	5
300	5

Nota. Elaboración propia

Se adiciona el voltaje de 150kV, debido a que se requiere realizar una comprobación de este para el aluminio.

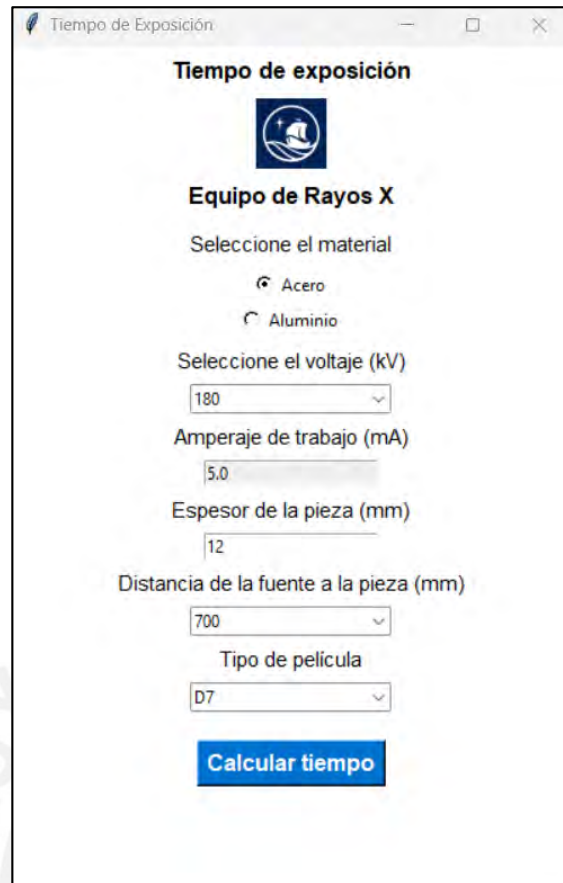
Por otro lado, si se selecciona aluminio, se muestra una lista seleccionable de 100, 150 y 220kV, tal como se observa en la Tabla 18

Tabla 18. Lista de voltajes seleccionables para el aluminio en la aplicación

Voltaje (kV)	Amperaje (mA)
100	0.5
150	2.4
220	5


Nota. Elaboración propia

- **Amperaje de trabajo:** Teniendo en cuenta en amperaje de trabajo máximo permitido por el equipo de rayos X, este parámetro se autocompleta al seleccionar el voltaje. En la Tabla 3, se puede observar el detalle de este punto.
- **Espesor de la pieza:** El usuario puede digitar en este punto el espesor de la pieza que está ensayando. Sin embargo, de colocarse valores menores a 0 o mayores 80 mm, aparecerá una alerta que pedirá volver a ingresar un valor permitido dentro del rango (Figura 48). Asimismo, de ingresarse valores no numéricos se mostrará el error observado en la Figura 49.
- **Distancia fuente película:** variación de la distancia a 350, 500, 700, 1000 y 1400 mm. El usuario podrá regular la altura del tubo de rayos X a la película entre esta distancia, como se explicó previamente de la Tabla 16.
- **Tipo de película:** La lista de películas seleccionables se mostró en la Tabla 15, todas estas pertenecen a la categoría STRUCTURIX y se puede elegir entre 6 distintos tipos de películas.



Tiempo de Exposición

Tiempo de exposición



Equipo de Rayos X

Seleccione el material

Acero
 Aluminio

Seleccione el voltaje (kV)

180

Amperaje de trabajo (mA)

5.0

Espesor de la pieza (mm)

12

Distancia de la fuente a la pieza (mm)

700

Tipo de película

D7

Calcular tiempo

Figura 47. Datos de entrada

Nota. Elaboración propia

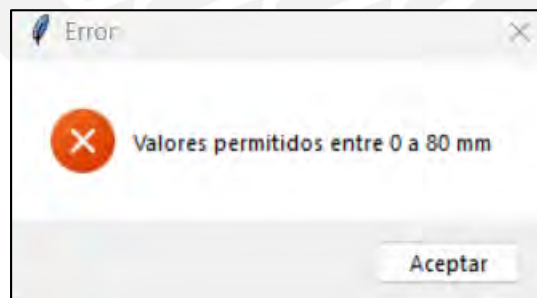


Figura 48. Error de entrada en valores permitidos de espesor

Nota. Elaboración propia

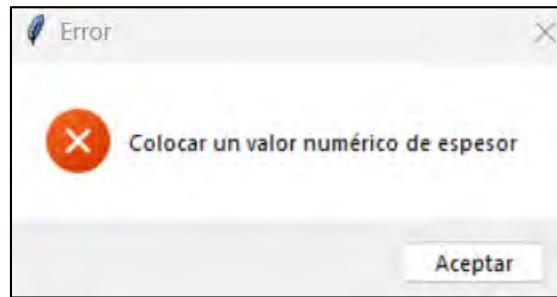


Figura 49. Error de valor de entrada no numérico en espesor

Nota. Elaboración propia

4.6. Datos de Salida

Tras presionar el botón de calcular tiempo, se desplegará la pantalla de resultado. El tiempo de exposición aparecerá expresado en minutos y segundos para mayor facilidad de ingreso de datos al controlador físico del equipo de Rayos X. Además, se presenta un gráfico didáctico para que el usuario pueda observar los valores ingresados tanto de manera geométrica como en forma de lista, esto a modo de comprobación que los datos ingresados correspondan a los que requiere para la radiografía. Tener en cuenta que el generador solo permite valores entre 10 segundos a 90 minutos, por lo que valores fuera de este rango se mostrará un mensaje de error “Fuera de rango operacional” (Figura 50).

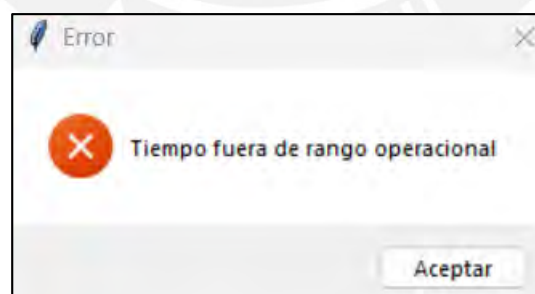


Figura 50. Tiempo de exposición fuera de rango operacional

Nota. Elaboración propia

Finalmente, se indica la densidad que se estaría obteniendo al seguir la técnica seleccionada, la cual corresponderá a 2.5. Para volver a ingresar nuevos datos, se presiona el botón de “Regresar” y se volverá a la pantalla de inicio (Figura 51).

