

DIGITALIZACIÓN DE IMÁGENES RADIOGRÁFICAS PARA LA IDENTIFICACIÓN
Y CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES
PRESENTES EN TUBERÍAS DE ACERO

LEIDY CRISTINA OLARTE SÁNCHEZ

DIEGO ARMANDO VANEGAS MORENO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2009

DIGITALIZACIÓN DE IMÁGENES RADIOGRÁFICAS PARA LA IDENTIFICACIÓN
Y CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES
PRESENTES EN TUBERÍAS DE ACERO

Autores:

LEIDY CRISTINA OLARTE SÁNCHEZ
DIEGO ARMANDO VANEGAS MORENO

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero(a) Metalúrgico(a)

Directora:

M.Sc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

Codirector:

Ing. EDWARD YESITH MENDOZA GONZALEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2009

DEDICATORIA

A mi madre Yolanda Moreno, quien a pesar de la distancia me ha brindado su amor infinito, sus consejos y apoyo moral siempre y en todo momento.

A mi padre Reinaldo Vanegas por mostrarme el camino adecuado que debía seguir en mi vida.

A mis abuelos Ricardo y Bárbara por la crianza que me dieron y por brindarme la oportunidad de formarme como profesional.

A mis hermanos Sergio, María del Mar y Nicolás por su inmenso amor fraternal.

A Edgar Huérfano por tenderme su generosa mano y brindarme su ayuda en el momento que más lo necesité, sin su apoyo, esto no hubiera sido posible.

A mi novia Leidy Cristina por su amor incondicional, constante apoyo y compromiso.

A todos aquellos que creyeron y depositaron su confianza en mis capacidades.

A los que no creyeron en mí, por imprimirme la fuerza que necesitaba para alcanzar esta meta

DIEGO ARMANDO VANEGAS MORENO

DEDICATORIA

*A mi familia que tanto adoro, gracias
por apoyarme incondicionalmente y
acompañarme en todo
momento*

*A mi novio Diego Armando por su amor
y comprensión.*

*A todas las personas que hicieron
posible la realización de esta
investigación.*

LEIDY CRISTINA OLARTE SÁNCHEZ

AGRADECIMIENTOS

- A Dios por guiarnos en este arduo camino y permitirnos terminar esta etapa de nuestras vidas con gran satisfacción.
- A nuestra amada y siempre gloriosa Universidad Industrial de Santander y su Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por acogernos en su seno y brindarnos la oportunidad de crecer personal, profesional e intelectualmente.
- A la profesora Luz Amparo Quintero, por su constante apoyo, colaboración y orientación durante el desarrollo de este trabajo.
- Al ingeniero Edward Yesith Mendoza, codirector del trabajo, por compartir sus conocimientos y ofrecernos su ayuda contribuyendo al aprendizaje.
- Al diseñador industrial Germán Quiñonez y a don Rafael, por su colaboración incondicional en el desarrollo del trabajo.
- A los técnicos de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales: Ing. Wilson Vesga, a Domingo, Javier, Fermín, Daniel, Mario y Ambrosio por su constante disposición y apoyo en esta etapa y durante toda nuestra carrera.
- A todos los profesores de ingeniería metalúrgica a quienes debemos nuestros conocimientos y nuestro amor a esta profesión.
- A nuestros amigos y compañeros de estudio, quienes nos acompañaron, apoyaron, aconsejaron y siempre estuvieron ahí en todo momento.

- Finalmente gracias a todas las personas que de una u otra forma estuvieron brindándonos su apoyo en esta fase final de nuestra carrera.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. GENERALIDADES	4
3.1 Los Ensayos No Destructivos	4
3.2 Radiografía Industrial como método de inspección	6
3.2.1 Naturaleza de los rayos X:	6
3.2.2 Factores de exposición:	8
3.2.2.1 Radiación emitida por la fuente:.....	8
3.2.2.2 Distancia Fuente-Película:	10
3.2.2.3 Película radiográfica:.....	12
3.2.2.4 Pantallas intensificadoras:	13
3.2.3 Fundamentos del procesado de las películas radiográficas:.....	13
3.2.3.1 Densidad radiográfica:	14
3.2.3.2 Calidad de una imagen radiográfica:	14
3.2.4 Técnicas radiográficas:	15
3.2.5. Algunos estudios de la aplicación técnica radiográfica en la inspección de tuberías:	17
3.3 Procesamiento digital de imágenes	19

