

Evaluación comparativa de las técnicas radiografía industrial convencional y radiografía digital  
en la inspección no destructiva de piezas metálicas

Diana María Montaña Ángel

Trabajo de grado para optar el título de ingeniera metalúrgica

Directora:

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Codirector

José Domingo Scopelliti

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-químicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2020

### Dedicatoria

Dedico esta nota a las largas horas de estrés, cansancio, a los imprevistos de la vida, lo dedico a

*Elba, Alirio*, mis progenitores, a mis hermanas *Angelina, Denya, Yulieth*, y a mis hermanos

*Alirio e Hidarwin*, a mis 15 sobrinos y sobrinas,

*Andreina, Yeferson, Beryi, Miler, Sharith, Chelsy, Luifer, Hidarwin, Wilmer, Sandro, Michelt,*

*Marlen, Laura, Jesús y Fabian.*

Porque me han permitido soñar con la vida, el amor, porque a pesar de mis tropiezos me han apoyado, me han escuchado, se han sentado cuando soy un mar de lágrimas, por ser mi consuelo y mi terremoto a la vez, porque sobre todo me aman en medio de la tormenta.

Le agradezco a mi familia, amigos amigas, compañeros y compañeras de la vida, a las familias bumanguesas que me recibieron de la mejor manera, gracias infinitas a la familia *Quintero*:

*Yaneth, Héctor, Lenny, Karen y Benjamín.*

La familia que escogí en los años estudiantiles:

*Sandri* una mujer soñadora que me acompañó desde el colegio, en esta ruta maravillosa.

*Carolina Saah* la costeña que, con su alegría, le fue dando sabor en los días complicados.

*Carolina Solano*, gracias por el apoyo, tu escucha y comprensión.

*Carlos Rueda* un personaje que, a mitad de carrera, me ha expresado sus más sinceros abrazos, su fortaleza y convicción. Dentro y fuera de Colombia ha sido un grato compañero de la vida.

*Fauricio* mi compañero del drama, las aventuras vividas fueron grandiosas a su lado.

*Luis Rondón* el filósofo de mi vida, que me inspiro en muchos momentos de tensión.

*Alicia Herrera* por corresponder totalmente al significado de amistad, gracias por el apoyo en tantos momentos de locura, cada palabra my friend ha sido esencial.

A la familia estudiantil de ingeniería metalúrgica *Harold, María Angélica, Mayer, María Fernanda, Johana, Catalina* y *Johan* han sido excelente seres humanos, ejemplos de vida, en momentos complicados de este proceso, sus mensajes de ánimo han sido contundentes.

Al grupo de teatro UIS, por todo lo aprendido.

Lo dedico a mi memoria, lo dedico a mi pueblo Pelaya, lo dedico a las mujeres luchadoras que combaten el miedo, la guerra y la muerte.

Dedico esta consecución de este logro a Dios, que me ha permitido permanecer con una convicción fuerte del significado de la vida, de la fortaleza para continuar en pie.

### **Agradecimientos**

Al Instituto Sábato por el préstamo del conocimiento, del espacio tangible de la *ENDE* en el Centro Atómico Constituyentes *CNEA*, a *José Scopelliti*, *Emilio Nicolás Olivar Godaz* por asesorarme una y otra vez en esta ruta, apoyándome en todo el proceso de la pasantía con su guía y conocimientos. A la profesora *Ana Pérez Ceballos* por acompañarme en este trabajo. A La Universidad Industrial de Santander que me permitió soñar en sus aulas e iniciar el vuelo alto y muy alto en este cielo verde de nuestra hermosa alma máter.

Agradezco a las profesoras y profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, por formarnos y fortalecer nuestras habilidades para la vida.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	17
1. Objetivos .....	19
1.1 Objetivo general.....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Marco referencial .....	20
2.1 Técnica de radiografía industrial convencional .....	20
2.1.1 Medio de registro. ....	22
2. 1.2 Procedimiento de la película radiográfica.....	23
2. 1.3 Parámetros de evaluación. ....	24
2.2 Técnica de radiografía industrial digital .....	24
2. 2.1 Medio de registro. ....	24
2. 2.2 Evaluación de calidad. ....	25
3. Metodología .....	26
3.1 Rendimiento de películas.....	26
3.2 Latitud de exposición.....	27
3.3 Consecución de radiografías para piezas de geometría variable .....	28
3.4 Sensibilidad de defectos.....	30
4. Resultados y análisis .....	32
4.1 Rendimiento de película .....	32

4.2 Resultados de rango dinámico .....	35
4.3 Resultado de radiografías para piezas con geometría variable .....	39
4.3.1 Radiografía con la técnica convencional para la tapa de compresor de Acero.....	39
4. 3.2 Radiografía con la técnica digital para la tapa de compresor de Acero.....	44
4. 3.3 Radiografía con la técnica convencional para fundiciones de Aluminio.....	45
4. 3.4 Radiografía con la técnica digital para fundiciones de Aluminio.....	46
4.4 Resultados de sensibilidad de defectos .....	47
4. 4.1 Soldadura de Acero.....	47
4. 4.2 Soldadura de Aluminio. ....	52
Conclusiones .....	55
Referencias bibliográficas.....	57
Recomendaciones .....	62
Apéndices.....	63

### Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema básico de radiografía convencional.....	21
Figura 2. Estructura de la película radiográfica.....	23
Figura 3. Composición de la imagen IP.....	25
Figura 4. Escalerilla o cuña sensitométrica de Acero al Carbono. ....	26
Figura 5. Fundición de Aluminio (soportes de Aluminio).....	28
Figura 6. Tapa de compresor de Acero.....	28
Figura 7. Soldadura por fricción agitación 1. ....	30
Figura 8. Soldadura por fricción agitación 2. ....	31
Figura 9. Soldadura de Acero al Carbono.....	31
Figura 10. Rayos X 160 kV. ....	34
Figura 11. Iridio 192. ....	34
Figura 12. Cobalto 60. ....	34
Figura 13. Radiografía convencional digitalizada por el escáner. ....	35
Figura 14. Curva construida con valores de densidad medida para los 12 escalones de la escalerilla. .....	36
Figura 15. Radiografía convencional con el LUT de visualización de película. ....	37
Figura 16. Radiografía digital de la escalerilla de Acero al Carbono.....	38
Figura 17. Radiografías con la técnica convencional (a) y digital computarizada (b). ....	39
Figura 18. Radiografía tapa de compresor sin compensación - sin pantalla.....	40

Figura 19. Radiografía tapa de compresor sin compensación - con pantalla.....	41
Figura 20. Radiografía tapa de compresor con compensación - sin pantalla.....	42
Figura 21. Radiografía tapa de compresor con compensación – con pantalla.....	43
Figura 22. Radiografía digital tapa de compresor.....	45
Figura 23. Radiografía fundición de Aluminio sin compensación. ....	46
Figura 24. Radiografía fundición de Aluminio con compensación. ....	46
Figura 25. Radiografía digital fundición Aluminio. ....	47
Figura 26. Radiografía soldadura de Acero al Carbono por la técnica convencional (RTC). ....	47
Figura 27. Cordón zona 1. Imagen obtenida por RTC.....	48
Figura 28. Cordón zona 2. Imagen obtenida por RTC.....	48
Figura 29. Cordón zona 3. Imagen obtenida por RTC.....	49
Figura 30. Radiografía de Acero al Carbono con la técnica digital (RD).....	50
Figura 31. Cordón zona 1. Imagen obtenida por RTC.....	50
Figura 32. Cordón zona 2. Imagen obtenida por RTC.....	51
Figura 33. Cordón zona 3. Imagen obtenida por RTC.....	51
Figura 34. Radiografía soldadura por fricción agitación de Aluminio por la técnica convencional. .....	53
Figura 35. Radiografía soldadura por fricción agitación de Aluminio por la técnica digital. ....	53
Figura 36. Radiografía digital con filtro para extraer detalles, acercamiento al cordón de soldadura. .....	54
Figura 37. Acercamiento a la discontinuidad zona 1 en RD.....	54
Figura 38. Acercamiento a la discontinuidad zona 2 en RD.....	54

**Lista de figuras**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. ....	27
Tabla 2. ....	27
Tabla 3. ....	29
Tabla 4. ....	32
Tabla 5. ....	34

### **Lista de Apéndices**

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Procedimiento llevado a cabo para la radiografía industrial convencional.

Apéndice B. Procedimiento llevado a cabo para la radiografía industrial digital.

Apéndice C. Rendimiento de películas con la energía de Cobalto 60.

Apéndice D. Rendimiento de películas con la energía de Iridio 192.

Apéndice E. Rendimiento de películas con la energía de rayos X

## Glosario

**Contraste:** este parámetro de calidad se mide en la radiografía con los indicadores de calidad de imagen, y representa la relación entre la intensidad luminosa de la imagen y el fondo adyacente.

**Definición:** hace referencia a la nitidez de la imagen, presencia de bordes bien perfilados, se relaciona con el grado de borrosidad de la imagen.

**Densidad radiográfica:** grado de ennegrecimiento de la emulsión revelada, definido como el logaritmo en base 10 de la relación entre la luz incidente sobre la película y la luz transmitida por esta.

**END:** ensayos no Destructivos hacen referencia a una serie de métodos y técnicas utilizadas para examinar y detectar discontinuidades superficiales e internas de piezas, componentes, materiales y soldaduras, estos ensayos no alteran el estado de lo examinado.

**ICI o IQI:** indicador de Calidad de Imagen, que consiste en hilos o placas de agujeros, proporcionados por ASTM, ISO y DIN; los cuales son colocados sobre la pieza en el proceso de exposición de radiografía, y deben ser visibles al obtener la radiografía, esto asegura la calidad en esas condiciones (miden la sensibilidad del ensayo a través del contraste y la definición).

**Película radiográfica:** un filme o película radiográfica se compone de siete capas y tiene un espesor total aproximado de 0,5mm. Esta película de haluros de plata forma una imagen latente, debido a la formación de plata metálica con la radiación recibida.

**Resolución espacial básica (REB):** este parámetro se define mediante el doble hilo (dúplex), y éste se trata de pares de hilos de platino separados a una distancia igual a su diámetro, los diámetros van decreciendo. En el caso de radiografía digital, este parámetro está relacionado con el tamaño

efectivo del píxel e indica el menor detalle geométrico que puede resolverse en una imagen digital. De la norma ISO doble hilo 19232-5 (calidad de imagen detector digital), se toma la resolución espacial básica máxima según el espesor atravesado, a la cual se debe comparar la resolución espacial básica obtenida por el par de hilos más delgados que pueden detectarse en la radiografía, según la referida norma que es equivalente ASTM E2002-15.

**Relación señal ruido (RSR):** muestra la relación entre el valor de gris del fondo (ruido) y el valor de gris de la energía que irradió la pieza. Este parámetro está asociado a un valor mínimo para considerarse aceptable.

**Relación señal ruido normalizada (RSRn):** este es el valor que las normas emplean para establecer un mínimo de conformidad, se calcula en el software de visualización de la imagen y se debe comparar con el RSRn mínimo de la tabla de la norma ISO 17636-2 (valores mínimos de relación señal ruido normalizada para radiografía digital).

**Valor de gris:** es la asignación de valores a partir del grado de exposición en la radiografía, y depende de la profundidad en bits del escáner. Cuando hay una menor exposición menor será el valor de gris obtenido.

## Resumen

**Título:** Evaluación comparativa de las técnicas radiografía industrial convencional y radiografía digital en la inspección no destructivas de piezas metálicas.\*

**Autora:** Diana María Montaña Ángel\*\*

**Palabras Claves:** Película, radiografía industrial digital computarizada, indicadores de calidad, densidad radiográfica, resolución espacial básica, relación señal ruido, placas de imagen.

### Descripción:

Este trabajo realizado como modalidad de pasantía de investigación en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), muestra una evaluación comparativa de la radiografía industrial, empleando la técnica convencional de película y la técnica computarizada digital con placa de imagen (CR-IP). En el desarrollo de este proyecto se emplearon soldaduras por fricción agitación de Aluminio, soldadura por electrodo revestido de acero al carbono, una fundición de Acero (tapa de compresor), fundiciones de aluminio (soportes) y escalerillas de acero con diferentes espesores, expuestas con rayos X para ambas técnicas de radiografía industrial, con lo cual se obtuvieron radiografías que presentaron diferente latitud de exposición, tiempos de procesamiento, sensibilidad de defectos y calidad de imagen. Los procedimientos utilizados en las radiografías parten del Código ASME artículo 2, y a su vez los parámetros de evaluación radiográfica en términos de calidad estuvieron basados en las normas ASTM E-747-04 y la norma DIN-54109 para la radiografía convencional. Por otra parte, para la radiografía digital se utilizaron la norma ISO 19232-5 y 17636-2 para los parámetros de calidad. Los resultados de las radiografías evidenciaron la absorción diferente de cada técnica, y las grandes ventajas de la implementación de la técnica de radiografía computarizada digital, que hoy por hoy no es aplicada por la falta de personal calificado y los equipos que requieren de una inversión considerable, siendo un gran paso su implementación en la inspección no destructiva de piezas.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Directora: Ana María Pérez Ceballos.

### Abstract

**Title:** Comparative evaluation of conventional industrial radiography and digital industrial radiography techniques in non-destructive inspection of metal parts.\*

**Author:** Diana María Montaña Ángel\*\*

**Keywords:** Film, computerized digital industrial radiography, quality indicators, radiographic density, basic spatial resolution, signal-to-noise ratio, image plates.

### Description:

This work carried out as a research internship modality at the National Atomic Energy Commission (CNEA), shows a comparative evaluation of industrial radiography, using the conventional film technique and the digital computerized technique with image plate (CR-IP). In the development of this report, aluminum agitation friction welding, Carbon Steel Shielded metal arc welding a steel smelter (compressor cap), cast aluminum (supports) and steel ladders with different thicknesses, exposed with X-rays were used for the development of this report both industrial radiography techniques, which resulted in radiographs that presented different latitude of exposure, processing times, defect sensitivity and image quality. The procedures use in radiographs are based on the ASME Article 2 code, and in turn the radiographic evaluation parameters in terms of quality were based on ASTM E-747-04 and DIN-54109 for conventional radiography, on the other hand, for digital radiography, the ISO 19232-5 y 17636-2 standards were used for quality parameters. The results of the radiographs evidenced the different absorption of each technique, and the great advantages of the implementation of the digital computerized radiography technique, which today is not applied due to the lack of qualified personnel and the equipment that require significant investment, being a great step its implementation in the inspection not destructive

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Chemical Physical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science, Director: Ana María Pérez Ceballos

## Introducción

A lo largo de los años la ciencia y la tecnología se han vinculado desde diversos campos de la medicina, física, biología, química, metalurgia e industria para encontrar métodos y técnicas que permitan desarrollar el mundo, es así como los hallazgos de Röntgen<sup>1</sup> dieron lugar a la implementación de lo que hoy por hoy se conoce como radiografía. La radiografía industrial, utilizada desde hace 100 años, permite obtener información relevante del estado de un componente por medio del registro en una película después de someterlo a radiación. Este método de ensayos no destructivos permite una evaluación volumétrica, siendo muy utilizado en el control de calidad, inspeccionándose soldaduras, piezas fundidas y componentes industriales.