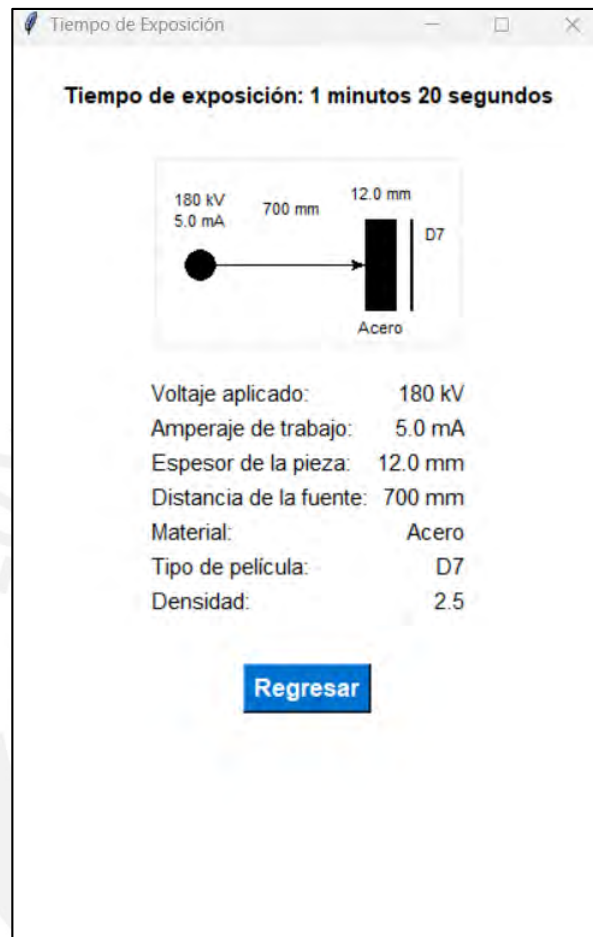


Figura 51. Datos de salida
Nota. Elaboración propia

4.7. Validación de uso

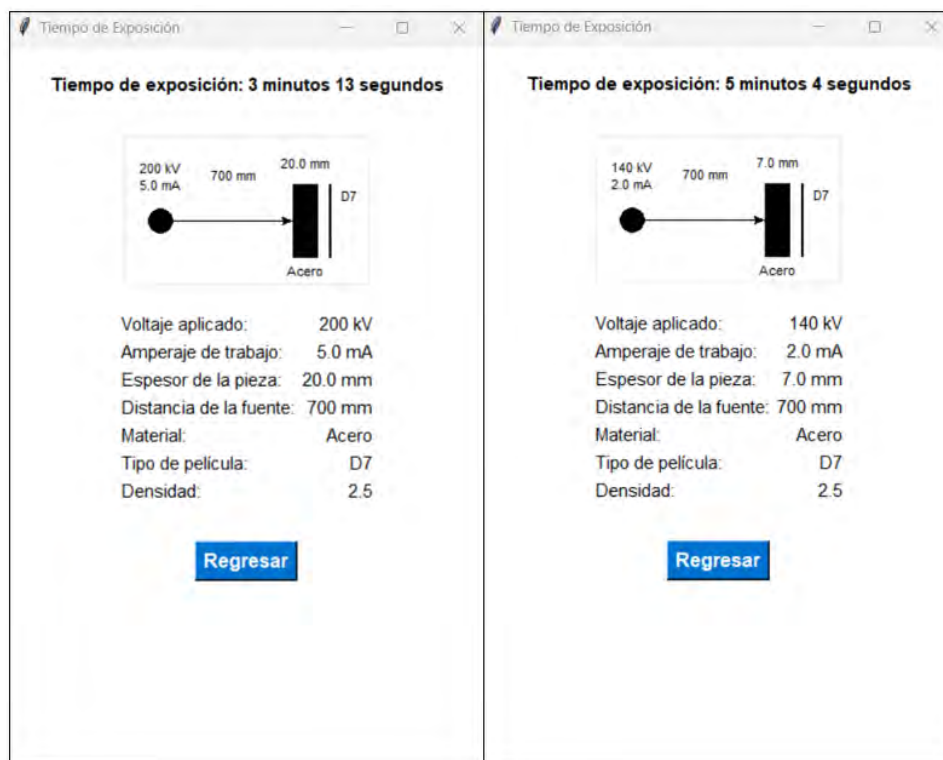
Es fundamental verificar que los valores mostrados por la aplicación son cercanos a la realidad. Para esto, se realizarán ensayos de comprobación que verifiquen la funcionalidad de la aplicación.

La primera parte verificará voltajes ensayados con el acero. En la Tabla 19 se muestran los ensayos para esta sección inicial. Se ensayarán dos películas a 140 y 200 kV, utilizando los patrones escalonados. En la Figura 52 se muestra el cálculo del tiempo en la aplicación.

Tabla 19. *Ensayos de comprobación para acero con voltajes ensayados*

Acero			
Espesor objetivo (mm)	Voltaje (kV)	Tiempo (' ")	Amperaje (mA)
7	140	5'4"	2
20	200	3'13"	5

Nota. Elaboración propia

**Figura 52.** *Tiempos de exposición para voltajes ensayados en acero*

Nota. Elaboración propia

La segunda parte de los ensayos validará voltajes no ensayados con el acero. En la Tabla 20, se muestran tres ensayos planeados para comprobar voltajes no seleccionados en el diseño de ensayos inicial, los cuales son 150 y 250 kV. El tiempo calculado se colocó usando la aplicación desarrollada (Figura 53). En este caso, se está comprobando los voltajes intermedios con todos los patrones (I, II y III).

Tabla 20. *Ensayos de comprobación para acero con voltajes no ensayados*

Acero			
Espesor objetivo (mm)	Voltaje (kV)	Tiempo (' ")	Amperaje (mA)
6	150	2'33"	2.4
26	250	2'1"	5

Nota. Elaboración propia

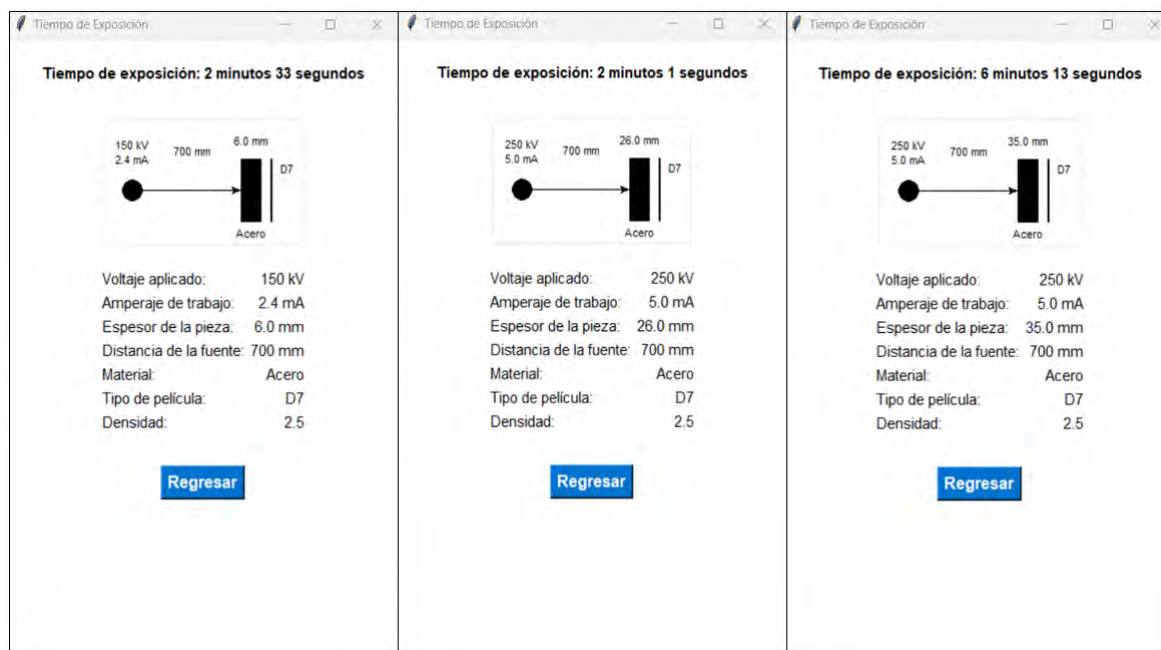


Figura 53. Tiempos de exposición para voltajes no ensayados en acero

Nota. Elaboración propia

La tercera parte tendrá como objetivo verificar los valores de tiempo mostrados en el diagrama de exposición del aluminio. En la Tabla 21, se muestra el planeamiento de ensayos para este material. Se realizarán dos ensayos para voltajes 100 y 150 kV. Además, en la Figura 54 se presenta la disposición de las muestras de aluminio para estos ensayos.

Los tiempos mostrados en la Tabla 21 fueron extraídos de los resultados del aplicativo, como se observa en la Figura 55.

Tabla 21. Ensayos de comprobación para aluminio

Aluminio			
Espesor (mm)	Voltaje (kV)	Tiempo (' ")	Amperaje (mA)
11.6	100	7'22"	0.5
44.6	150	1'25"	2.4