3.3.1 Visión por computador:	19
3.3.2 Imagen digital:.....	20
3.3.3 Imágenes en escala de grises:	21
3.3.4 Formatos de imagen:	22
3.3.5 Digitalización de imágenes:	23
3.3.6 Procesamiento digital de imágenes:	25
4. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA	28
4.1 Revisión bibliográfica:	29
4.2 Diseño y elaboración del patrón de referencia:.....	29
4.3 toma de registros radiograficos al patrón	31
4.3.1 Determinación de las condiciones de exposición de las tomas radiográficas:	31
4.3.2 Tomas radiográficas:	36
4.3.3. Revelado de las películas radiográficas:.....	38
4.4 Captura y digitalización de las imágenes radiográficas	39
4.5 Tratamiento de las imágenes radiográficas:	41
4.6 verificacion de los datos obtenidos y análisis de resultados	41
4.7 Elaboración del informe final.....	42
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
5.1 diseño y elaboración del patrón de referencia	43
5.2 Toma de registros radiográficos al patrón.....	47
5.3 Captura y digitalización de las imágenes	52

5.4 Tratamiento digital de las imágenes	53
5.4.1 Elaboración de la curva de medición de espesores:	54
5.4.2 Medición de espesores en la imagen del patrón de referencia:	60
5.4.3 Medición de diámetros y áreas de los orificios:.....	65
5.5 Verificación de los datos obtenidos.....	68
5.5.1 Evaluación de la lectura de los espesores:	68
5.5.2 Caracterización de los orificios:	70
6. CONCLUSIONES	71
7. RECOMENDACIONES.....	73
8. BIBLIOGRAFÍA	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porción del espectro electromagnético. (Longitud de onda en unidades de Angstrom [A])	7
Figura 2. Montaje del sistema para llevar a cabo una exposición radiográfica	7
Figura 3. Representación esquemática de la absorción diferencial de radiación en una pieza de espesor variable	8
Figura 4. Efecto de un cambio en el kilovoltaje y en corriente respecto a la intensidad de los rayos X.....	9
Figura 5. Penetración de rayos X en una pieza a diferentes kilovoltajes	9
Figura 6. Diagrama esquemático ilustrando la ley inversa de los cuadrados.....	10
Figura 7. Esquema para determinar la penumbra geométrica (U_g).....	12
Figura 8. Corte esquemático de una sección de la película radiográfica	12
Figura 9. Parámetros para una radiografía tangencial	17
Figura 10. Esquema de valores de bits en un byte	20
Figura 11: Estructura de una imagen digital en escala de grises.....	21
Figura 12. Comportamiento entre los valores de pixel y los tonos de gris	21
Figura 13. Imagen a color y en escala de grises.....	22
Figura 14. Iluminación ubicada a contraluz.....	23
Figura 15. Iluminación frontal.....	24
Figura 16. Sistema de adquisición de imágenes de una cámara digital.....	24
Figura 17. Histograma de una imagen en escala de grises	26

Figura 18. Diagrama esquemático de la metodología de trabajo	28
Figura 19. Escalerilla de calibración.....	30
Figura 20. Diagrama miliamperaje vs kilovoltaje	34
Figura 21. Registro fotográfico de los IQI ASTM E-142 utilizados	36
Figura 22. Inspección visual de las radiografías en el negatoscopio	38
Figura 23. Plano de diseño del patrón de referencia.....	45
Figura 24. Densidad radiográfica en función del espesor de la escalerilla.....	49
Figura 25. Relación de densidades contra espesor de las radiografías preseleccionadas de la escalerilla.	51
Figura 26. Histograma de la imagen en escala de grises	55
Figura 27. Línea de perfil en la mitad de la imagen	56
Figura 28. Perfil de escala de grises de la imagen.....	56
Figura 29. Sección extraída de la imagen.....	57
Figura 30. Histograma de la sección extraída.....	58
Figura 31. Perfil de la imagen extraída de la escalerilla.....	58
Figura 32. Curva de medición de espesores.....	60
Figura 33. Histograma de la imagen en escala de grises	61
Figura 34. Perfil de la imagen del patrón	62
Figura 35. Imagen de los orificios	62
Figura 36. Histograma de la imagen extraída	63