El desarrollo y obtención de imágenes radiográficas digitales fue pionero en el campo de la medicina. A partir de los años 80 se obtuvieron los primeros radiogramas, los cuales se registraron en casetes digitales de fósforo revestido, dando lugar a lo que se conoce como imagen digital (Ozcete et al.,2015). Con el paso del tiempo, la imagen digital fue ganando aceptación dando paso a su uso en otros campos de investigación para el desempeño industrial, pensándose en el diagnóstico de materiales, piezas y componentes.

Inmersos en el desarrollo tecnológico, las mejoras en las técnicas de inspección son inevitables, es así como el paso de la radiografía convencional con películas a la radiografía digital computarizada va teniendo cada vez, más fuerza. El uso de la radiografía digital supone ventajas para el desarrollo industrial, sin embargo, estos procesos de cambio e implementación de mejoras tienen costos, normativa y capacitación asociados. Es importante mencionar que se ha establecido,

---

<sup>1</sup> A Röntgen se le atribuye el descubrimiento de los rayos X y la primera radiografía de la historia.

a partir de estudios de investigación, que es adecuado el reemplazo de la película radiográfica por la tecnología digital de los casetes CR (Ewert, Zscherpel y Bavendiek, 2016). En este trabajo de investigación se destacan las ventajas de la radiografía digital a partir de la evaluación comparativa en términos de rango dinámico, sensibilidad y procesamiento con relación a la radiografía convencional.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar comparativamente los resultados obtenidos en la inspección de piezas metálicas por radiografía industrial convencional y radiografía digital.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Comparar diversas películas radiográficas de uso en radiografía industrial convencional para seleccionar la de mejor desempeño.
- Analizar comparativamente la latitud de exposición de las técnicas de radiografía industrial convencional y digital.
- Evaluar las diferencias en procedimiento y calidad de imagen radiográfica para la inspección de piezas de geometría compleja por las técnicas de radiografía industrial convencional y digital.
- Estudiar la sensibilidad de las discontinuidades a partir de las técnicas de radiografía industrial convencional y digital.

## **2. Marco referencial**

El método radiográfico utilizado en la industria involucra tres técnicas. La radiografía convencional implica la evaluación a partir de películas radiográficas, esta técnica fue la primera en utilizarse para la inspección de componentes en la industria y continúa siendo la más empleada. A partir de los años 90 comenzó el desarrollo del concepto digital, dando lugar a la radiografía digital computarizada. Por último, el avance tecnológico ha permitido, recientemente, el desarrollo de la técnica de radiografía digital directa con detectores digitales. En este proyecto se hará un estudio comparativo de las dos primeras técnicas.

### **2.1 Técnica de radiografía industrial convencional**

La radiografía industrial convencional es utilizada en la inspección no destructiva de múltiples componentes, estructuras, equipos y piezas. Esta técnica involucra tres variables fundamentales: la fuente energética de rayos X o Gamma, la pieza a inspeccionar y la película radiográfica como medio de registro que permite almacenar la imagen formada por la radiación que logra atravesar la pieza. Los generadores de rayos X aceleran una cantidad controlada de electrones, a partir de la corriente utilizada con campo eléctrico de potencial controlado, el haz de electrones impacta en un material (Wolframio, generalmente), y este libera rayos X (Manzoni, 2016).

De otro lado, los rayos Gamma se producen por la desintegración de núcleos atómicos de un elemento radiactivo. En cualquier caso, la radiación se atenúa al atravesar la pieza, debido a la

diferencia de densidades, espesores y discontinuidades presentes, es decir, la radiación se absorbe según la masa y densidad generando información que queda registrada en la película radiográfica. Para la inspección, la fuente de radiación se sitúa a un extremo de la pieza a inspeccionar y en el extremo opuesto se posiciona el medio de registro que, en la técnica convencional es la película o filme; justo como lo muestra el esquema de la figura 1.

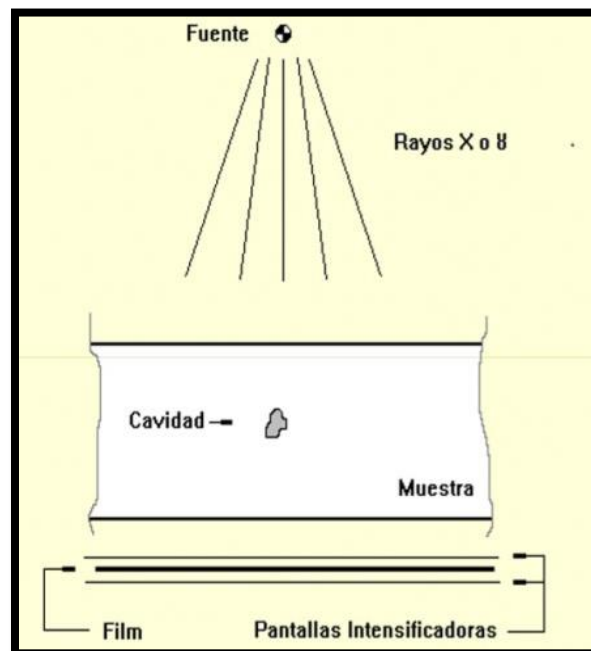


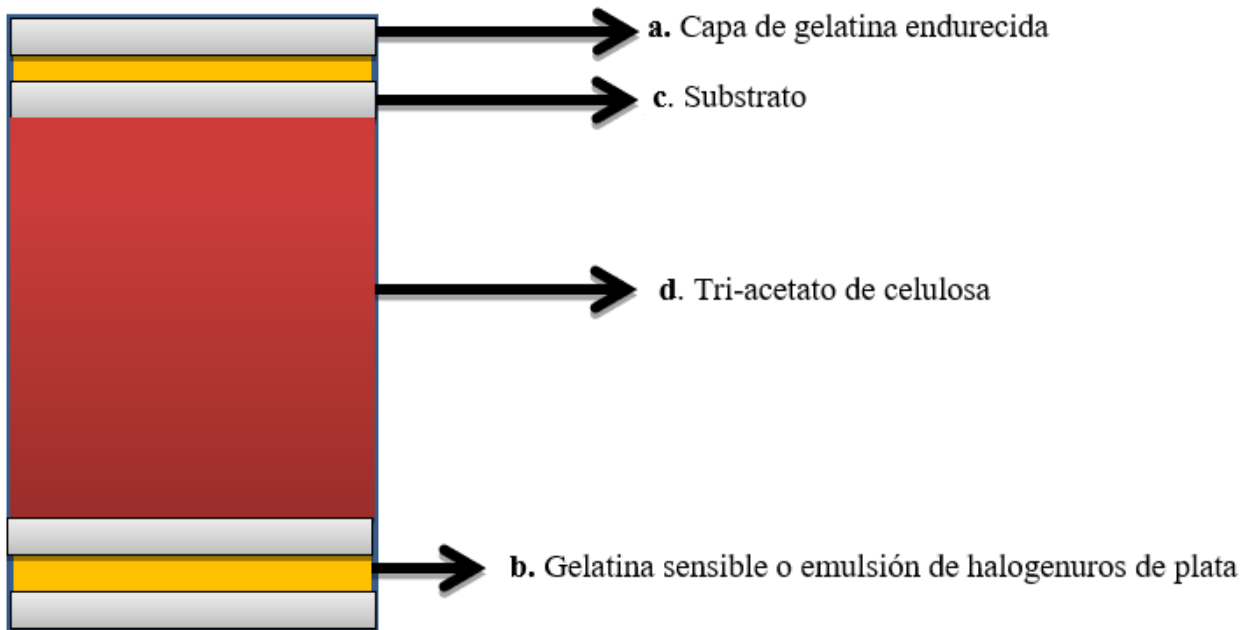
Figura 1. Esquema básico de radiografía convencional. Tomado del Manual Radiografía Industrial AGFA (1989).

Es importante mencionar que se debe definir un diagrama de exposición de acuerdo con el espesor de inspección, ya que la energía de radiación debe ser seleccionada de forma que interactúe con el medio, atravesando el espesor de material.

Entonces cada pieza o elemento a inspeccionar, de acuerdo con su espesor y para una energía determinada, tendrá una cantidad de radiación específica en función del tiempo de exposición necesaria para la formación de la imagen en la placa.

De la figura 1 también se puede observar la proyección de la discontinuidad en la película. Este medio de registro está contenido en un bastidor, que lo protege de la luz y a su vez permite el paso de la radiación. Cuando la energía a utilizar es superior a los 110 keV, se hace necesaria la utilización de pantallas intensificadoras de Pb, que tienen la propiedad de emitir electrones para intensificar la imagen, disminuyendo el tiempo de exposición y absorbiendo la radiación secundaria dispersa producida por la interacción Compton (General Electric [GE], 2006, p.23).

**2.1.1 Medio de registro.** La película radiográfica utilizada como medio de registro se compone de una base transparente de tri-acetato de celulosa o poliéster (marcada como d en la figura 2), recubierta a ambos lados por una capa muy delgada llamada sustrato que une la capa de emulsión a la base (marcado como c en la figura 2), esta capa de emulsión está suspendida en gelatina, sensible a la radiación (marcada como b en la figura 2) y una capa de gelatina endurecida para proteger la emulsión (marcada como a en la figura 2) (Agfa – Gevaert N.V [AGFA], 1989,p.51). Para realizar una radiografía se tiene en cuenta un procedimiento a partir de cada pieza, basado en el código ASME V artículo 2 (2013).



*Figura 2.* Estructura de la película radiográfica. Adaptado del libro Radiografía Industrial, técnicas de formación de imagen. (2008).

**2. 1.2 Procedimiento de la película radiográfica.** En la exposición la radiación actúa sobre los halogenuros de plata y los activa proporcionalmente a su incidencia, quedando una imagen latente, completa e invisible en la capa fotosensible (Agfa – Gevaert N.V [AGFA], 1989, p.52). Las fases realizadas para obtener la imagen visible son:

- **Revelado:** En esta etapa se transforma la imagen latente, ya que se reducen selectivamente los halogenuros de plata parcialmente transformados a plata metálica de color negro (Agfa – Gevaert N.V [AGFA], 1989, p.52). A partir de la temperatura en que se encuentre el revelador (solución química acuosa que contiene agentes reveladores que afinan y regulan el proceso de revelado) en el cuarto oscuro, se determina un tiempo de permanencia para la película (Tablas establecidas por los fabricantes del material radiográfico).
- **Baño de parada:** En este baño se detiene el proceso de revelado.

- Fijado: En esta etapa se disuelven los halogenuros de plata no expuestos y se endurece la emulsión, se requiere un tiempo igual al doble del utilizado en el revelado.
- Baño final o lavado: En esta etapa se eliminan los productos químicos.
- Secado: Este aire caliente retira la humedad de la placa radiográfica.

**2. 1.3 Parámetros de evaluación.** Las películas radiográficas se evalúan según el grado de ennegrecimiento expresado en densidad radiográfica, que equivale a la relación de luz incidente y transmitida en la película, lectura que se realiza en el densitómetro. También como parámetro de calidad se utiliza la verificación de visibilidad de los indicadores de calidad de imagen (ICI) tipo hilo ASTM E747-04, DIN54109 e ISO 19232-1 y 2 (2013).

## 2.2 Técnica de radiografía industrial digital

Al igual que en la radiografía convencional, en esta técnica radiográfica digital computarizada se utiliza un elemento a inspeccionar y una fuente de energía, pero se varía el medio de registro que deja de ser una película radiográfica convencional y pasa a ser placas de imagen CR - IP. Esta técnica evidencia un híbrido entre analógico y digital (Manzoni, 2016).

**2. 2.1 Medio de registro.** Las placas de imagen están formadas por fósforo fotoestimulable (siendo una mezcla de granos finos unidos de flúor, bario y bromo) sobre un respaldo plástico y con capas de protección tanto mecánica como eléctrica (casete CR). Cuando estas placas son irradiadas, logran almacenar parte de la energía, quedando una imagen latente, siendo necesaria la

ayuda de un escáner, el cual barre la imagen con un láser de longitud de onda adecuado para la liberación de luz y así obtener la imagen visible, que se encontrará en formato digital. En la figura 3 se observa la composición de la placa de imagen usada en la radiografía digital computarizada.

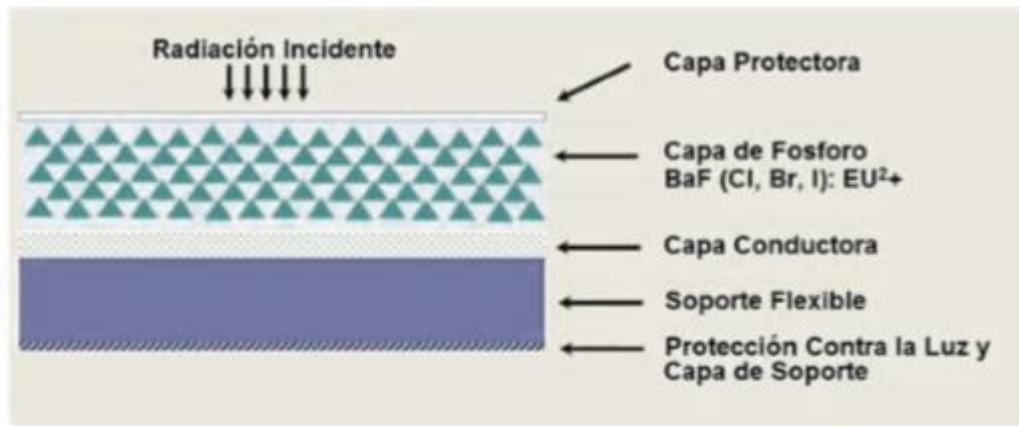


Figura 3. Composición de la imagen IP. Tomada de la norma ASTM E-2007.

**2. 2.2 Evaluación de calidad.** Para establecer la calidad de imagen, se utilizan tanto los ICI de hilos o de plaquetas, implementándose las normas ISO 19232-1, 2, 3, 4 y 5 para la detección digital, que aseguran la calidad en la técnica convencional, como también un ICI de hilo Dúplex a partir de la norma ISO 17636 parte 1 y 2, que se compone de pares de hilos de tungsteno o platino de diámetros decrecientes y separados entre sí por una distancia igual a su diámetro. La imagen digital estará representada con los valores de grises, que son equivalentes al ennegrecimiento de la película. Tiene involucrado el píxel, es decir el uso de estas nuevas tecnologías implica pasar de la utilización del negatoscopio y densitómetro, con el término de Densidad óptica, al uso de un software para la visualización de imágenes (Castaño, 2013), con Resolución Espacial Básica y Relación Señal Ruido mínimas y máximas como parámetros para que la imagen digital sea aceptada según la norma ISO 17636-2 como indicadores de calidad.

### 3. Metodología

El desarrollo del trabajo estuvo enfocado en evaluar la técnica de radiografía convencional respecto a la técnica digital computarizada (CR-IP) a partir de un análisis comparativo.

#### 3.1 Rendimiento de películas

Para iniciar con la comparación propuesta en este proyecto, se dispuso de dos tipos de películas de distintos fabricantes que se denominarán A y B para proteger su identidad comercial. La premisa estaba en comprobar si las películas suministradas por B, (clase I y II), respondían y eran proporcionales a las que se venían utilizando y que eran fabricadas por A, (clase I y II), con el objetivo de definir el rendimiento más adecuado, para ser utilizadas posteriormente en el desarrollo de comparación de las técnicas. Por otra parte, el objeto a inspeccionar es una cuña sensitométrica de acero al carbono (figura 4) que contenía espesores entre: 5 y 45 mm.



*Figura 4.* Escalerilla o cuña sensitométrica de Acero al Carbono.