Nota. Elaboración propia

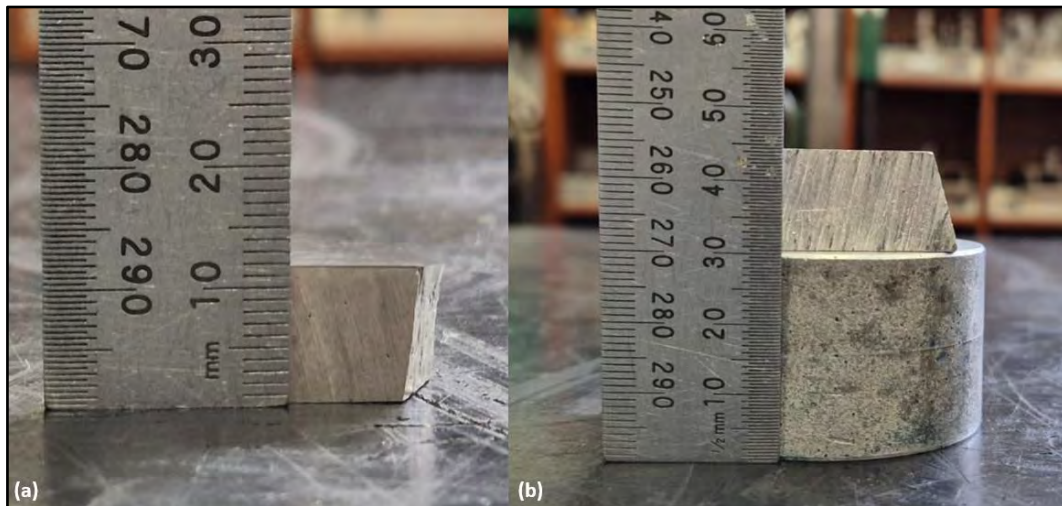


Figura 54. Muestra de aluminio de (a) 11.6 mm (b) 44.6 mm

Elaboración propia Tomado en CITE materiales PUCP

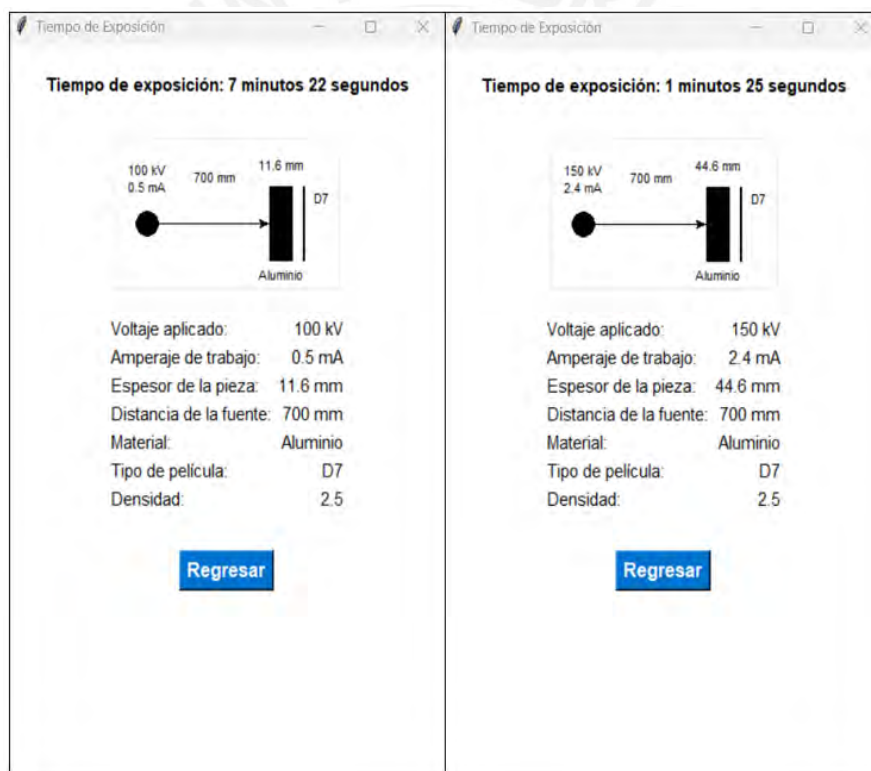


Figura 55. Tiempos para ensayos de comprobación del aluminio a 100 y 150 Kv

Elaboración propia.

Se procede a realizar los ensayos siguiendo las mismas recomendaciones y procedimientos mencionados en el Capítulo II. En Figura 56 se muestran las películas reveladas para los ensayos de comprobación para todos los ensayos, observadas con ayuda del negatoscopio.

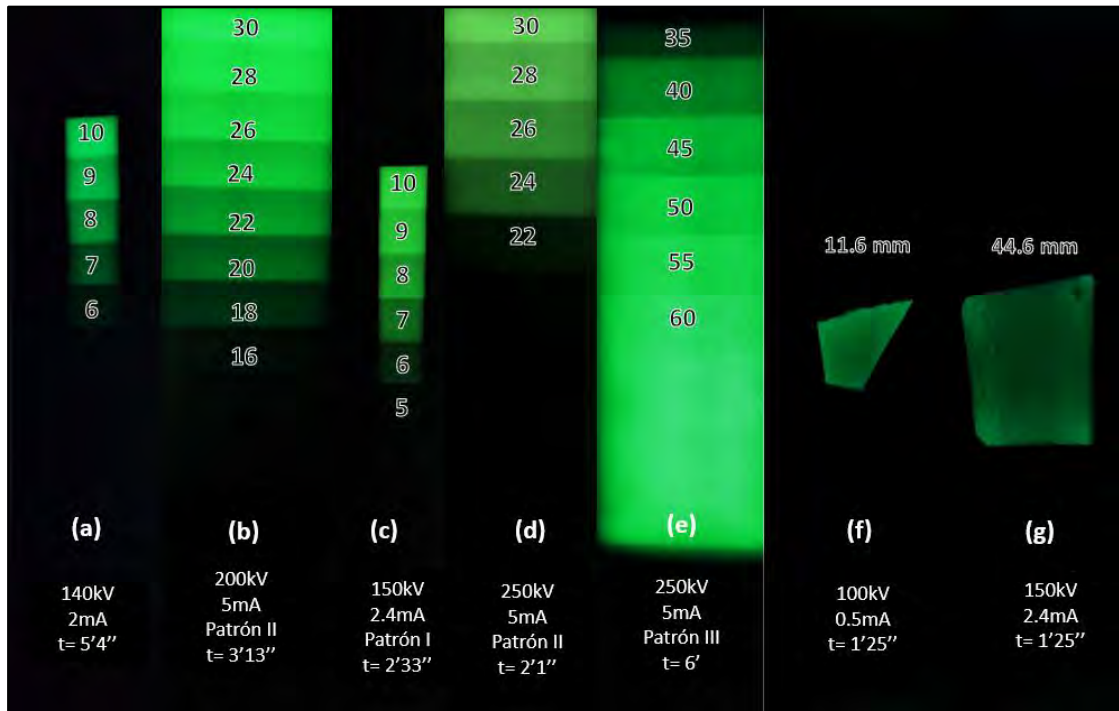


Figura 56. Películas de comprobación reveladas
Elaboración propia Tomado en CITE materiales PUCP

Se muestran las Figura 57 y Figura 58 con los gráficos de densidad vs espesor para acero.

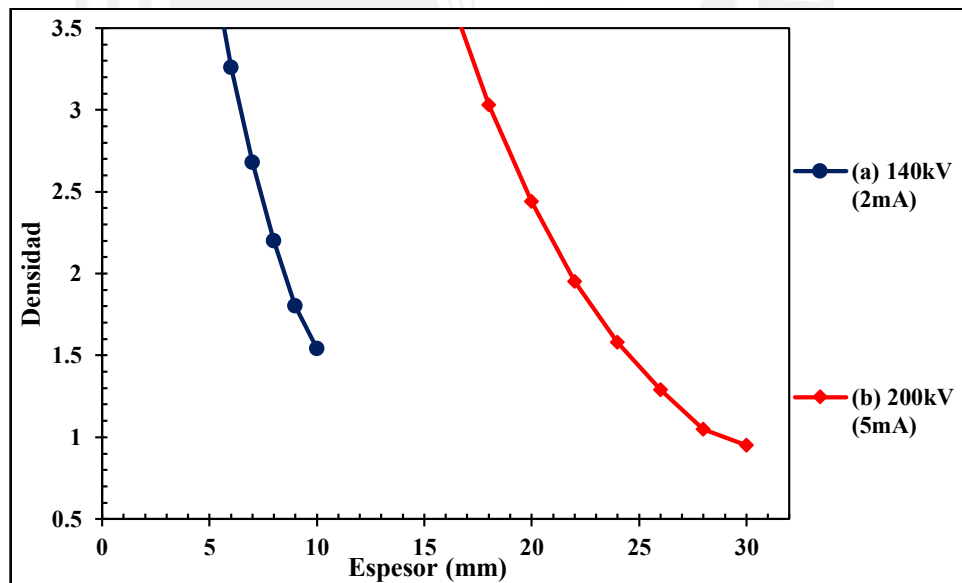


Figura 57. Densidad vs Espesor para voltajes ensayados en acero
Elaboración propia.

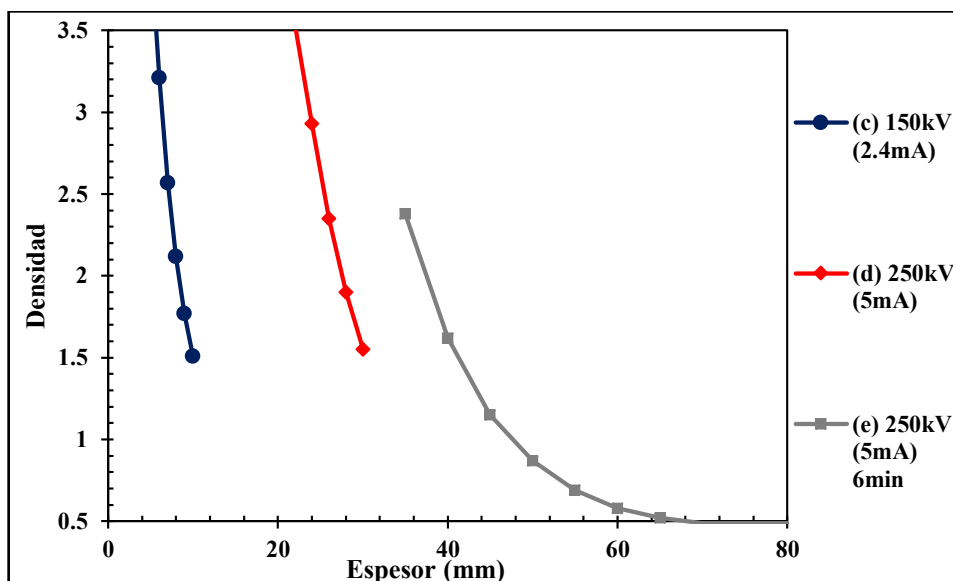


Figura 58. Densidad vs Espesor para voltajes no ensayados en acero

Elaboración propia.

La lista de densidades medidas en el densitómetro, tanto para acero como para aluminio, se detalla en la Tabla 22. En general, solo se observa una variación mayor en dos valores, los cuales corresponden justamente al mismo voltaje de 150kV.

Tabla 22. Densidades para películas de comprobación

ID	Espesor (mm)	Material	Voltaje (kV)	Amperaje (mA)	Tiempo (min s)	Densidad
(a)	7	Acero	140	2	5'4"	2.68
(b)	20	Acero	200	5	3'13'	2.44
(c)	6	Acero	150	2.4	2'33"	3.21
(d)	26	Acero	250	5	2'1"	2.33
(e)	35	Acero	250	5	6'13"	2.38
(f)	11.6	Aluminio	100	0.5	7'22"	2.72
(g)	44.6	Aluminio	150	2.4	1'25"	2.90

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 23, se cuantifica lo observado calculando el error absoluto, así como su porcentaje correspondiente, al comparar las densidades medidas con la densidad objetivo de 2.5. Cinco de siete densidades tiene un error absoluto menor al 10%, mientras que las otras dos se encuentran entre 15 a 30% de error.