Se continuó con la determinación del procedimiento para obtener el rendimiento de las películas, con lo cual se hizo necesario ensayar con 2 radiaciones diferentes, rayos X y rayos Gamma mediante fuentes de Iridio 192 y Cobalto 60 (fuentes disponibles en el laboratorio).

Se expusieron los espesores de 20, 45 y 17,5 mm a partir del diagrama de exposición, según la energía con gammagrafía (Iridio 192 y Cobalto 60) y rayos X, como se muestra en la tabla 1, con sus respectivos tiempos de exposición.

**Tabla 1.**

*Condiciones de exposición para cada película A y B*

TIPO DE PELÍCULA	Clase II A	Clase II B	Clase I A	Clase I B	
<b>Fuente</b>	<b>Exposición (min)</b>			<b>Espesor (mm)</b>	
<b>Iridio -192</b>	13,30	13,30	40	40	20
<b>Cobalto 60</b>	1,40	1,40	4,35	4,35	45
<b>RX 160 kv</b>	6	6	17,3	17,3	17,5

### 3.2 Latitud de exposición

Para definir el rango dinámico de las dos técnicas de radiografía industrial se utilizó una cuña sensitométrica de acero al carbono con espesores menores a la utilizada en el ítem anterior (de 1 a 17 mm), producto de la energía de rayos X manejada; para obtener una imagen con diferentes ennegrecimientos. En la tabla 2 se muestran las condiciones de exposición de la escalera para las dos técnicas de radiografía industrial empleadas.

**Tabla 2.**

*Condiciones de exposición de la escalera de Acero al Carbono para las dos técnicas radiografía industrial*

*Continuación Tabla 2.*

Técnica	Espesor (mm)	Tensión (kV)	Intensidad (mA)	Tiempo de exposición (min)	Medio de registro	Distancia foco-filme (mm)
<b>Radiografía convencional</b>	7	120	4.5	5.35	Película - Clase I A	920
<b>Radiografía digital</b>	7	140	4.5	1.40	CRxflex	920

### 3.3 Consecución de radiografías para piezas de geometría variable

En este ítem de comparación se partió de la obtención de una radiografía en óptimas condiciones para las dos técnicas (convencional y digital) en piezas con geometría variable. Empleándose dos fundiciones de diferente material, un soporte de fundición de aluminio figura 5.



*Figura 5.* Fundición de Aluminio (soportes de Aluminio).

y una tapa de compresor de Acero figura 6.



*Figura 6.* Tapa de compresor de Acero.

En la fundición de acero se realizaron en total 4 radiografías hasta encontrar la que cumpliera con los parámetros de calidad; Las condiciones de exposición para las radiografías se muestra en la tabla 3 con un espesor promedio de 14 mm. Por otra parte, se tiene en cuenta el concepto de absorción y la presencia de radiación difusa debido a que el nivel energético empleado está por encima de los 110 keV (efecto Compton), que se controla con las pantallas intensificadoras de plomo y a su vez la utilización de compensación de espesores por medio de polvo de Hierro o Aluminio, según corresponda, disminuyendo de esta manera el contraste radiográfico producido por la diferencia de espesores. Por tanto, las condiciones de radiografiado son: 1) Sin compensación - Sin pantallas intensificadoras, 2) Sin compensación - Con pantallas intensificadoras, 3) Con compensación - Sin pantallas intensificadoras y 4) Con compensación – Con pantallas intensificadoras.

**Tabla 3.**

*Condiciones de exposición de la fundición de Aluminio y Acero para las dos técnicas de radiografía industrial*

Material	Técnica	Espesor (mm)	Tensión (kV)	Intensidad (mA)	Tiempo de exposición (min)	Medio de registro	Distancia foco-filme (mm)	ICI
Acero	Radiografía convencional	14	160	4.5	2.45	Película - Clase I A	920	Hilos 1-4 ASTM SET B
	Radiografía digital	14	180	4.5	1.40	CRxflex	920	Hilos 1-4 ASTM SET B, Dúplex
Aluminio	Radiografía convencional	15	70	2.5	5.15	Película - Clase I A	920	Hilos 8-13 DIN
	Radiografía digital	15	80	2.5	1.4	CRxflex	920	Hilos 8-13 DIN, Dúplex

En la fundición de aluminio se realizaron 2 radiografías, ya que la energía a exponer que se muestra en el diagrama de exposición de la tabla 3, se encuentra por debajo de los 110 keV, producto de la absorción y densidad del material. Por lo tanto, las condiciones son: 1) Sin compensación y 2) Con compensación. Por otra parte, se realizó 1 radiografía digital computarizada por cada pieza de inspección.

### 3.4 Sensibilidad de defectos

Para esta etapa se seleccionaron dos piezas de diferente material: Aluminio- Soldadura por fricción agitación figuras 7-8, y Acero-Soldadura por el electrodo revestido de Acero al Carbono figura 9.



*Figura 7.* Soldadura por fricción agitación 1.



*Figura 8.* Soldadura por fricción agitación 2.



*Figura 9.* Soldadura de Acero al Carbono.

Cabe resaltar que se tomaron dos soldaduras de Aluminio, porque en la primera que se radiografió, los defectos no eran tan apreciables, por tanto, se seleccionó otra soldadura por fricción agitación, dispuesta como material de estudio en el taller de soldadura del CNEA-ENDE.

Según el espesor se determinaron las siguientes condiciones de exposición en ambas técnicas industriales, que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.**

*Condiciones de exposición del Acero y Aluminio para las dos técnicas de radiografía industrial*

Material	Técnica	Espesor (mm)	Tensión (kV)	Intensidad (mA)	Tiempo de exposición (min)	Medio de registro	Distancia foco-filme (mm)	ICI
Acero	Radiografía convencional	12.5	140	4.5	4.40	Película - Clase I A	920	Hilo 2 ASTM SET B
	Radiografía digital	12.5	180	4.5	1.00	CRxflex	920	Hilo 2 ASTM SET B, Dúplex
Aluminio	Radiografía convencional	12	70	2.5	5.35	Película - Clase I A	920	Hilos 8-13 DIN
	Radiografía digital	12	80	2.5	3.0	CRxflex	920	Hilos 8-13 DIN, Dúplex

## 4. Resultados y análisis

### 4.1 Rendimiento de película

En las películas radiográficas obtenidas se verificó el cumplimiento de los parámetros de calidad: densidad radiográfica, contraste asociado y visibilidad de los ICI tipo hilos ASTM set B (hilo 3) norma ASTM E 747-04. La densidad radiográfica es superior a 2 cumpliendo con los requerimientos de calidad según el código ASME V artículo 2 (2013), medida en el escalón (espesor señalado) correspondiente al cálculo de la exposición obtenida con el densitómetro, lo que permite definir un buen contraste con valores que cumplen los estándares de calidad. Los resultados de las clases de películas A-B clase I y II se muestran en la tabla 5. Por otra parte, también se muestran los esquemas del contraste en las figuras 10, 11 y 12, según el tipo de energía

utilizada. A partir de la comparación entre las clases I-II de películas A y B, se logró determinar la similitud de respuesta para las películas A y B (clase II), ya que la diferencia de densidad no supera un error del 5 %, esto se mantiene tanto en la utilización de gammagrafía como con rayos X. Por ejemplo, cuando ambas placas fueron expuestas con Iridio 192, con las mismas condiciones de exposición, la densidad obtenida fue de 2.4 para la película A (clase II) y de 2.3 para la película B (clase II), de igual forma cuando se utilizó la fuente radiactiva de Cobalto 60, la densidad medida en la película A (clase II) fue de 2.3 y para la película B (clase II) de 2.4. En la tabla 5 también se puede apreciar un contraste similar, mientras que la definición y el color tienen diferencias. Por otra parte, para la película A (clase I), al ser expuesta con la fuente radiactiva de gammagrafía los datos de densidad radiográfica fueron 2.1 y 2.2 respectivamente tanto para Iridio 192 como para Cobalto 60. A diferencia de esto para la película B (clase I) la densidad en ese mismo sentido fue de 3.4-3.1 con los mismos parámetros de exposición. Al utilizar Rayos X de 160 Kv en la película A (clase I) se midió una densidad radiográfica de 2.7 y 3.2 para la B (clase I). Con lo anterior se puede afirmar que estas películas no presentan una equivalencia en su respuesta para diferentes energías. La densidad radiográfica para la película B (clase I) es mayor en todas las energías por ende es mucho más rápida, lo que significa un tiempo de exposición menor que con la película A (clase I). Lo que también se obtuvo respecto a estas dos películas, es que presentan un contraste similar. Dado que en las películas B, clase I y II no se contaba con su equivalente digital en el laboratorio, se decidió la realización del presente trabajo con películas marca A clase II. Esta presenta un desempeño apropiado y se tiene su sistema equivalente de placa de imagen, en funcionamiento. Las radiografías obtenidas se agregaron en los apéndices C, D y E en formato digital.

**Tabla 5.**

*Resultados de exposición de la escalerilla de acero para un espesor específico en mm, en donde se representa, d: densidad, t: tiempo de exposición (minutos), C1: contraste 1 y C2: contraste 2 definido con la relación de espesores de las figuras 10-12*

Película	Clase II-A				Clase II-B				Clase I-A				Clase I-B				Espesor
	d	t	C1	C2	d	t	C1	C2	d	t	C1	C2	d	t	C1	C2	
<b>Ir-192</b>	2,4	13,3	0,3	0,26	2,3	13,3	0,2	0,3	2,1	40	0,3	0,3	3,4	40	0,3	0,36	20
<b>Co-60</b>	2,3	1,4	0,5	0,4	2,4	1,4	0,5	0,5	2,2	4,35	0,55	0,4	3,1	4,35	0,6	0,46	45
<b>RX-160</b>	2,5	6	0,8	1,15	2,6	6	0,8	1,2	2,7	17,3	0,95	1,4	3,2	17,3	1	1,25	17,5

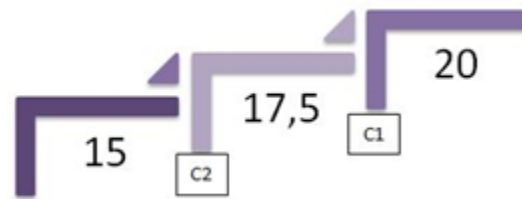


Figura 10. Rayos X 160 kV.

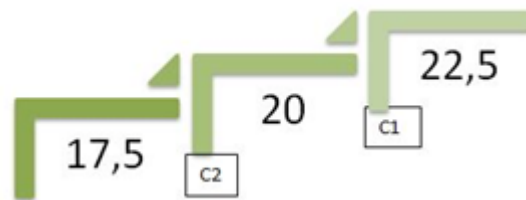


Figura 11. Iridio 192.

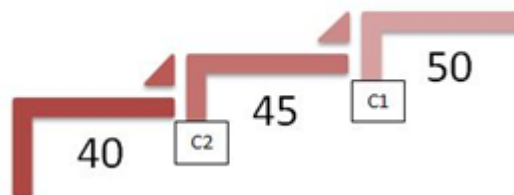


Figura 12. Cobalto 60.

## 4.2 Resultados de rango dinámico

La radiografía obtenida de forma convencional fue escaneada y procesada en formato digital con el escáner para filme GE FS50 (12 Bits) y el escáner de IP GE CRxflex (16 bits) para la radiografía digital. El procesamiento se realizó usando el programa *IC.exe "ISee"* (Software de visualización de imágenes) y el resultado se muestra en la figura 13.

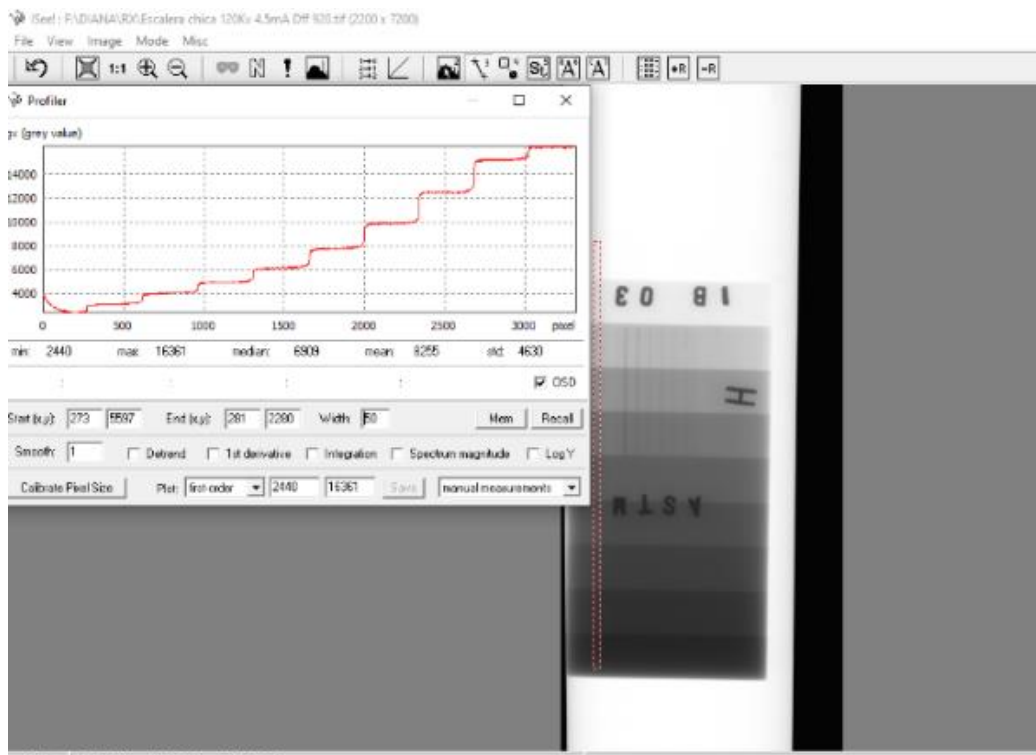


Figura 13. Radiografía convencional digitalizada por el escáner.

En esta figura se logra observar en primera instancia, que la imagen de salida digital es positiva, ya que la zona clara tiene más radiación, esto describe todo lo contrario a lo que convencionalmente se tiene en la radiografía industrial por película en negativo (General Electric

[GE], 2006, p.148)., la zona más oscura presenta más radiación. Por lo tanto, para poder realizar una comparación, se hace necesario llevar la imagen digital a negativo. Luego en segunda instancia con la herramienta perfilador se observa que la respuesta del detector es lineal, ya que el escáner aplica un *Look Up Table* (LUT) intrínseco logarítmico de 12

bits (estipulado en las especificaciones técnicas de la compañía fabricante), lo que claramente no representa la curva sensitométrica asociada a una película, que describe una curva exponencial.

Por lo tanto, para revertir el proceso se construyó con los valores de densidad medidos para cada escalón de la película, la curva sensitométrica figura 14.