Tabla 23. *Error absoluto en densidades*

ID	Voltaje (kV)	Densidad	Densidad objetivo	Error absoluto	% Error absoluto
(a)	140	2.68	2.5	0.18	7.20%
(b)	200	2.44	2.5	0.06	2.40%
(c)	150	3.21	2.5	0.71	28.40%
(d)	250	2.33	2.5	0.17	6.80%
(e)	250	2.38	2.5	0.12	4.80%
(f)	100	2.72	2.5	0.22	8.80%
(g)	150	2.9	2.5	0.4	16.00%

La validación puede ser realizada utilizando el coeficiente de determinación de porcentaje medio absoluto (Adhiwangsa, 2024). En este caso, se puede promediar el porcentaje de error absoluto obtenido en los siete ensayos, obteniendo un MAPE de 10.6%, es decir, de acuerdo con la Tabla 24, se estaría encontrando en buena precisión y al límite de entrada de alta precisión.

Tabla 24. *Valores MAPE e interpretación*

Valor MAPE	Interpretación
<10%	Alta precisión
10 a 20%	Buena precisión
20 a 50%	Precisión aceptable
>50%	Sin precisión

Nota. Tomado de “Programming for exposure chart modelling in conventional X-ray radiography”, Journal of Physics: Conference Series 2684, 2024

4.8. Corrección de voltaje interpolado

Como se observó, al usar la aplicación colocando 150kV de voltaje, el tiempo de exposición no es tan certero como con otros voltajes. La explicación para esto se encuentra en el método de cálculo que se utilizó para obtener el tiempo de exposición a 150kV. Para obtener una aproximación, la aplicación realiza una interpolación lineal entre los puntos de voltaje más cercanos para la curva que se desea obtener. Por ejemplo:

- Para 150kV (2.4mA), interpola entre las curvas de 140kV (2mA) y 160kV (2.8mA).

- Para 250kV (5mA), interpola entre las curvas de 240kV (5mA) y 260kV (5mA).

Debido a que en el caso de 250kV la interpolación se realiza para mismos amperajes de trabajo, la aproximación puede realizarse de manera lineal. Sin embargo, para 150kV se añade la variable de amperaje, la cual afecta en el cálculo interpolado del tiempo de exposición.

Para corregir esta curva es posible utilizar la curva característica para la película STRUCTURIX D7, la cual se mostró en la Figura 10. El procedimiento de cálculo se realiza de la siguiente manera:

- Se ubica la densidad de 3.21 y para la curva D7 se ubica el $\log E_2 = 2.48$
- Se ubica la densidad de 2.5 y para la curva D7 se ubica el $\log E_1 = 2.36$
- Se tiene que $E_2 = E_1 * 10^{2.48-2.36}$; es decir $E_1 = E_2 * K$, donde K es el factor de corrección equivalente a 0.758577574
- Para el caso (a), el tiempo corregido sería $T_1 = (2 \text{ min } 33 \text{ segundos}) * 0.709 \approx 1 \text{ min } 56 \text{ segundos}$.

El factor de corrección K para las curvas de voltajes no ensayados menores a 180kV variará debido a que el comportamiento sensitométrico de la película cambia en diferentes rangos de voltaje y corriente.

El caso del aluminio reafirma lo explicado anteriormente, debido a que el valor densidad para el espesor de 11.6 mm a 100kV es bastante cercano a 2.5 (aproximadamente un error absoluto de 8.8%). Esto se debe a que 100kV no es un voltaje interpolado, a diferencia del ensayo a 150kV (voltaje interpolado) donde se obtuvo una densidad de 2.9 para el espesor de 44.66 mm.

Al usar la curva corregida de 150kV, en la aplicación se obtiene un tiempo de exposición de aproximadamente 1 min, es decir casi 25 segundos menos que el tiempo al que se expuso la muestra de aluminio del caso (c). Además, se debe tener en cuenta que las muestras empleadas son sólidos fundidos de aluminio, por lo que la densidad de estas muestras puede ser menor debido a la porosidad y discontinuidades propios de la fundición.

Las modificaciones en los tiempos de exposición correspondientes a la curva de 150kV serán aplicadas y visibles dentro del aplicativo, afectando tanto los cálculos y resultados relacionados con el acero como aquellos vinculados al aluminio (Figura 59). En adición, estas correcciones mejorarían el error absoluto obtenido y obtener potencialmente una mejor precisión en la aplicación. Finalmente, se adjunta el diagrama de exposición de aluminio corregido en la Figura 60 y puede observarse a detalle en el Anexo III.

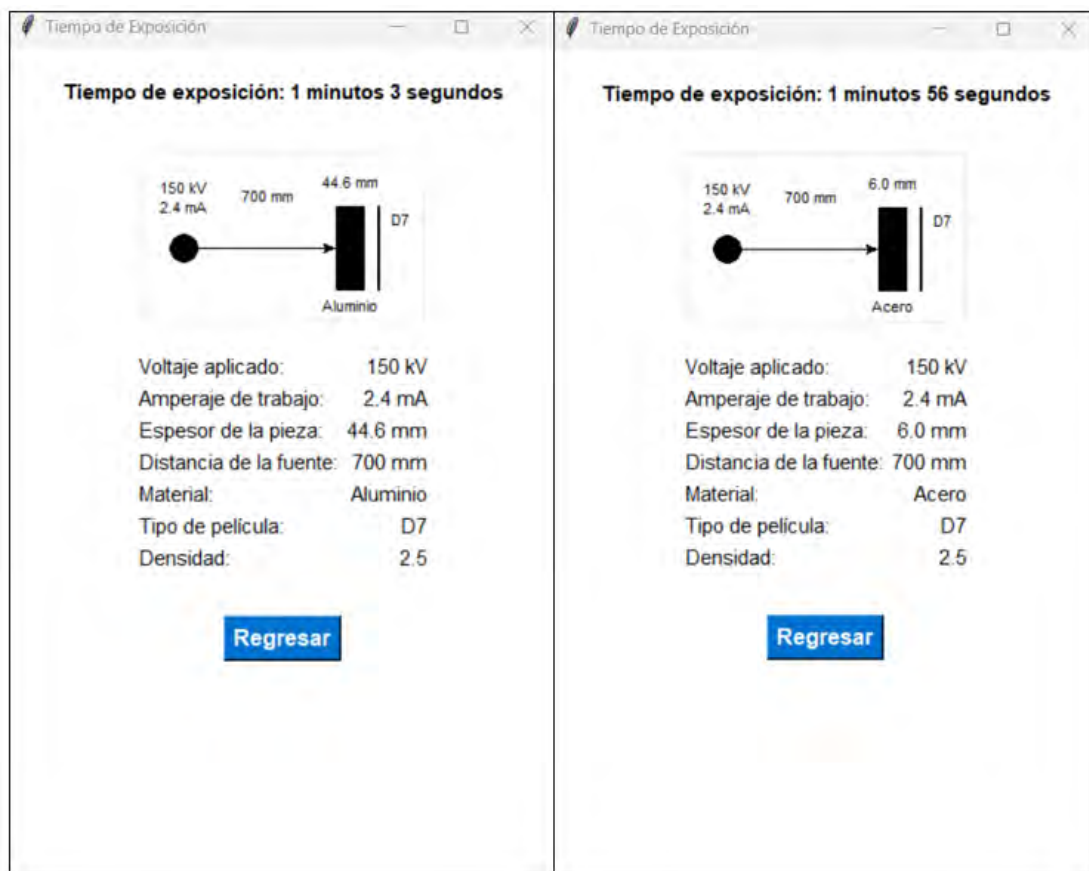


Figura 59. Tiempos de exposición corregidos para 150kV en acero y aluminio

Elaboración propia

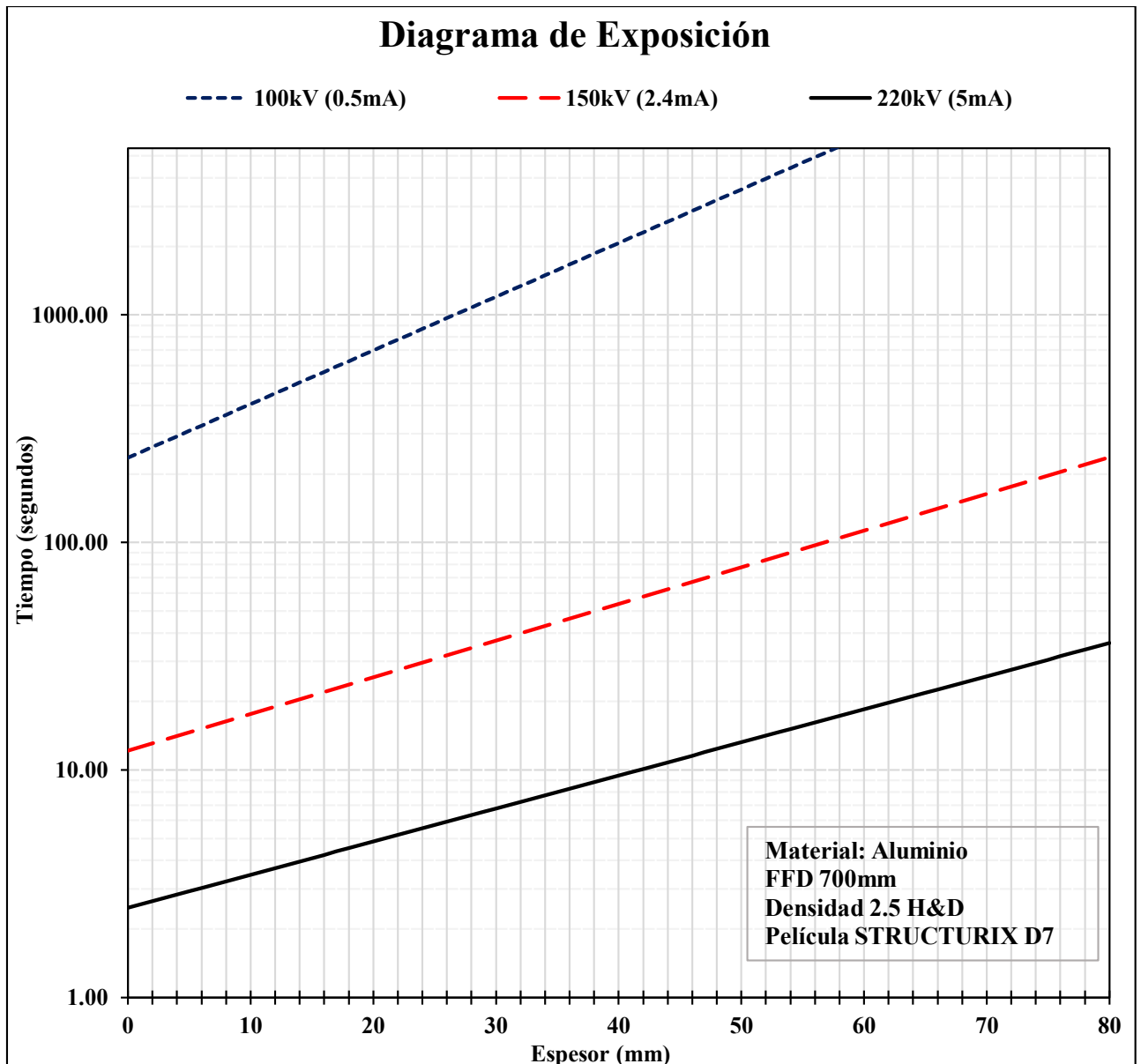


Figura 60. Diagrama de exposición del aluminio a densidad 2.5

Elaboración propia

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un aplicativo capaz de determinar los parámetros de exposición radiográfica para un generador de rayos X con capacidad de hasta 300 kV. Este aplicativo optimiza el proceso de selección de tiempos y condiciones de exposición para distintos materiales, como acero y aluminio, incrementando la eficiencia en los ensayos radiográficos. El uso de este aplicativo proporciona a los usuarios del equipo una herramienta precisa y fácil de usar, que mejora significativamente los tiempos de respuesta y la calidad de los resultados.
- Dada la antigüedad del generador de rayos X en el Laboratorio de Materiales, resultó esencial generar un diagrama de exposición ajustado a las condiciones actuales del equipo. La metodología aplicada incluyó la proyección de rayos X en 52 películas, lo que permitió obtener un diagrama de exposición para el rango de 100 a 300 kV. Se generaron seis diagramas de densidad vs espesor en exposiciones incrementales de 5, 10, 15, 20, 30 y 50 mA·min, así como un diagrama de tensión vs espesor. Estos ensayos permitieron la elaboración del diagrama de exposición para el acero con una densidad de 2.5 H&D, proporcionando así una referencia actualizada para futuras aplicaciones.
- Se han identificado y evaluado los parámetros geométricos que influyen en los diagramas de exposición, tales como la distancia foco-película y la distancia objeto-película, además de factores inherentes a la definición radiográfica, como el tipo de película utilizada. A través de variaciones experimentales en los voltajes y tiempos de exposición, se ha comprobado la sensibilidad de los tiempos de exposición a las características de los materiales con diferentes densidades. Este análisis permitió el diseño de una interfaz en el aplicativo, presentada en el Capítulo IV, en la que los usuarios pueden seleccionar el material, el voltaje, el espesor de la pieza, la distancia fuente-película y el tipo de película, optimizando así los parámetros de exposición de manera personalizada.

- Se ha desarrollado una metodología para la elaboración de diagramas de exposición aplicables a otros materiales, como el aluminio, mediante la utilización de factores de corrección derivados de los datos obtenidos para el acero. Esta extensión ha permitido que el aplicativo sea versátil y adaptable a distintos contextos, lo que amplía su potencial de uso en ensayos radiográficos para una variedad de metales, garantizando su aplicabilidad en distintos escenarios de inspección no destructiva.

RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

- La aplicación desarrollada sirve como base para poder potenciar esta herramienta de acuerdo con a las necesidades técnicas de los usuarios. Se invita a modificar la aplicación para poder seleccionar diferentes densidades, más materiales como cobre o titanio, colocar mayores factores de corrección para películas e incluso realizar una selección de acuerdo al equipo de rayos X que se está utilizando, debido a que se cuenta con más de uno en el Laboratorio de Materiales. El código del aplicativo se estará adjuntando en el Anexo IV.
- Si bien se realizó un diagrama de exposición para aluminio para 3 voltajes (100, 150 y 220 kV) y se comprobó que la densidad es cercana a la esperada, se debe tener en cuenta que los factores radiográficos equivalentes son aproximados y no son constantes debido a que dependen de la energía de radiación aplicada al material, esto puede generar una variación adicional en la densidad esperada, por lo que se debe tomar con cautela su aplicación.
- Debido a que para los voltajes menores a 180kV el amperaje proporcionado por el generador de rayos X no es constante, no es posible realizar una interpolación lineal simple entre voltajes como para el rango de 180 a 300kV, los cuales mantienen un amperaje constante de 5mA. Con ayuda de la curva sensitométrica de la película STRUCTURIX D7, se mostró el procedimiento de corrección para obtener un factor de corrección de 0.709 para la curva de 150kV del acero. Se invita a realizar una corrección experimental para los voltajes de 110, 130 y 170 kV por parte de los usuarios del generador de rayos X, con la finalidad de añadir estos voltajes a la aplicación.
- Si bien el generador de rayos X funciona de 100 a 300 kV según su especificación técnica, se ha observado que para 100kV el voltaje tiende a variar entre 98 a 102 kV, lo que también genera un cambio en el amperaje (Figura 61). Esto puede suceder durante todo el tiempo de exposición programado, por lo que podría afectar la densidad que se mide en la película.

Esta clase de variaciones se han visualizado ligeramente en voltajes menores a 180 kV, en menor tiempo al observado con 100kV, solo sucediendo por un par de segundos.



Figura 61. Variación de voltaje a 100 kV

Elaboración propia. Tomado en CITE materiales PUCP

BIBLIOGRAFÍA

- Adhiwangsa, F. Z. (2024). Programming for exposure chart modelling in conventional X-ray radiography. *Journal of Physics: Conference 2684 012007*.
- American Society of Non Destructive Testing. (2002). *Radiographic Testing Handbook Volume 4*. Ohio.
- ASME. (2019). *Boiler & Pressure Vessel Code Section V Nondestructive Examination*. New York.
- ASTM International. (2018). *E1815 Standard Test Method for Classification of Film Systems for Industrial Radiography*.
- ASTM International. (2021). *E1079 Standard Practice for Calibration of Transmission Densitometers*.
- ASTM International. (2021). *E1390 Standard Specification for Illuminators Used for Viewing Industrial Radiographs*.
- ASTM International. (2022). *E94 Standard Guide for Radiographic Examination Using Industrial Radiographic Film*.
- ASTM International. (2023). *E1254 Standard Guide for Storage of Radiographs and Unexposed Industrial Radiographic Films*.
- ASTM International. (2024). *E1316 Standard Terminology for Nondestructive Examinations*.
- BALTEAU NDT. (s.f.). *BALTOSPOT CERAM 35*. Belgium.
- BALTEAU NDT. (s.f.). *OPERATING AND MAINTENANCE MANUAL: CERAM 35 & CONTROL UNITS*.

Cely, M., Jami, B., & Sotomayor, V. (2018). Desarrollo de una Metodología para la Obtención de Diagramas de Exposición Radiográfica para Probetas de Acero y Aluminio Mediante el Uso de un Equipo Generador de Rayos X. *Revista Politécnica Vol. 40 No. 2*.

EASTMAN KODAK COMPANY. (s.f.). *Radiography in Modern Industry 4th Edition*. New York.

FUJIFILM. (2009). *The Fundamentals of Industrial Radiography*. Tokyo.

General Electric Company. (2006). *Industrial Radiography Image forming techniques*.

General Electric Company. (2014). *STRUCTURIX Film*.