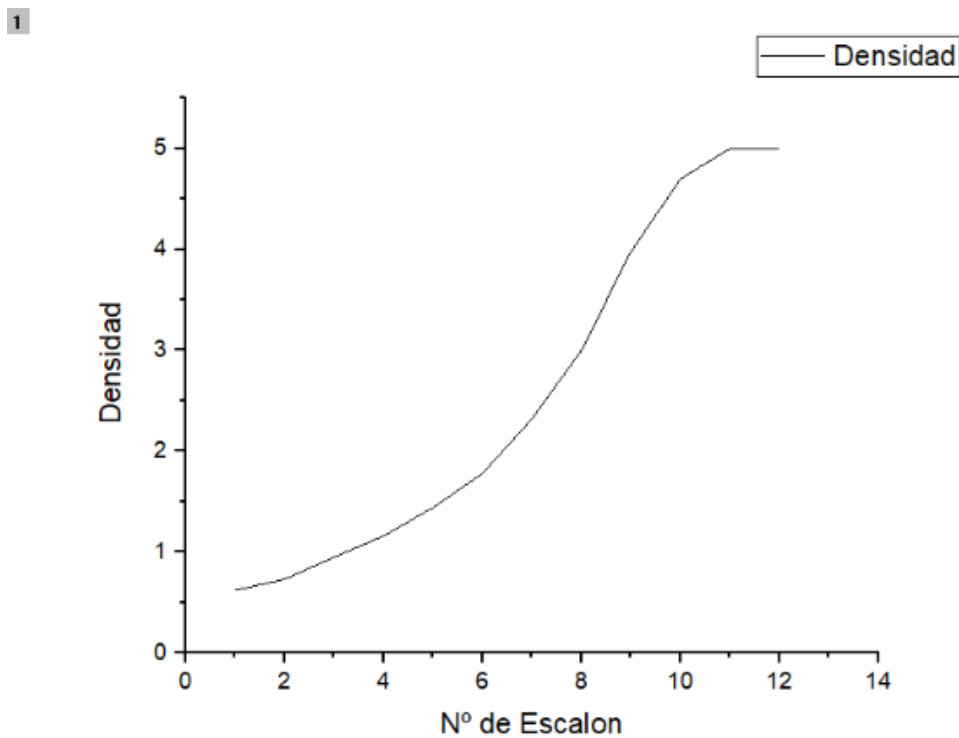


Figura 14. Curva construida con valores de densidad medida para los 12 escalones de la escalerilla.

Estos valores permiten obtener otro LUT correlacionando los valores de grises, al aplicarlo en la radiografía por el software de visualización se obtiene la figura 15 que representa la radiografía en negativo y la respuesta a la dosis igual a la curva sensitométrica.

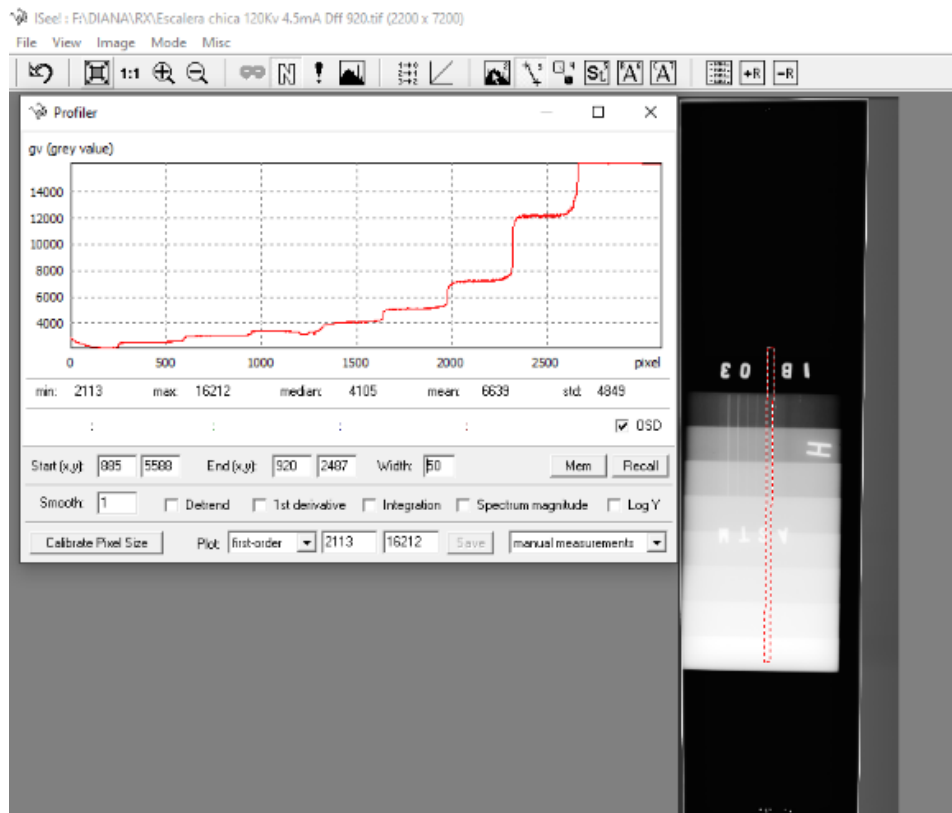


Figura 15. Radiografía convencional con el LUT de visualización de película.

La radiografía digital se muestra en la figura 16, donde se observa la relación lineal de valor de gris y el píxel, en la curva se describe esta función.

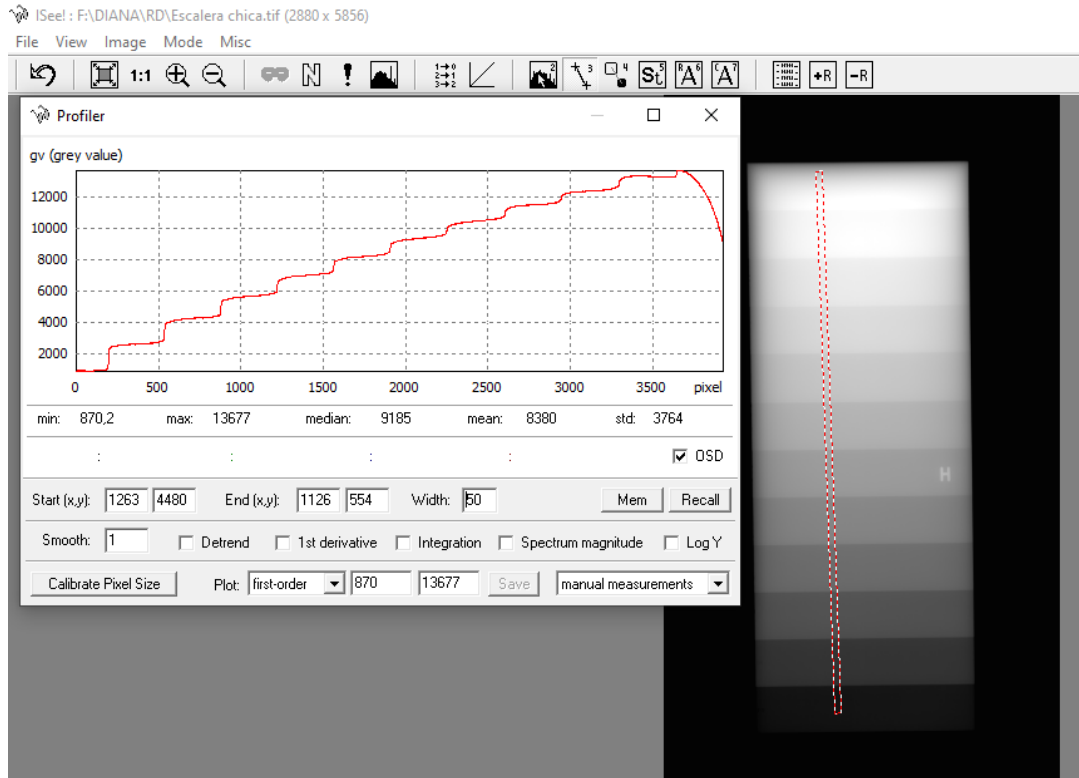
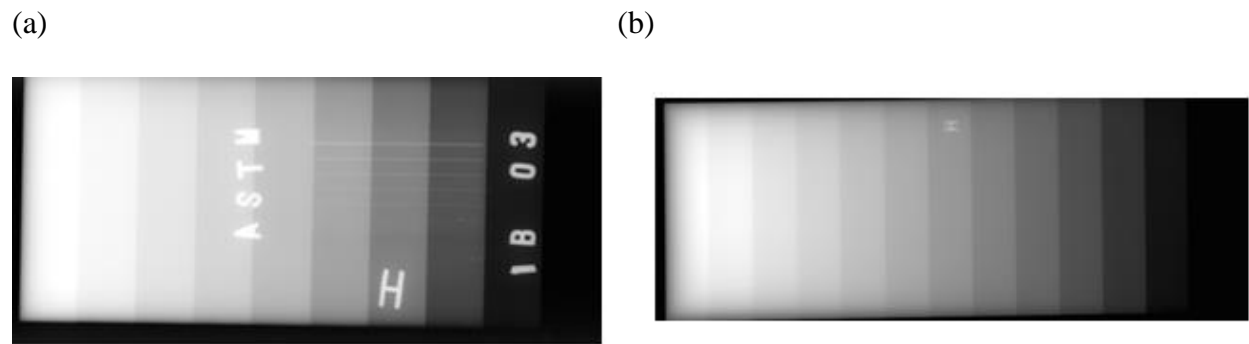


Figura 16. Radiografía digital de la escalerilla de Acero al Carbono.

Entonces comparando con la radiografía convencional de la figura 15, se observa que la radiación que reciben los cristales de la placa CR- placa de fósforo tiene una asignación lineal (General Electric [GE], 2006, p.151) esto es parte del desarrollo investigativo de la implementación de las IP, lo que permite observar una mayor cantidad de escalones con un adecuado contraste; en la radiografía digital de la figura 17 (b), se logran contar los 12 escalones definidos con un buen contraste. A diferencia de la película digitalizada mostrada en la figura 17 (a), en donde se pueden contar solo 9 escalones, esto se debe a que en el filme los haluros de plata (cristales de plata) responden exponencialmente, esto ha sido evidente en el funcionamiento de las películas en el campo médico e industrial (Martino, 2006), lo que muestra que va a tender a

saturarse en un determinado punto, con una densidad máxima. Es importante mencionar que, para la radiografía digital al ser lineal la respuesta entre la dosis y el valor de gris (intensidad) se pueden radiografiar mejor las diferencias entre espesores (Ewert, Zscherpel y Bavendiek, 2007). Esta característica es crucial en las piezas de geometría variable como las fundiciones que posteriormente se analizarán.



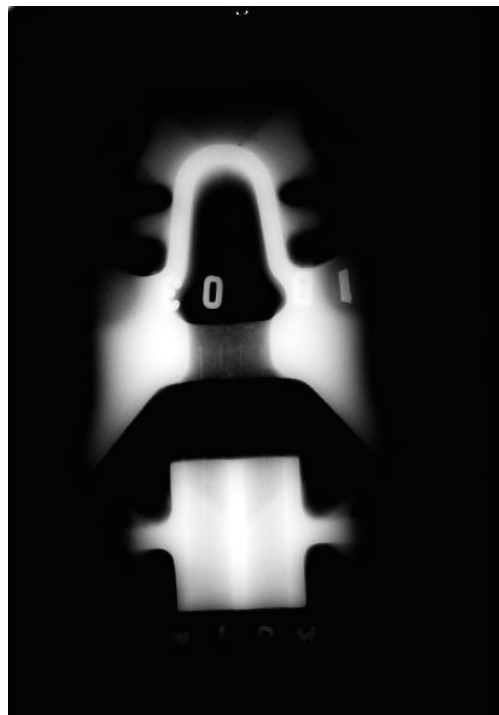
*Figura 17.* Radiografías con la técnica convencional (a) y digital computarizada (b).

### **4.3 Resultado de radiografías para piezas con geometría variable**

En la comparación de las radiografías se observó que las piezas presentaban discontinuidades producto de su trabajo en servicio. Una fisura para la tapa del compresor de Acero y porosidades para la fundición de Aluminio.

#### **4.3.1 Radiografía con la técnica convencional para la tapa de compresor de Acero**

**4. 3.1.1 Radiografía sin compensación – sin pantalla.** En la figura 18 se observa la primera radiografía obtenida sin compensación y sin pantalla reforzadora, en esta radiografía no se logran definir los bordes de la pieza, se denotan dos zonas: una clara y la otra oscura. En la zona clara se encuentran los bordes y la parte central de la pieza que presenta mayores espesores, por ende, su tonalidad. Se midió una densidad de 2.4, mientras en la zona oscura que presenta menores espesores se midió una densidad de 4.5. Por otra parte, en el ICI de hilos del Set B colocado sobre la pieza no se observa con tanta definición el hilo N°1 y solo en un 40 %. Este hilo debe garantizar la calidad de la zona oscura, pero se ve sólo en la zona clara. Mientras el hilo N°4 del SET B que garantiza la calidad de la zona clara, se logra observar en ambas zonas. Por lo anterior, se tiene una radiografía que no cumple con la calidad correspondiente, ya que solo se garantiza la densidad y no el buen contraste y definición. Esta densidad para fundiciones debe encontrarse según Código ASME en un rango de 1.5-4.0.



*Figura 18.* Radiografía tapa de compresor sin compensación - sin pantalla.

**4. 3.1.2 Radiografía sin compensación – con pantalla.** En la radiografía de la figura 19, se logran definir los bordes, que presentan un mayor espesor, aunque en la parte central no se obtiene un buen contraste, con lo cual es importante mencionar que al igual que la radiografía de la figura 19, esta falta de definición no permite observar las posibles discontinuidades, ocultando información en esa zona, ya que en la zona más oscura, de menor espesor, la pieza presenta una fisura, que se hará evidente en la figura 21, señalado con la flecha naranja. La densidad como parámetro de calidad fue medida en las dos zonas: la zona clara tiene una densidad de 1.8 y la zona oscura de 4.3, ésta no se encuentra en calidad, ya que el rango útil de densidad según el Código ASME V es de 1.5-4.0, como se mencionó anteriormente. En el indicador de calidad de imagen de hilo del SET B, se observa el hilo N°4 que asegura la calidad de la zona clara, pero el hilo N°1 que asegura la calidad de la zona oscura, no se logra observar. Lo anterior muestra que la radiografía no cumple con los requerimientos de calidad.

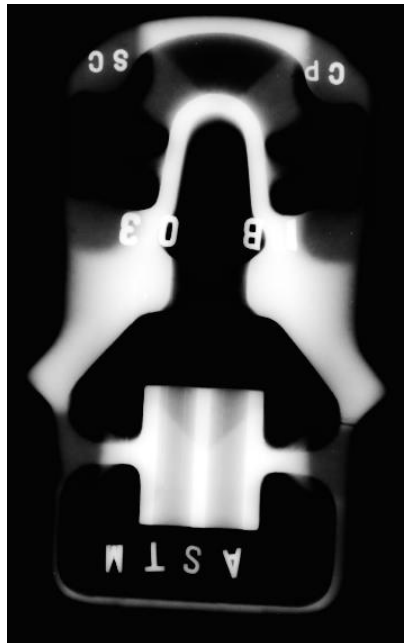
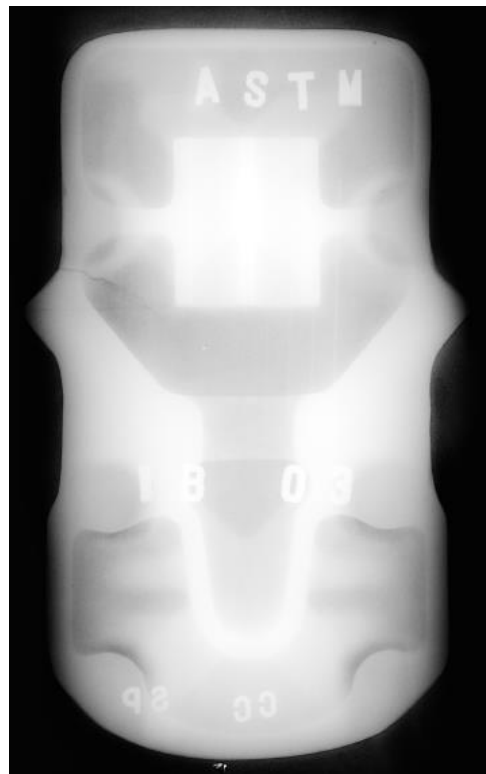


Figura 19. Radiografía tapa de compresor sin compensación - con pantalla.

**4. 3.1.3 Radiografía con compensación – sin pantalla.** En la radiografía de la figura 20, se observa una mayor definición, aunque algunos detalles de la geometría interna no se muestran. La densidad para la zona clara es de 1.7 y la densidad de la zona oscura es de 2.1, encontrándose los dos en términos de calidad, sin embargo, los hilos 1 y 4 no se logran ver con tanta definición ni en su totalidad. Aquí se evidencia como la compensación permite obtener una absorción más uniforme (reducción brusca del contraste radiográfico debido a la diferencia de absorción), que también se ve reflejado en la densidad más uniforme obtenida. De nuevo la radiografía obtenida no es óptima pues el contraste es muy reducido.



*Figura 20.* Radiografía tapa de compresor con compensación - sin pantalla.

**4. 3.1.4 Radiografía con compensación – con pantalla.** En la radiografía de la figura 21 se tiene una mejor definición y contraste, se aprecia la diferencia de espesores con una mayor nitidez. Los parámetros de calidad radiográfica muestran que la radiografía se encuentra dentro de los parámetros correctos según el Código ASME V artículo 2. En términos de densidad se tiene 1.8 para las zonas claras y 2.8 para las zonas oscuras, ambos valores se encuentran dentro del rango del referido código. Los hilos correspondientes del ICI también se observan claramente en toda la pieza. Así pues, en la radiografía para piezas de geometría variable se debe tener en cuenta la compensación para la disminución del contraste radiográfico y la absorción uniforme en la pieza, a su vez el uso de las pantallas intensificadoras, que por encima de los 110 keV absorben la radiación secundaria difusa y emiten los electrones de Pb, intensificando la emulsión en proporción de la dosis que reciben, lo que mejora la definición y el contraste de detalles (Manual de Radiografía-AGFA. NDT, 1989). Esto se evidencia en la fisura que tiene un buen contraste, haciéndola más perceptible.

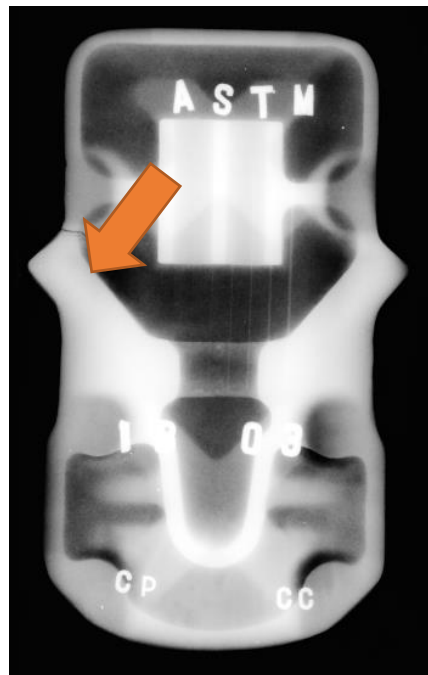


Figura 21. Radiografía tapa de compresor con compensación – con pantalla.

**4. 3.2 Radiografía con la técnica digital para la tapa de compresor de Acero.** En la figura 22 se observa la radiografía obtenida por la técnica digital, en la cual se tiene buen contraste y definición, que permiten la observación clara de la discontinuidad.

Para la radiografía digital, según los parámetros de calidad se tiene que, la resolución espacial básica por el espesor es 0,16 y la medida es 0,13. Mientras que la relación señal ruido normalizada mínima es 70 y la medida es 128 con el software de visualización. Los parámetros máximos y mínimos de la calidad se encuentran en la Norma ISO 19232-5 y 17636-2, que es equivalente a la Norma ASTM E2002-15. También es posible visualizar los hilos 1 y 4 del ICI ASTM-SET B.

Lo anteriormente mencionado evidencia que la radiografía digital se encuentra en calidad según los parámetros establecidos por la Norma, tanto para el material de Acero como para el Aluminio del numeral 4.3.4.

Una comparación de las figuras 22 y 23 obtenidas por las dos técnicas de radiografía industrial permite determinar que, aunque la información suministrada por ambas es similar, en la técnica digital no fue necesaria la realización de compensaciones, ni la utilización de pantallas intensificadores; las cuatro exposiciones realizadas por la técnica convencional quedan reducidas a una única exposición cuando se utiliza la técnica digital, lo que facilita la obtención de dichas radiografías.

Por otra parte, usando radiografía digital computarizada se observa la fisura con el mejor contraste, como se aprecia en la figura 23.



*Figura 22.* Radiografía digital tapa de compresor.

**4. 3.3 Radiografía con la técnica convencional para fundiciones de Aluminio.** En los soportes de Aluminio con la aplicación de la técnica convencional, se obtiene la primera radiografía sin compensación.

La imagen radiográfica obtenida no cumple con los parámetros de calidad de imagen puesto que, la densidad medida es de 1.4 y la visibilidad de los hilos 8-13, según la norma DIN54109, no se logran observar como se muestra en la figura 23.

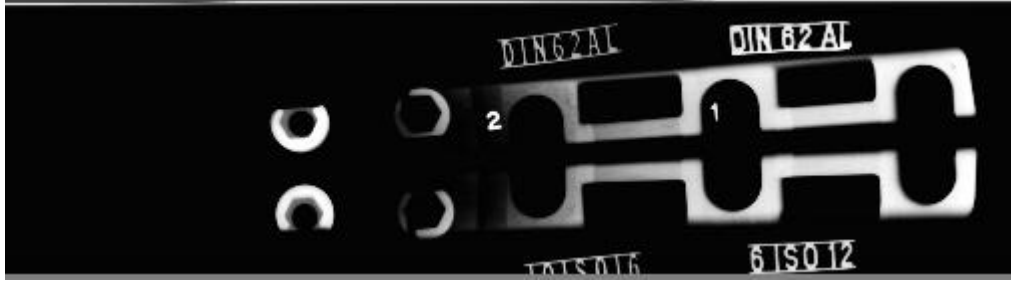


Figura 23. Radiografía fundición de Aluminio sin compensación.

Mientras en la radiografía con compensación de la figura 24, se obtiene una densidad correspondiente a 2.1 y la visibilidad de los hilos 8-13 según la norma DIN54109, además se observa un contraste adecuado que permite mostrar las discontinuidades de fabricación. También es importante mencionar que no es apreciable el efecto Compton, por el valor de la energía utilizada.



Figura 24. Radiografía fundición de Aluminio con compensación.

**4. 3.4 Radiografía con la técnica digital para fundiciones de Aluminio.** Al igual que en la radiografía de la tapa del compresor, con la técnica digital se obtiene una mejor radiografía sin la utilización de compensación, como se muestra en la figura 25. De tal modo que, solo es necesario realizar una única exposición para la radiografía digital mientras que, para la técnica convencional fue necesario realizar dos radiografías.

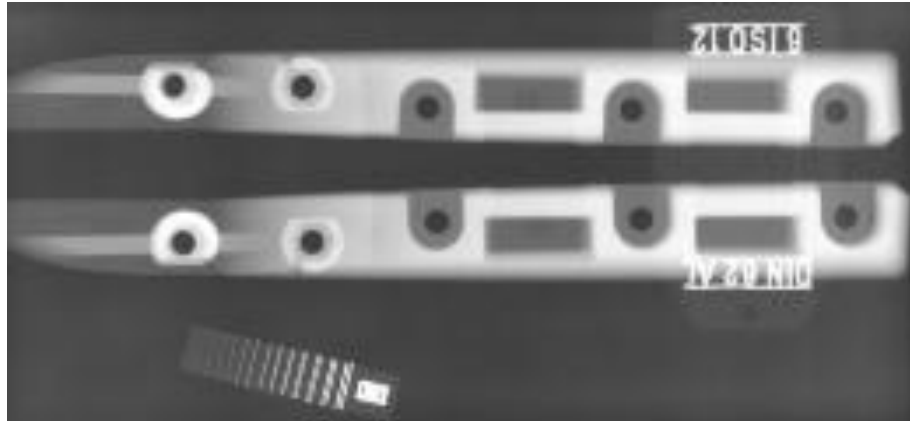


Figura 25. Radiografía digital fundición Aluminio.

#### 4.4 Resultados de sensibilidad de defectos

**4. 4.1 Soldadura de Acero.** La radiografía de la figura 26 fue obtenida por la técnica convencional con película, esta cumplió los parámetros de calidad con una densidad de 2.3 y visibilidad del hilo 2.

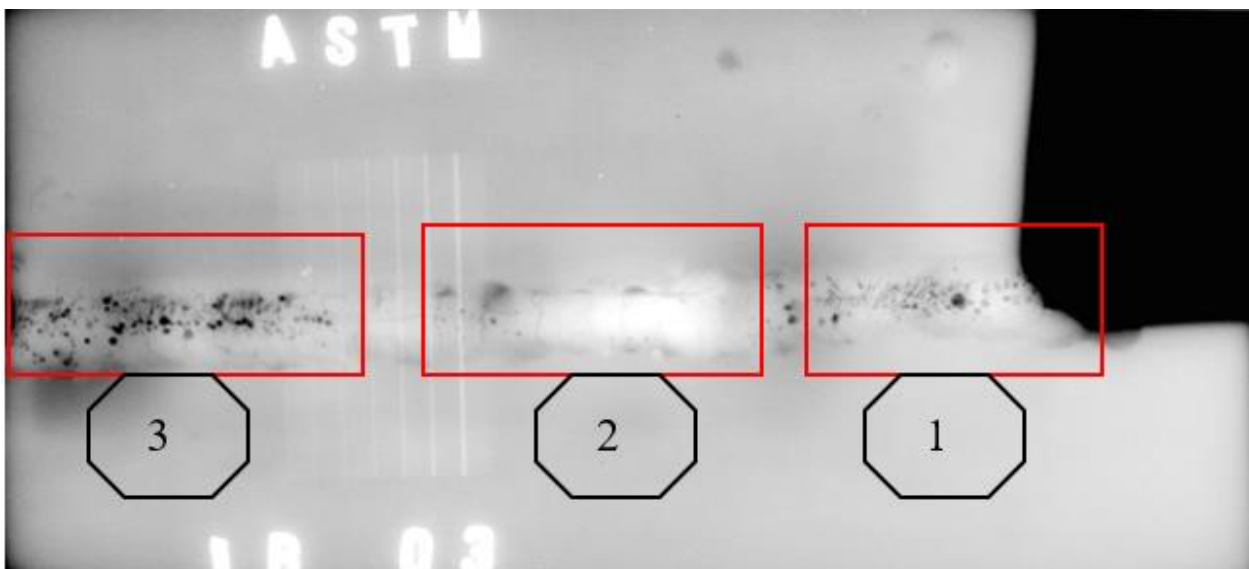
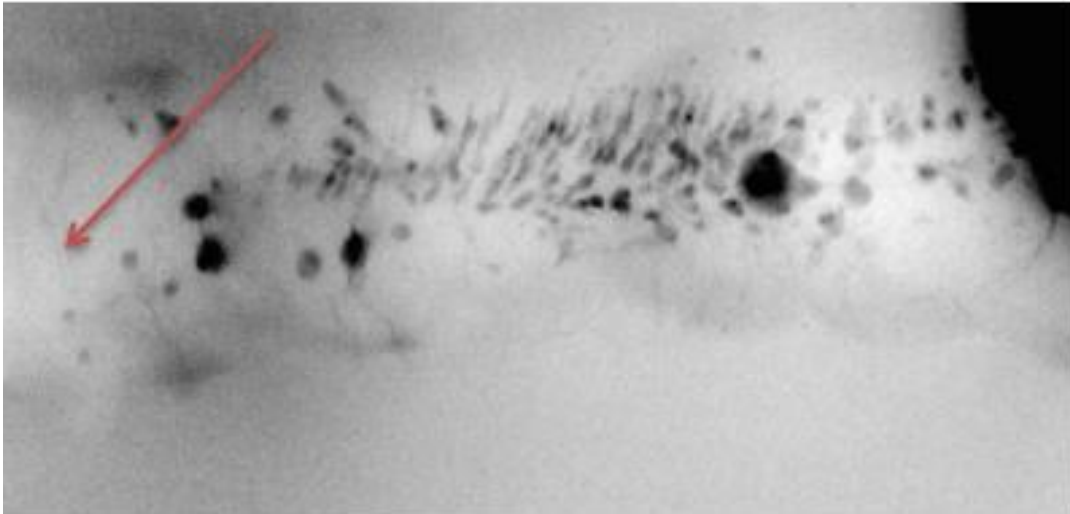


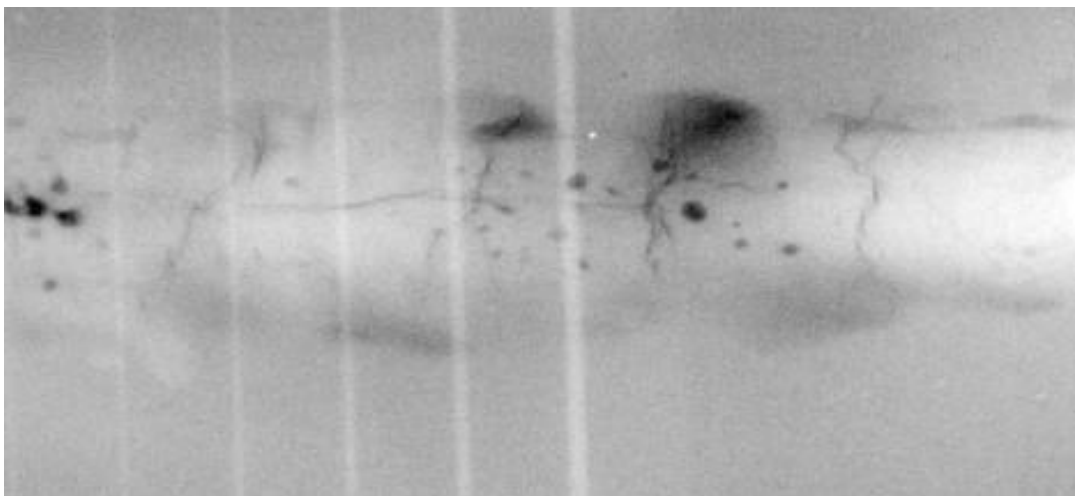
Figura 26. Radiografía soldadura de Acero al Carbono por la técnica convencional (RTC).

En la figura 27 se hace un acercamiento en el cordón de soldadura señalado como zona 1.