Halmshaw, R. (1995). *Industrial Radiology Theory and Practice 2nd edition*. London: CHAPMAN & HALL.

Hellier, C. J. (s.f.). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. 2003: McGRAW-HILL.

IOWA STATE UNIVERISTY. (s.f.). *X-Rays*. Obtenido de Center of Nondestructive Evaluation: <https://www.nde-ed.org/Physics/X-Ray/index.xhtml>

Palencia, L. S. (s.f.). *Introducción a los ensayos no destructivos*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

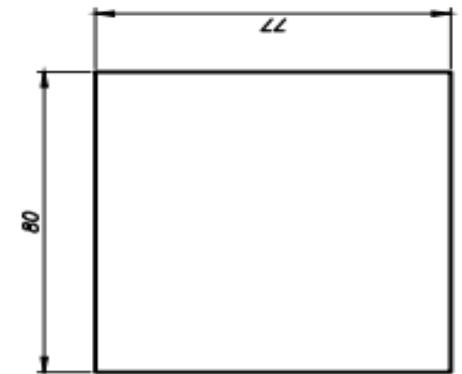
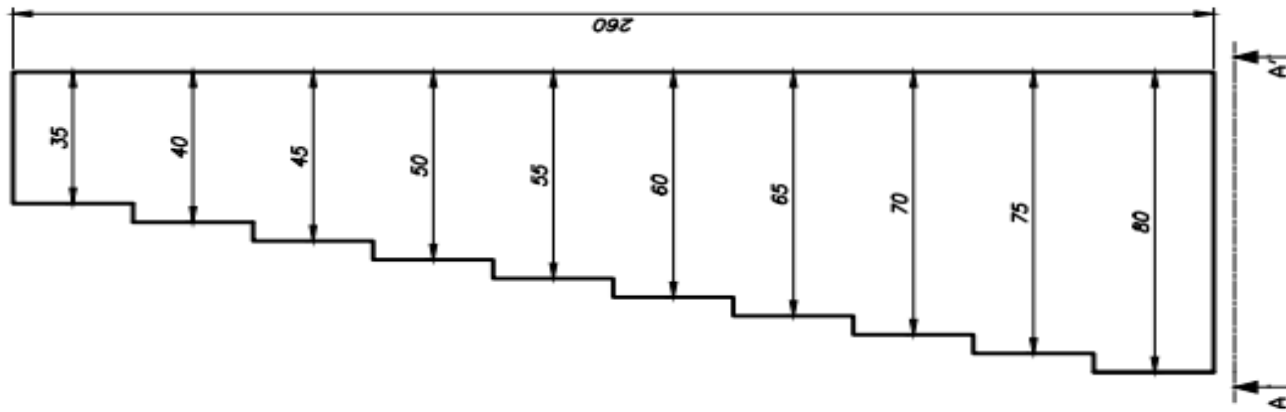
Staton, J. (2005). *Radiographic Testing Classroom Training Book*. The Ocean Coroporation.

Torres, N., Torres, M., & Montanez, J. (1988). *Radiografía Industrial X y Gamma*. Bogota: Instituto de Asuntos Nucleares.

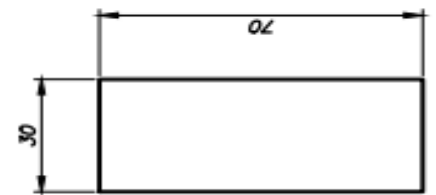
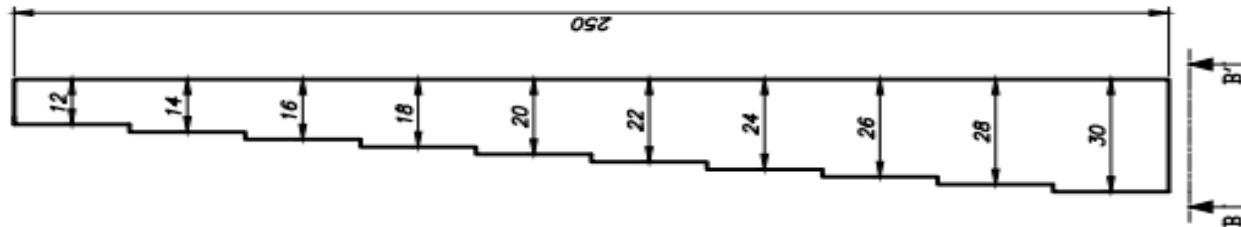
X-rite. (s.f.). *301 Black & White Transmission densitometer Operator Manual*. Michigan.

ANEXOS

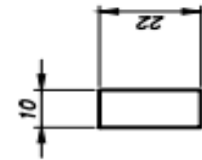
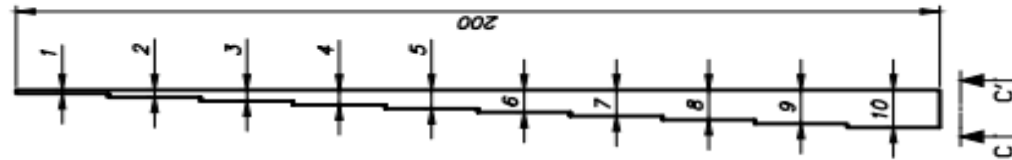
PATRON I: 35 a 80 mm
Progresión: 5mm