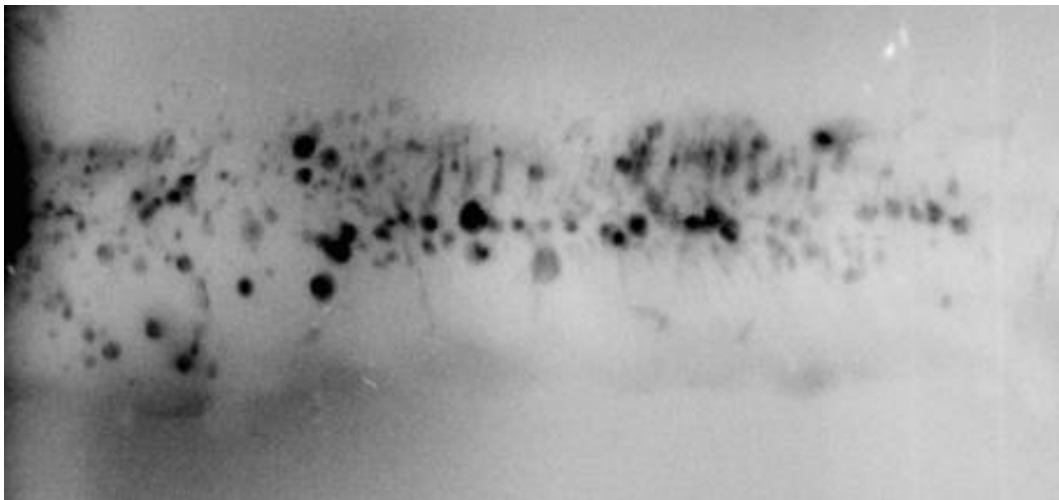
*Figura 27.* Cordón zona 1. Imagen obtenida por RTC.

El acercamiento al cordón señalado con la zona 2, se muestra en la figura 28.



*Figura 28.* Cordón zona 2. Imagen obtenida por RTC.

La zona 3 del acercamiento al cordón se muestra en la figura 29, Esto con el fin de establecer posteriormente las diferencias respecto a las discontinuidades con la radiografía obtenida por la técnica digital.



*Figura 29.* Cordón zona 3. Imagen obtenida por RTC.

Por otra parte, la figura 30 corresponde a la imagen radiográfica obtenida por la técnica digital. Al igual que en la radiografía de la figura 26, también se realizó un acercamiento al cordón en las mismas tres zonas indicadas, como se muestra en las figuras 31-33.

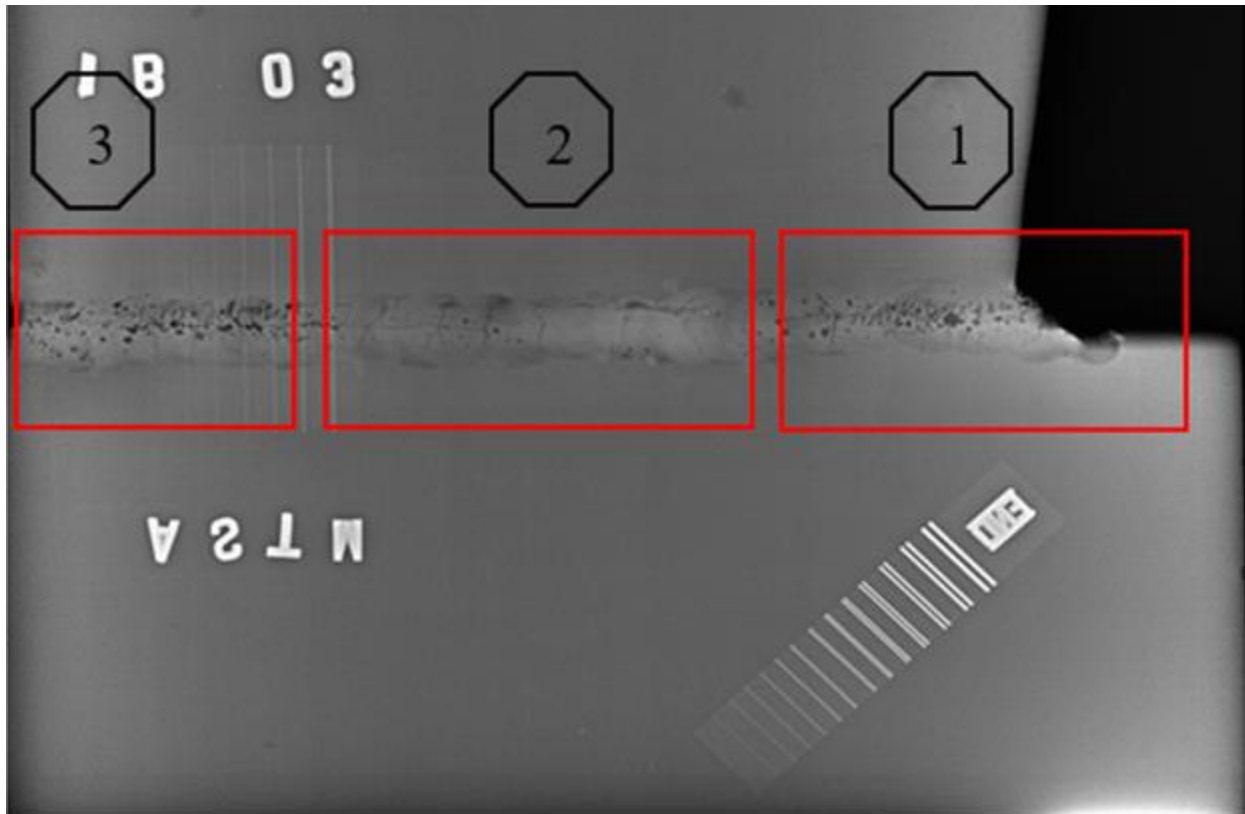


Figura 30. Radiografía de Acero al Carbono con la técnica digital (RD).

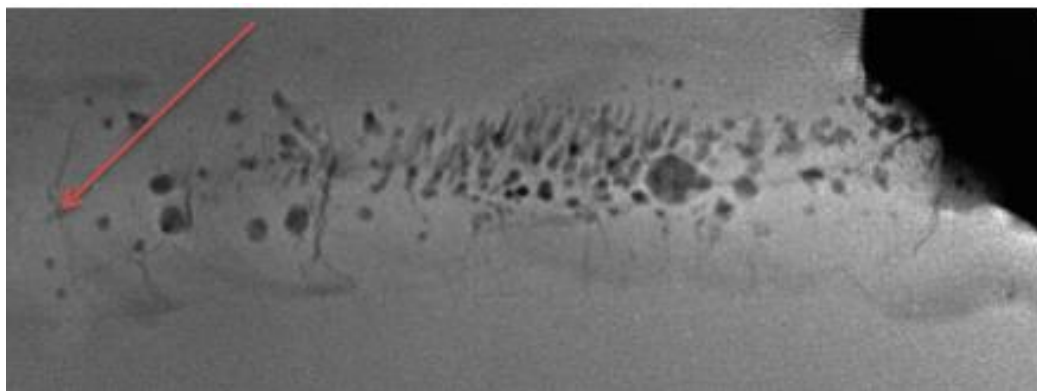
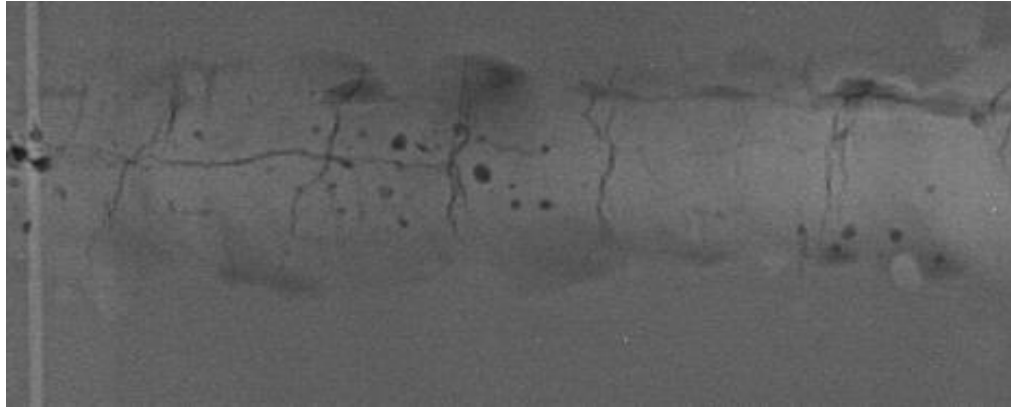
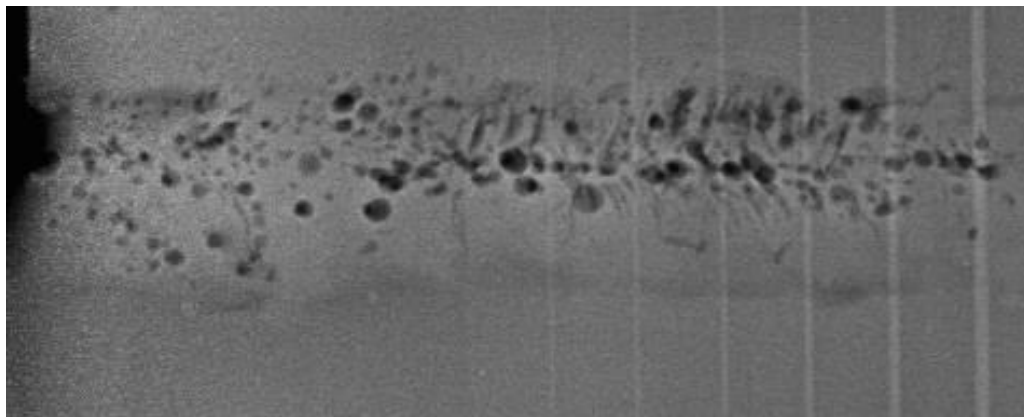


Figura 31. Cordón zona 1. Imagen obtenida por RTC.



*Figura 32.* Cordón zona 2. Imagen obtenida por RTC.



*Figura 33.* Cordón zona 3. Imagen obtenida por RTC.

A partir de las imágenes radiográficas de los cordones de soldadura obtenidas por las técnicas convencional y digital, figuras 26 y 30 respectivamente, se puede observar que la resolución proporcionada por la técnica digital es más amplia ya que, aunque indica las mismas discontinuidades (fisuras y porosidades), estas tienen una mayor definición. Adicionalmente, cuando se compara el acercamiento en la zona 1 del cordón, la técnica digital permite la detección clara de unas fisuras que, por la técnica convencional eran muy poco perceptibles, estas se señalan con la flecha de tono rojo en las figuras 27 y 31. Este resultado está en concordancia con lo encontrado en la literatura, pues en la investigación realizadas sobre la sustitución de películas

radiográficas por técnicas digitales, se encontró que la radiografía computarizada digital presenta una mayor sensibilidad para radiaciones de baja energía (Ewert et al., 2016). También es importante mencionar que, el ajuste que se puede realizar en el procesamiento posterior de la imagen obtenida por radiografía digital con el software permite alcanzar un mejor contraste y es posible medir con precisión el tamaño de las discontinuidades (Douglas C, Y. André, M. Douglas K, B. Benavides, E, 2018). A su vez, la técnica convencional se limita a la información que se percibe a través de la vista por el negatoscopio; sin la posibilidad de mejorar el enfoque, ni realizar acercamientos; es decir, para obtener los mejores resultados en contraste y definición, se deberá ineludiblemente recurrir a la exposición y procesamiento de una nueva placa para volver a analizar su resultado, lo que resulta poco eficiente en cuestiones de tiempo y dinero.

**4. 4.2 Soldadura de Aluminio.** A partir de las radiografías presentadas en las figuras 36-38, señalados con los rectángulos rojos (zona 1 y 2), se logra ver que la utilización del software en pro de alcanzar un mejor contraste para definir y extraer detalles en la radiografía digital permite un ajuste adecuado. A diferencia de la limitante que tiene la radiografía convencional, que es solo una obtención de la película con ciertos parámetros, en donde no se puede mejorar la radiografía una vez se ha realizado, lo que hace necesario la repetición del ensayo. También se muestran las radiografías obtenidas por ambas técnicas radiográficas en las figuras 34 y 35 realizadas a las soldaduras por fricción agitación. Cabe resaltar que los parámetros de calidad para las radiografías digitales se cumplieron y en vista de que se encontraban en un mismo rango de espesores, el cálculo fue el mismo. Siendo determinados a partir de la resolución espacial básica de la radiografía, según el par de hilos 9, con un valor de 0.13 mm, la cual se compara con la resolución espacial básica máxima, que es 0.16 mm, cumpliéndose este parámetro. Por otro lado, la relación señal ruido

normalizada de la radiografía es de 200 (medida con el software) y se compara con la mínima relación señal ruido normalizada, que es de 70, lo que indica que este parámetro también está en concordancia con lo especificado en la Norma ISO 19232-5 y 17636-2, que es equivalente a la ASTM E2002-15 (tanto para el material de Acero como para el Aluminio). Por otra parte, es importante aclarar que la primera soldadura por fricción agitación ensayada, no evidenció discontinuidades considerables.

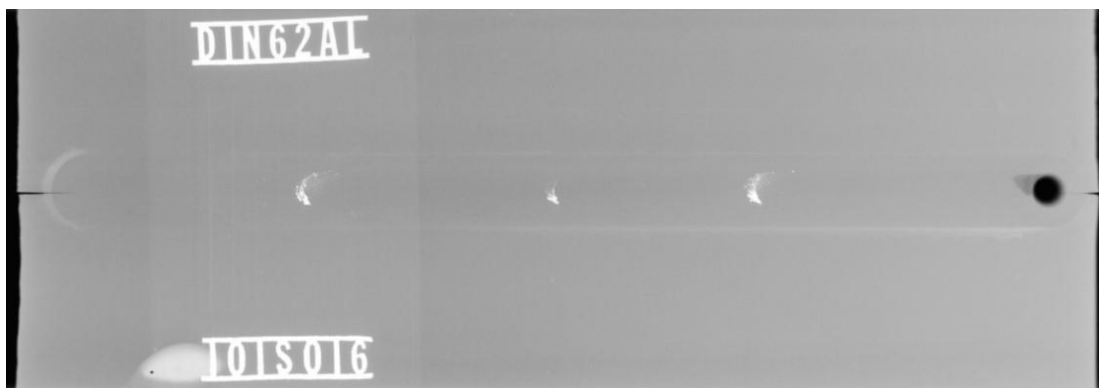


Figura 34. Radiografía soldadura por fricción agitación de Aluminio por la técnica convencional.

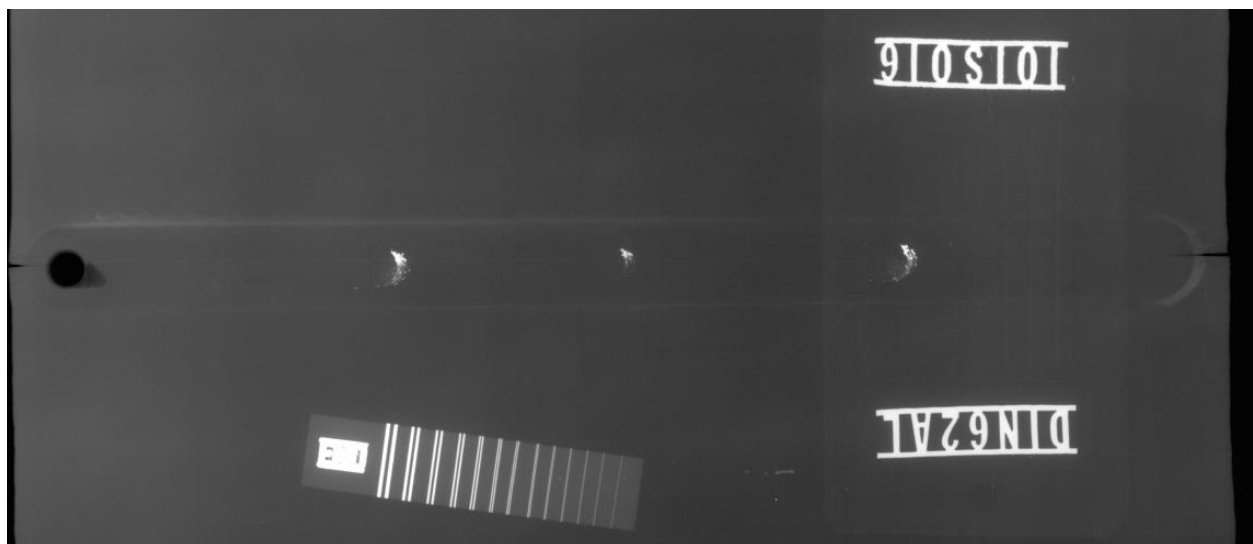
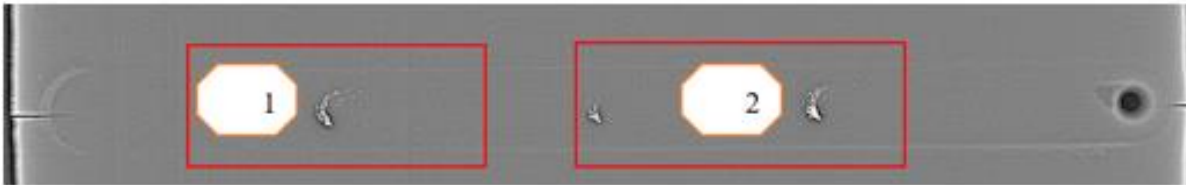


Figura 35. Radiografía soldadura por fricción agitación de Aluminio por la técnica digital.

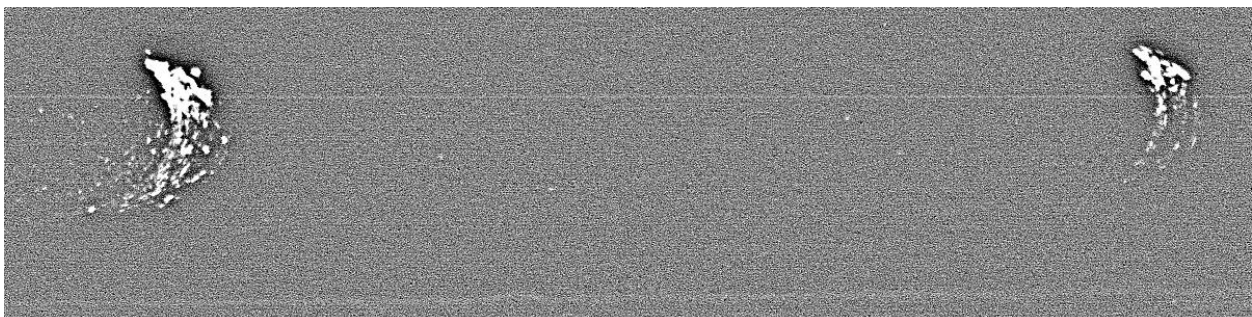
En las figuras 36-38 se muestra el acercamiento al cordón de soldadura para extraer detalles de las indicaciones obtenidas.



*Figura 36.* Radiografía digital con filtro para extraer detalles, acercamiento al cordón de soldadura.



*Figura 37.* Acercamiento a la discontinuidad zona 1 en RD.



*Figura 38.* Acercamiento a la discontinuidad zona 2 en RD.

### Conclusiones

En este trabajo investigativo se logró obtener la equivalencia proporcional de las películas A y B (clase II), siendo ambas placas rápidas de estructuras de granos más gruesos. A diferencia de lo anterior, para las películas A y B (clase I) no se encontró ningún comportamiento equivalente, de hecho, la película A (clase I) resultó ser levemente más lenta que la B (clase I) tanto en la exposición con rayos X como con rayos Gamma.

En cuanto a la comparación entre las técnicas convencional y digital, se concluye que la latitud de exposición de la técnica digital tiene un mayor rango dinámico por su relación lineal en la absorción de dosis, lo que significa que los cristales de fósforo de la placa CR se saturan diferente. Las películas convencionales mostraron una absorción exponencial debido a la saturación de los granos de haluros de plata; lo que implica un único rango aceptable según los parámetros de calidad. Esta característica de la latitud de exposición implica que la exposición en piezas de diferentes espesores y geometrías complejas utilizando la técnica digital de como resultado una imagen radiográfica en condiciones adecuadas para su inspección, sin necesidad de la compensación de espesores.

Por otra parte, la técnica digital permite disminuir el tiempo de obtención de radiografías, ya que no se realiza un procesamiento de revelado y fijado, factores que a su vez pueden implicar una variación o alteración del resultado radiográfico. De igual forma la consecución de una radiografía para una pieza de geometría variable, es mucho más favorable con la técnica digital. También se

concluye que el desarrollo de la radiografía digital computarizada disminuye el riesgo de contaminación, ya que no hay desechos químicos provenientes del procesamiento de la película (revelado - fijado) y que las placas CR son reutilizables cierto número de veces, aclarando que las placas de acetato en las películas convencionales son fuente de contaminación por los metales pesados presentes que no son tratados.

La técnica digital tiene una mejor capacidad para resolver discontinuidades, ya que los defectos más pequeños se muestran con una mejor definición y contraste, dentro de los rangos de calidad. Esto implica la utilización del software de visualización, el cual permite realizar mejoras en los detalles para obtener una información más adecuada de la radiografía.

La principal desventaja de los sistemas digitales, frente a los convencionales, está relacionado con el costo de la implementación de los equipos, la capacitación, actualización y formación del personal a cargo de las inspecciones.

### Referencias bibliográficas

Agfa Gevaert N.V, (1989). Manual de Radiografía industrial. Non-Destructive Testing (NDT).

ASME V (2013). Boiler & pressure vessel code Nondestructive Examination, sección V Article 2.  
American Society Mechanical Engineers (ASME).

ASTM (2010). E747-04: Standard Practice for Design, Manufacture and Material Grouping  
Classification of Wire Imagen Quality Indicators (IQI) Used for Radiology. American Society  
for Testing and Materials (ASTM). Obtenido de:  
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E747.31174.pdf>

ASTM (2016). E1000: Standard Guide Radioscopy. American Society for Testing and Materials  
(ASTM). Obtenido de: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E1000.19475.pdf>

ASTM (2015). E2002: Standard Practice for Determining Total Image Unsharpness and Basic  
Spatial Resolution in Radiography and Radioscopy. American Society for Testing and  
Materials (ASTM). Obtenido de:  
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E2002.26464.pdf>

ASTM (2016). E2007-10: Standard Guide for Computed Radiography. American Society for  
Testing and Materials (ASTM). Obtenido de:  
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E2007.37835.pdf>

ASTM (2017). E2033: Standard Practice for Radiographic Examination Using Computed Radiography. American Society for Testing and Materials (ASTM). Obtenido de: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E2033.4147.pdf>

ASTM (2017). E2422: Standard Digital Reference Images for Inspection Aluminum Castings. American Society for Testing and Materials (ASTM). Obtenido de: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E2422.38797.pdf>

ASTM (2014). E2445: Standard Practice for Qualification and Long-Term Stability of Computed Radiology Systems. American Society for Testing and Materials (ASTM). Obtenido de: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E2445E2445M.2666.pdf>

ASTM (2016). E2446: Standard Practice for classification of computed Radiology systems. American Society for Testing and Materials (ASTM). Obtenido de: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E2446.10208.pdf>

ASTM (2014). E2597: Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays. American Society for Testing and Materials (ASTM). Obtenido de: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2242/download/E2597E2597M.17446.pdf>

Beckmann, J. Rachny, S. Zscherpel, U. Ewert, U. (2008): Improved Procedure For Computed Radiography- A Comparative Study On Welded Tube Sections By Film Radiography And Computed Radiography, 17th World Conference On Nondestructive Testing, Shanghai, China.

Castaño, J. (2013). Organizar un documento recomendado de Radiografía Computarizada en uniones soldadas en Colombia, con un procedimiento de inspección propuesto y conceptos de la técnica según API 1104 (tesis de posgrado). Universidad Libre, Bogotá, Colombia.

DIN, 54109: Calidad de la imagen radiográfica de rayos X y Gamma en materiales metálicos.

Douglas C, Y. André, M. Douglas K, B. Benavides, E. (Julio,2018). Digital Radiographic Image Processing and Analysis. *Dental Clinics of North America*, 62 (3), 341-359. Obtenido en: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2191/science/article/pii/S0011853218300168>

Ewert, U. Zscherpel, U. Bavendiek, K. (2007): Strategies For Film Replacement In Radiography, IV Conferencia Panamericana de Ensayos no Destructivos (END). Buenos Aires, Argentina.

Ewert, U. Zscherpel, U. Bavendiek, K. (Marzo, 2016): Replacement Of Film Radiography By Digital Techniques And Enhancement Of Image Quality. Berlín, Alemania.

GE. 2006. Industrial Radiography Image Forming Techniques. Inspection Technologies. General Electric Company (GE).

ISO (2014). 19232-1: Determinación de la calidad de imagen de las radiografías utilizando indicadores tipo hilos. International Organization for Standardization (ISO).

ISO (2014). 19232-2: Determinación de la calidad de imagen de las radiografías utilizando indicadores tipo taladros y escalones. International Organization for Standardization (ISO).

ISO (2014). 19232-3: clases de calidad de imagen. International Organization for Standardization (ISO).

ISO (2014). 19232-4: Evaluación experimental de los valores de calidad de imagen y de las tablas de calidad de imagen. International Organization for Standardization (ISO).

ISO (2014). 19232-5: Determinación del valor de penumbra de la imagen utilizando indicadores de calidad de imagen tipo doble hilo. International Organization for Standardization (ISO).

Manzoni, I. (2016) Validación de técnicas radiográficas digitales para el reemplazo de filme en aplicaciones industriales (tesis de pregrado). Universidad Nacional de General San Martín- Comisión Nacional de Energía Atómica - Instituto Sábató, Buenos Aires, Argentina.

Martino, A. (2006). Radiología de la imagen convencional a la digital (tesis de posgrados). Universidad Nacional de General San Martín, Buenos Aires, Argentina.

Ozcete, E. Boydak, Bahar. Erzel, Murat. Kiyani, Selahattin. Uz, Iihan, Cevrim, Ozgur (marzo,2015): Comparison of Conventional Radiography and Digital Computerized Radiography in Patients Presenting to Emergency Department. *Turkish Journal of Emergency*

*Medicine*, 15(1), 8-12. Obtenido en:  
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2191/science/article/pii/S2452247316600043?via%3Dihub>

Proyecto Norma MERCOSUR ISO (2013) 1736-1: Ensayos no destructivos – técnicas de rayos X y gamma con película.

Proyecto Norma MERCOSUR ISO (2013) 1736-2 A: Ensayos no destructivos – técnicas de rayos X y gamma con detectores digitales.

Proyecto Norma MERCOSUR ISO (2013) 1736-2 B: Ensayos no destructivos – técnicas de rayos X y gamma con detectores digitales.

Sudhagar, S. Sakthivel, M. Ajith, D. (Febrero, 2020): Application of image processing to radiographic image for quantitative assessment of friction stir welding quality of aluminium 2024 alloy. *Measurement*, 152, artículo 107294. Obtenido en:  
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2191/science/article/pii/S0263224119311583>

### **Recomendaciones**

El desarrollo del trabajo comparativo de las dos técnicas en términos de latitud de exposición y sensibilidad estuvo relacionado con un tipo de energía de rayos X, por tanto, se recomienda emplear la energía de gammagrafía para lograr analizar si es viable una sustitución total en la radiografía de película por la radiografía computarizada digital. Es decir, salir del laboratorio, a la incursión del campo industrial, en piezas en funcionamiento que impliquen mayor compromiso de ensayo, para analizar las estrategias de los cambios con el avance tecnológico.

## Apéndices

### Apéndice A. Procedimiento llevado a cabo para la radiografía industrial convencional

Objeto: Comparación del rendimiento de películas

Alcance: Obtener el rendimiento de películas

Referencia: código ASME sección V, artículo- 2 Nondestructive Examination

Personal: Técnicos- encargada del proyecto

Material de ensayo: Escalerilla o cuña sensitométrica de Acero al Carbono

Espesores: 17.5, 20, 45 mm

Condición superficial: pulida

Características de fuentes de radiación y equipamiento utilizado:

- Rayos X: Andrex Smart 200/4.5 mAmp (Direccional)
- Equipo de gammagrafía: Exertus Dual 120 y fuente de Iridio 192, actividad: 3.712,4 GBq
- Equipo de gammagrafía: Exertus Vox 100 y fuente de Cobalto 60: Oserix y actividad 3.161,28 GBq

Productos químicos: revelador- fijador

Técnica de ensayo – selección: Simple pared- simple imagen.

Indicador calidad de imagen (ICI): Hilos ASTM- E747

Películas radiográficas: Clase I A, II A, I B Y II B

Distancia foco-film: 920 mm

Control de la radiación dispersa: Pantallas intensificadoras

Procesado del film: Revelado-Baño de parada-Fijado-Lavado y secado.

Disposiciones generales de seguridad radiológica

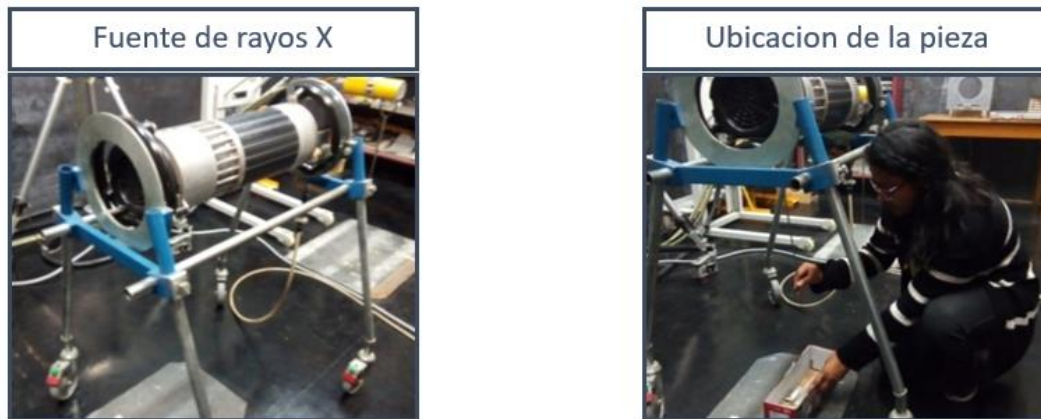
- TLD (Detector Termo Luminiscente)
- Detector de lectura Directa
- Detector Geiger
- Alarma acústica
- Bunker de Gammagrafía habilitado por ARN y salas de Irradiación por Rayos X

### Procedimiento para la obtención de radiografías

**Exposición.** En este paso las fuentes utilizadas son las mismas para la técnica convencional como para la técnica digital mostrado en las figuras 40 (Rayos X) y 41 (Rayos Gamma), pero la técnica convencional va antecedida del corte y preparación de las películas, que se muestra en la figura 39.



Figura 39. Preparación de las películas.

**Rayos X**

*Figura 40.* Exposición con rayos X

**Rayos Gamma**

*Figura 41.* Exposición con rayos Gamma.