PATRON II: 12 a 30 mm
Progresión: 2mm



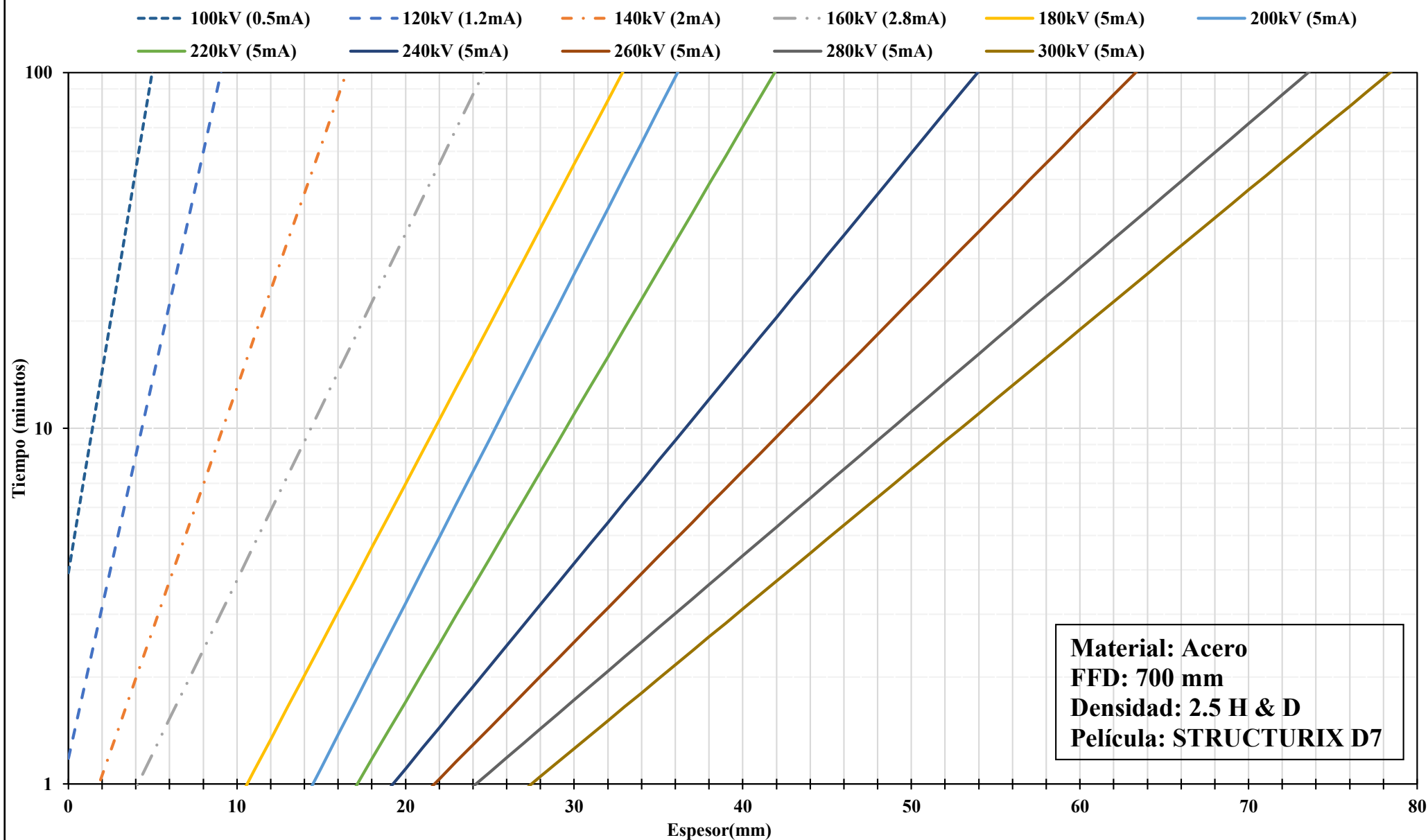
PATRON III: 1 a 10 mm
Progresión: 1mm



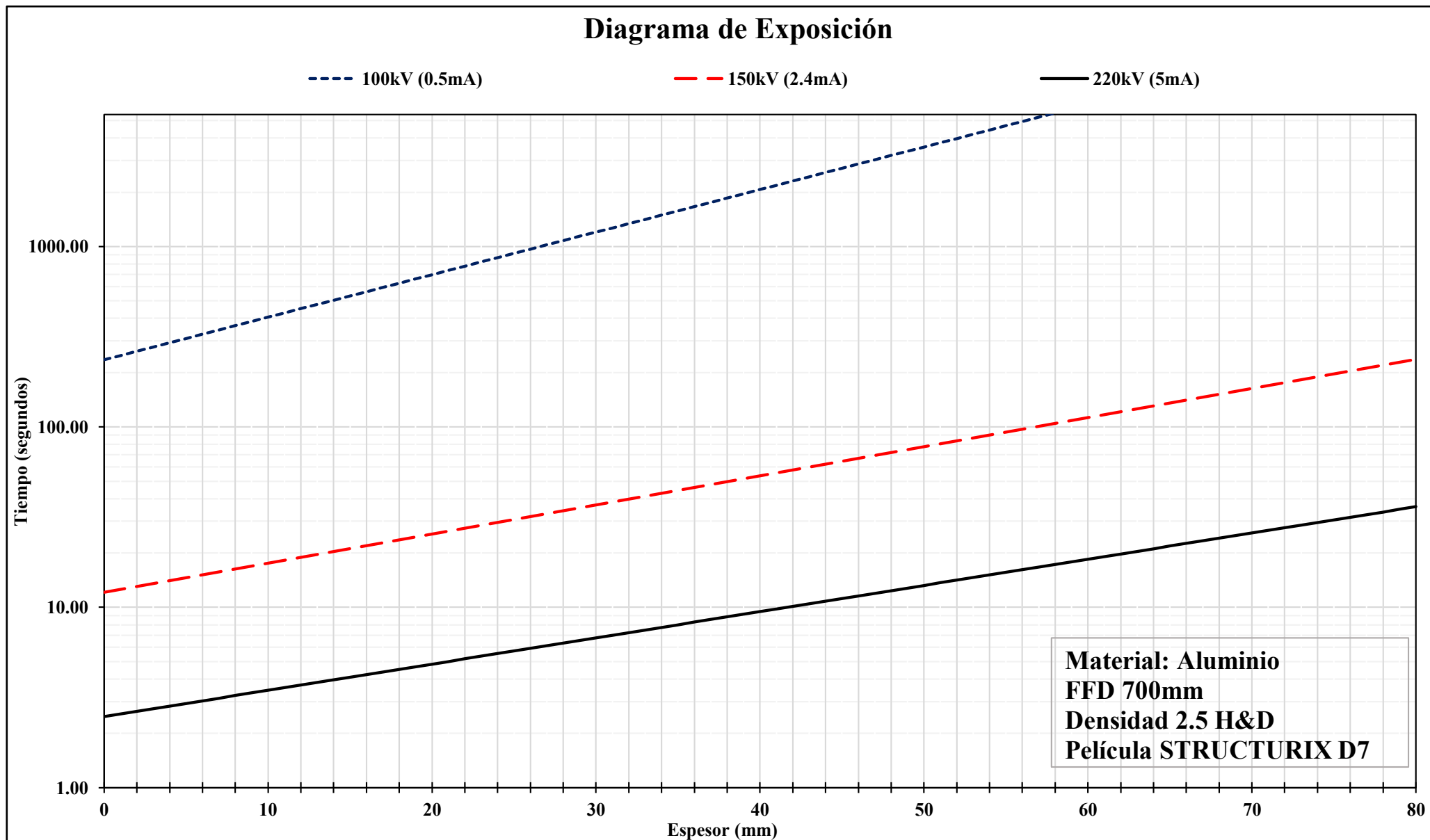
ANEXO I. PATRONES ESCALONADOS DE ACERO I, II Y III

ANEXO II. DIAGRAMA DE EXPOSICIÓN DEL ACERO A DENSIDAD 2.5

Diagrama de Exposición



ANEXO III. DIAGRAMA DE EXPOSICIÓN DEL ALUMINIO A DENSIDAD 2.5



ANEXO IV. CÓDIGO FUENTE DEL APLICATIVO

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox
from math import exp

# Función para calcular el tiempo de exposición
def calcular_tiempo():
    material = var_material.get()
    voltaje = int(var_voltaje.get())
    distancia = int(var_distancia.get())
    pelicula = var_pelicula.get()

    # Validación del espesor
    try:
        espesor = float(entry_espesor.get())
    except ValueError:
        messagebox.showerror("Error", "Colocar un valor numérico de espesor")
        return

    if espesor < 0 or espesor > 80:
        messagebox.showerror("Error", "Valores permitidos entre 0 a 80 mm")
        return

    if material == "Acero":
        formulas = {
            100: lambda x: 3.9273 * exp(0.6519 * x),
            120: lambda x: 1.1797 * exp(0.4905 * x),
            140: lambda x: 0.5642 * exp(0.3139 * x),
            150: lambda x: 0.758577574*0.5*(0.5642 * exp(0.3139 * x)+0.3692 * exp(0.2245 *
x)),
            160: lambda x: 0.3692 * exp(0.2245 * x),
            180: lambda x: 0.1116 * exp(0.2068 * x),
            200: lambda x: 0.0456 * exp(0.2129 * x),
            220: lambda x: 0.0413 * exp(0.1860 * x),
            240: lambda x: 0.0776 * exp(0.1328 * x),
            260: lambda x: 0.0905 * exp(0.1107 * x),
            280: lambda x: 0.1048 * exp(0.0933 * x),
            300: lambda x: 0.0835 * exp(0.0904 * x),
        }

    # Para voltajes entre 100 y 170 kV, no se interpola el valor
    if voltaje in formulas:
        tiempo_base = formulas[voltaje](espesor)
    elif 100 <= voltaje <= 170:
        messagebox.showerror("Error", "Voltaje no válido para Acero en este rango")
        return
    else: # Para voltajes entre 180 y 300 kV, se permite la interpolación
        voltajes_disponibles = sorted(formulas.keys())
        voltaje_inf = max(k for k in voltajes_disponibles if k < voltaje)
        voltaje_sup = min(k for k in voltajes_disponibles if k > voltaje)
```

```

    tiempo_inf = formulas[voltaje_inf](espesor)
    tiempo_sup = formulas[voltaje_sup](espesor)
    tiempo_base = tiempo_inf + (tiempo_sup - tiempo_inf) * ((voltaje -
voltaje_inf) / (voltaje_sup - voltaje_inf))

    # Aplicar factor de corrección K solo para 150 kV
    if voltaje == 150:
        factor_correccion = 0.758577574
        tiempo_base *= factor_correccion

else: # Aluminio
    formulas = {
        100: lambda x: 3.9273 * exp(0.6519 * (x / 12)),
        150: lambda x: 0.2022 * exp(0.3096 * x * 0.12),
        220: lambda x: 0.0413 * exp(0.1860 * 0.18 * x),
    }
    if voltaje in formulas:
        tiempo_base = formulas[voltaje](espesor)
    else:
        messagebox.showerror("Error", "Voltaje no válido para Aluminio")
        return

# Multiplicación por factores de distancia y película
factores_distancia = {350: 0.25, 500: 0.5, 700: 1, 1000: 2, 1400: 4}
tiempo_final = tiempo_base * factores_distancia[distancia]

if voltaje >= 200:
    factores_pelicula = {"D2": 7, "D3": 4.3, "D4": 2.7, "D5": 1.5, "D7": 1, "D8": 0.6}
elif voltaje <= 100:
    factores_pelicula = {"D2": 9, "D3": 4.1, "D4": 3, "D5": 1.7, "D7": 1, "D8": 0.6}
else: # Interpolación para voltajes entre 100 y 200 kV
    f1 = {"D2": 9, "D3": 4.1, "D4": 3, "D5": 1.7, "D7": 1, "D8": 0.6}
    f2 = {"D2": 7, "D3": 4.3, "D4": 2.7, "D5": 1.5, "D7": 1, "D8": 0.6}
    factores_pelicula = {k: f1[k] + (f2[k] - f1[k]) * ((voltaje - 100) / 100) for k in
f1}

tiempo_final *= factores_pelicula[pelicula]

# Verificación de los límites de tiempo (mínimo de 10 segundos, máximo de 90 minutos =
5400 segundos)
tiempo_en_segundos = tiempo_final * 60 # Convertir tiempo a segundos

if tiempo_en_segundos < 10 or tiempo_en_segundos > 5400:
    messagebox.showerror("Error", "Tiempo fuera de rango operacional")
    return

# Mostrar resultado
mostrar_resultado(tiempo_final, voltaje, espesor, distancia, pelicula, material)

# Función para mostrar el resultado
def mostrar_resultado(tiempo, voltaje, espesor, distancia, pelicula, material):
    pantalla_inicio.pack_forget()

```

```

pantalla_resultado.pack(fill="both", expand=True)

tiempo_minutos = int(tiempo)
tiempo_segundos = int((tiempo - tiempo_minutos) * 60)
tiempo_exposicion.set(f"Tiempo de exposición: {tiempo_minutos} minutos
{tiempo_segundos} segundos")