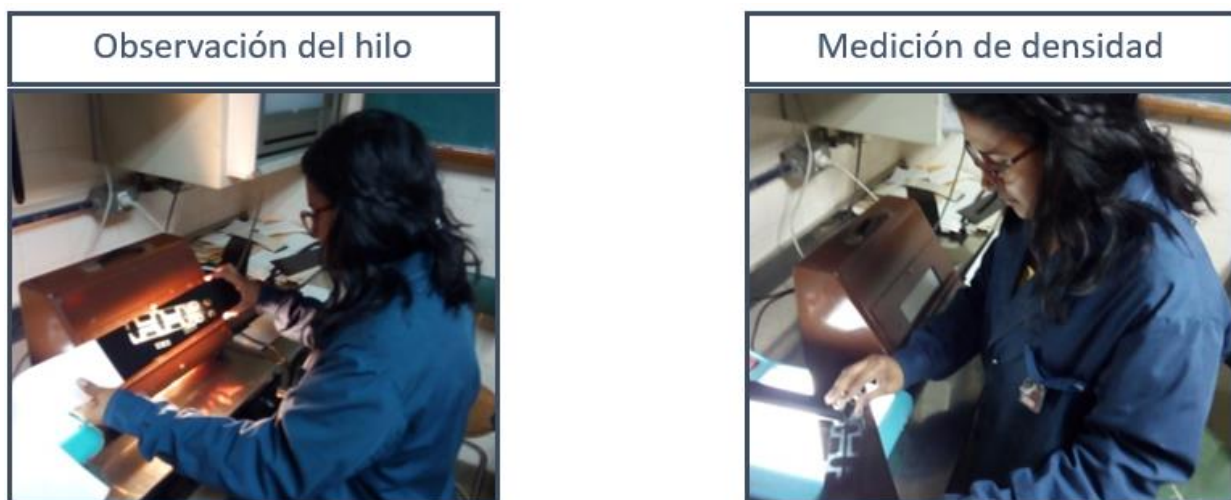
**Procesamiento de la película:** Esta etapa se realiza solo para la radiografía convencional. En la figura 42, se presenta la secuencia de pasos realizados.



*Figura 42.* Procesamiento de la película expuesta.

### Parámetros de calidad

La visibilidad del hilo y la medida de la densidad radiográfica figura 43.



*Figura 43.* Evaluación de los indicadores de calidad.

**Apéndice B.** Procedimiento llevado a cabo para la radiografía digital

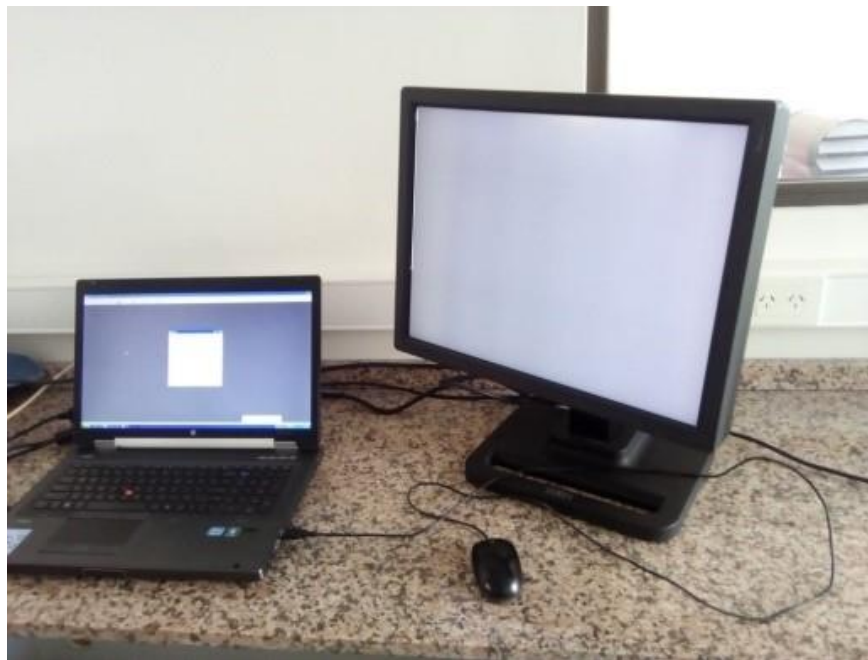
Para esta técnica las fuentes de radiación son las mismas mostradas en las figuras 40 y 41 del anexo A. Una vez se ha realizado la exposición, se continúa con el escaneo del casete Flex CR mostrado en la figura 44, involucrando el escáner Flex CR de la figura 45, el Monitor y software para la obtención radiográfica digital de la figura 46. Para el escaneo de la película obtenida con la técnica convencional se utilizó el escáner mostrado en la figura 47. En las figuras 48 y 49 se muestran los indicadores de calidad de imagen usados en la obtención de las radiografías industriales.



*Figura 44.* Casete Flex CR con la imagen IP.



*Figura 45.* Escáner IP GE CRxFlex.



*Figura 46.* Monitor y software para la obtención radiográfica digital.



Figura 47. Escáner para película de celuloide GE FS50.



Figura 48. ICI Doble hilo-Dúplex.

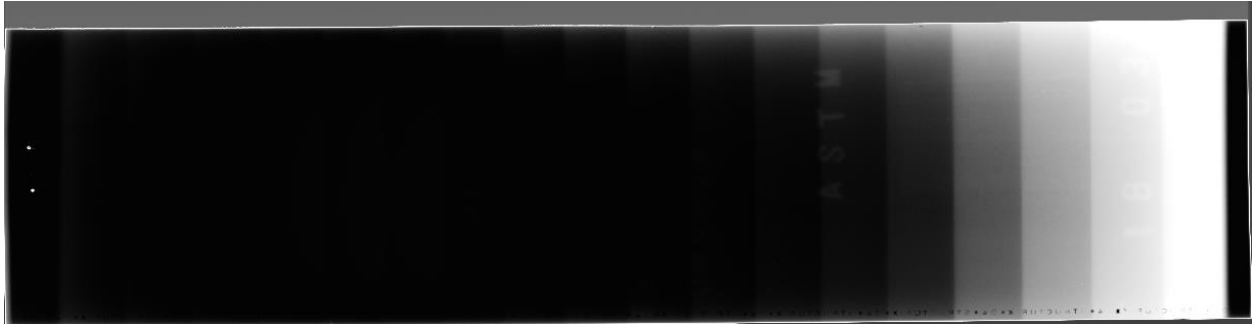


Figura 49. Indicador de calidad ASTM y DIN.

**Apéndice C.** Radiografías del rendimiento de películas.

Energía utilizada Cobalto-60 (Co-60) para las películas **CLASE II A-B**

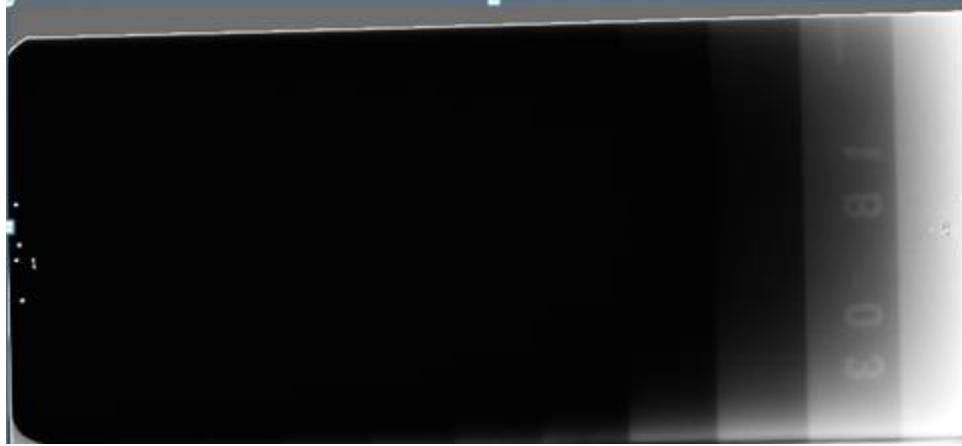
**Y CLASE I A-B**, respectivamente para las figuras 50-53.



*Figura 50.* Energía Co-60 clase II A.



*Figura 51.* Energía Co-60 clase II B.



*Figura 52.* Energía CO-60 clase I A.

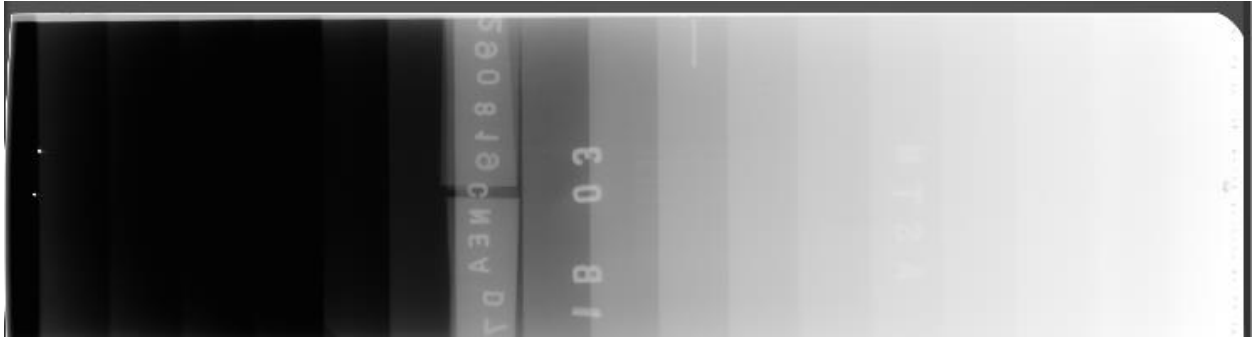


*Figura 53.* Energía Co-60 clase I B.

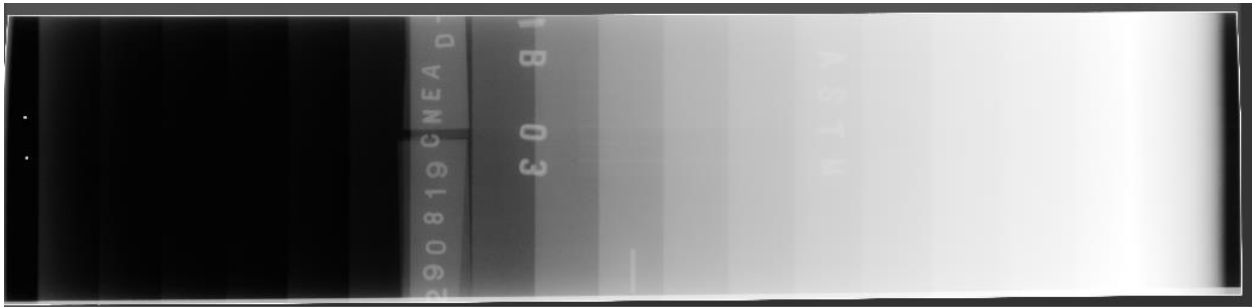
**Apéndice D.** Radiografías del rendimiento de películas.

Energía utilizada Iridio-192 (Ir-192) para las películas **CLASE II A-B**

**Y CLASE I A-B**, respectivamente para las figuras 54-57.



*Figura 54.* Energía Ir-192 clase II A.



*Figura 55.* Energía Ir-192 clase II B.



Figura 56. Energía Ir-192 clase I A.

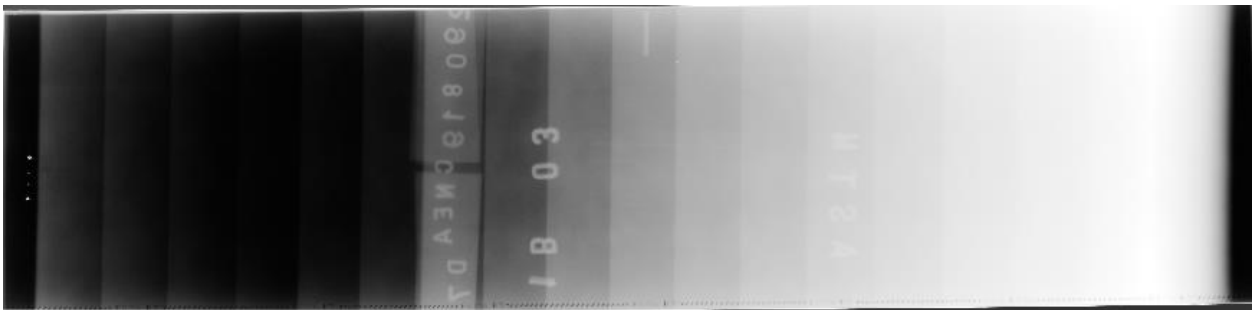
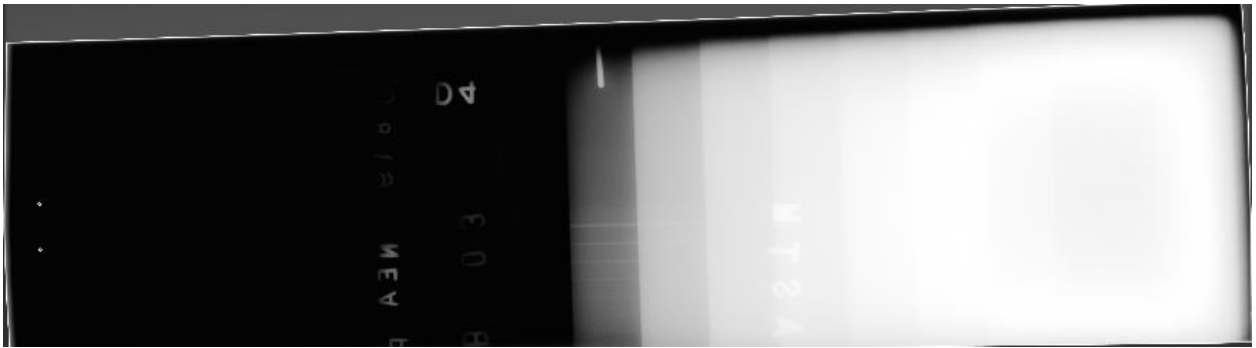


Figura 57. Energía Ir-192 clase II B.

**Apéndice E.** Radiografías del rendimiento de películas.

Energía utilizada rayos X (RX) para las películas **CLASE II A-B**

**Y CLASE I A-B** respectivamente para las figuras 58-61.



*Figura 58.* Energía RX clase II A.



*Figura 59.* Energía RX clase II B.

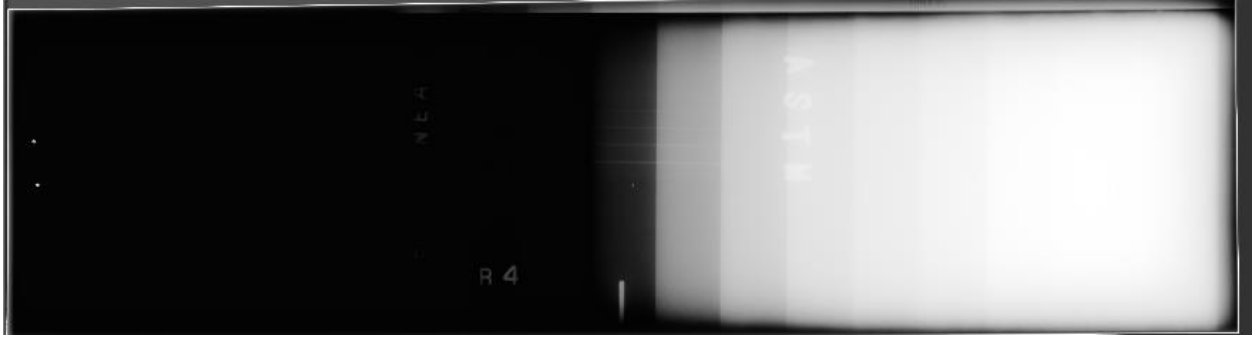


Figura 60. Energía RX clase I A.



Figura 61. Energía RX clase I B.