# Actualizar los valores en el diagrama
label_valor_voltaje.config(text=f"{voltaje} kV")
label_valor_amperaje.config(text=f"{amperaje_trabajo:.1f} mA")
label_valor_espesor.config(text=f"{espesor} mm")
label_valor_distancia.config(text=f"{distancia} mm")
label_valor_pelricula.config(text=pelricula)
label_valor_material.config(text=material)

# Actualizar los valores en el Canvas
canvas.delete("all")
canvas.create_oval(20, 60, 40, 80, fill="black")
canvas.create_text(30, 20, text=f"{voltaje} kV\n{amperaje_trabajo:.1f} mA",
font=("Arial", 8), anchor="n")
canvas.create_line(40, 70, 140, 70, arrow=tk.LAST)
canvas.create_text(90, 40, text=f"{distancia} mm", font=("Arial", 8), anchor="s")
canvas.create_rectangle(140, 40, 160, 100, fill="black")
canvas.create_rectangle(170, 40, 170, 100, fill="black")
canvas.create_text(150, 30, text=f"{espesor} mm", font=("Arial", 8), anchor="s")
canvas.create_text(180, 50, text=pelricula, font=("Arial", 8), anchor="w")
canvas.create_text(150, 105, text=material, font=("Arial", 8), anchor="n")

# Función para actualizar el voltaje
def actualizar_voltaje():
    material = var_material.get()
    if material == "Acero":
        menu_voltaje.config(values=[100, 120, 140, 150, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280,
300])
    else: # Aluminio
        menu_voltaje.config(values=[100, 150, 220])
    var_voltaje.set("")

# Función para actualizar el amperaje de trabajo automáticamente
def actualizar_amperaje(event):
    try:
        voltaje = int(var_voltaje.get())
        global amperaje_trabajo
        if 100 <= voltaje <= 170:
            amperaje_trabajo = 0.0385 * voltaje - 3.38
        else:
            amperaje_trabajo = 5
        entry_amperaje.config(state="normal")
        entry_amperaje.delete(0, tk.END)
        entry_amperaje.insert(0, f"{amperaje_trabajo:.1f}")
        entry_amperaje.config(state="readonly")
    except ValueError:

```

pass

```
# Crear la ventana principal
root = tk.Tk()
root.title("Tiempo de Exposición")
root.geometry("400x600")
root.configure(bg="white")

# Variables
var_material = tk.StringVar(value="Acero")
var_voltaje = tk.StringVar()
var_distancia = tk.StringVar(value="700")
var_película = tk.StringVar(value="D7")
amperaje_trabajo = 0.0
tiempo_exposicion = tk.StringVar()

# Pantalla de inicio
pantalla_inicio = tk.Frame(root, bg="white")
pantalla_inicio.pack(fill="both", expand=True)

# Título y logo
tk.Label(pantalla_inicio, text="Tiempo de exposición", font=("Helvetica", 13, "bold"),
bg="white").pack(pady=5)
logo_pucp = tk.PhotoImage(file="logo_pucp.png") # Aquí deberías cargar la imagen del logo
tk.Label(pantalla_inicio, image=logo_pucp, bg="white").pack()

# Sección "Equipo de Rayos X"
tk.Label(pantalla_inicio, text="Equipo de Rayos X", font=("Helvetica", 12, "bold"),
bg="white").pack(pady=5)
tk.Label(pantalla_inicio, text="CERAM 35", font=("Helvetica", 12, "bold"),
bg="white").pack(pady=1)

# Sección "Seleccione el material"
tk.Label(pantalla_inicio, text="Seleccione el material", font=("Helvetica", 11),
bg="white").pack(pady=5)
tk.Radiobutton(pantalla_inicio, text="Acero", variable=var_material, value="Acero",
bg="white", command=actualizar_voltaje).pack()
tk.Radiobutton(pantalla_inicio, text="Aluminio", variable=var_material, value="Aluminio",
bg="white", command=actualizar_voltaje).pack()

# Sección "Seleccione el voltaje"
tk.Label(pantalla_inicio, text="Seleccione el voltaje (kV)", font=("Helvetica", 11),
bg="white").pack(pady=5)
menu_voltaje = ttk.Combobox(pantalla_inicio, textvariable=var_voltaje, state="readonly")
menu_voltaje.pack()
menu_voltaje.bind("<<ComboboxSelected>>", actualizar_amperaje)

# Sección "Amperaje de trabajo"
tk.Label(pantalla_inicio, text="Amperaje de trabajo (mA)", font=("Helvetica", 11),
bg="white").pack(pady=5)
entry_amperaje = tk.Entry(pantalla_inicio, state="readonly")
entry_amperaje.pack()
```

```

# Sección "Espesor de la pieza"
tk.Label(pantalla_inicio, text="Espesor de la pieza (mm)", font=("Helvetica", 11),
bg="white").pack(pady=5)
entry_espesor = tk.Entry(pantalla_inicio)
entry_espesor.pack()

# Sección "Distancia de la fuente a la pieza"
tk.Label(pantalla_inicio, text="Distancia de la fuente a la pieza (mm)",
font=("Helvetica", 11), bg="white").pack(pady=5)
menu_distancia = ttk.Combobox(pantalla_inicio, textvariable=var_distancia,
state="readonly", values=["350", "500", "700", "1000", "1400"])
menu_distancia.pack()

# Sección "Tipo de película"
tk.Label(pantalla_inicio, text="Tipo de película", font=("Helvetica", 11),
bg="white").pack(pady=5)
menu_pelicula = ttk.Combobox(pantalla_inicio, textvariable=var_pelicula, state="readonly",
values=["D2", "D3", "D4", "D5", "D7", "D8"])
menu_pelicula.pack()

# Botón para calcular el tiempo de exposición
tk.Button(pantalla_inicio, text="Calcular tiempo", command=calcular_tiempo,
font=("Helvetica", 12, "bold"), bg="#0072CE", fg="white").pack(pady=20)

# Pantalla de resultado
pantalla_resultado = tk.Frame(root, bg="white")

# Título y tiempo de exposición calculado
tk.Label(pantalla_resultado, textvariable=tiempo_exposicion, font=("Helvetica", 11,
"bold"), bg="white").pack(pady=20)

# Diagrama representativo
canvas = tk.Canvas(pantalla_resultado, width=200, height=120, bg="white")
canvas.pack(pady=10)

# Resultados
resultados_frame = tk.Frame(pantalla_resultado, bg="white")
resultados_frame.pack(pady=10)

tk.Label(resultados_frame, text="Voltaje aplicado:", font=("Helvetica", 11),
bg="white").grid(row=0, column=0, sticky="w")
label_valor_voltaje = tk.Label(resultados_frame, text="", font=("Helvetica", 11),
bg="white")
label_valor_voltaje.grid(row=0, column=1, sticky="e")

tk.Label(resultados_frame, text="Amperaje de trabajo:", font=("Helvetica", 11),
bg="white").grid(row=1, column=0, sticky="w")
label_valor_amperaje = tk.Label(resultados_frame, text="", font=("Helvetica", 11),
bg="white")
label_valor_amperaje.grid(row=1, column=1, sticky="e")

```

```

tk.Label(resultados_frame, text="Espesor de la pieza:", font=("Helvetica", 11),
bg="white").grid(row=2, column=0, sticky="w")
label_valor_espesor = tk.Label(resultados_frame, text="", font=("Helvetica", 11),
bg="white")
label_valor_espesor.grid(row=2, column=1, sticky="e")

tk.Label(resultados_frame, text="Distancia de la fuente:", font=("Helvetica", 11),
bg="white").grid(row=3, column=0, sticky="w")
label_valor_distancia = tk.Label(resultados_frame, text="", font=("Helvetica", 11),
bg="white")
label_valor_distancia.grid(row=3, column=1, sticky="e")

tk.Label(resultados_frame, text="Material:", font=("Helvetica", 11),
bg="white").grid(row=4, column=0, sticky="w")
label_valor_material = tk.Label(resultados_frame, text="", font=("Helvetica", 11),
bg="white")
label_valor_material.grid(row=4, column=1, sticky="e")

tk.Label(resultados_frame, text="Tipo de película:", font=("Helvetica", 11),
bg="white").grid(row=5, column=0, sticky="w")
label_valor_pelicula = tk.Label(resultados_frame, text="", font=("Helvetica", 11),
bg="white")
label_valor_pelicula.grid(row=5, column=1, sticky="e")

tk.Label(resultados_frame, text="Densidad:", font=("Helvetica", 11),
bg="white").grid(row=6, column=0, sticky="w")
label_valor_densidad = tk.Label(resultados_frame, text="2.5", font=("Helvetica", 11),
bg="white")
label_valor_densidad.grid(row=6, column=1, sticky="e")

# Botón para regresar al inicio
tk.Button(pantalla_resultado, text="Regresar", command=lambda:
pantalla_resultado.pack_forget() or pantalla_inicio.pack(fill="both", expand=True),
font=("Helvetica", 12, "bold"), bg="#0072CE", fg="white").pack(pady=20)

root.mainloop()

```