Figura 37. Perfil de la imagen extraída	64
Figura 38. Histograma de la imagen normalizada.....	66
Figura 39. Imagen binarizada.....	67
Figura 40. Imagen con fondo negro	67
Figura 41. Orificios seleccionados	68
Figura 42. Calidad vs rapidez en películas radiográficas STRUCTURIX	79
Figura 43. Dimensiones de la escalerilla.....	80
Figura 44. Características del haz de radiación del equipo de rayos X.....	81
Figura 45. Abaco para cálculos de exposición para piezas de hierro	82
Figura 46. Kilovoltaje para equipos de rayos X en función del espesor y del material de la pieza.....	83
Figura 47. Etapas para el procesamiento digital de las imágenes radiográficas...	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del tramo de tubería.....	30
Tabla 2. Espesor de pared en tuberías vs espesor de IQI ASTM E142	36
Tabla 3. Proceso de revelado de las películas radiográficas.....	38
Tabla 4. Dimensiones reales de las discontinuidades simuladas en el patrón de tubería.....	46
Tabla 5. Condiciones de exposición de las 11 radiografías.....	47
Tabla 6. Densidades de las radiografías de la escalerilla.....	48
Tabla 7. Radiografías preseleccionadas	50
Tabla 8. Densidades radiográficas de la escalerilla en los espesores a evaluar ...	50
Tabla 9. Niveles de calidad de imagen.....	52
Tabla 10. Características de las imágenes en escala de color y escala de grises	55
Tabla 11. Características de la imagen seccionada	57
Tabla 12. Niveles de gris en cada paso.....	59
Tabla 13. Resultados de las mediciones de niveles de gris en las discontinuidades	65
Tabla 14. Resultados de las mediciones	68
Tabla 15. Resultados de las mediciones en las disminuciones de espesor.	69
Tabla 16. Profundidades de los orificios.....	69
Tabla 17. Dimensiones de los orificios	70

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Indicadores de imagen	15
Cuadro 2. Técnicas radiográficas para piezas con sección tubular	16
Cuadro 3. Tipos de patrones con discontinuidades simuladas	18
Cuadro 4. Características del equipo de rayos X	32
Cuadro 5. Características de la película radiográfica	35
Cuadro 6. Montajes de las piezas durante las tomas radiográficas	37
Cuadro 7. Características del densitómetro	39
Cuadro 8. Características de la cámara fotográfica	39
Cuadro 9. Parámetros de las tomas fotográficas	40
Cuadro 10. Montaje de captura de imágenes.	40
Cuadro 11. Identificación de los pasos y las perforaciones	46
Cuadro 12. Calidad de imagen de la radiografía DUN	52
Cuadro 13. Características de las tomas fotográficas de la radiografía DUN	53
Cuadro 14. Imagen en escala de color y escala de grises	54
Cuadro 15. Imagen en RGB y en escala de grises	60

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1	79
ANEXO 2	80
ANEXO 3	81
ANEXO 4	82
ANEXO 5	83
ANEXO 6	84

TÍTULO: DIGITALIZACIÓN DE IMÁGENES RADIOGRÁFICAS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES PRESENTES EN TUBERÍAS DE ACERO*

AUTORES: OLARTE SÁNCHEZ LEIDY CRISTINA, VANEGAS MORENO DIEGO ARMANDO**

PALABRAS CLAVES: Digitalización de imágenes, Discontinuidades, Doble pared – doble imagen, Patrón de tubería, Radiografía Industrial, Tratamiento de imágenes,

RESUMEN

La radiografía industrial con rayos X es una técnica aplicada en los Ensayos No Destructivos que permite visualizar discontinuidades en los materiales, que otras técnicas no pueden caracterizar fácilmente. De igual manera la radiografía industrial, presenta dificultades en el momento de evaluar las películas radiográficas directamente, permitiendo valoraciones subjetivas con posible incertidumbre.

La digitalización de las imágenes radiográficas es una herramienta útil para facilitar la evaluación de las discontinuidades y permite almacenar, transferir y preservar la información de una manera más confiable, que las películas radiográficas físicas. Por esta razón, la aplicación de tecnologías informáticas, permite aprovechar el desarrollo de software y aplicarlos a la Ciencia de los Materiales.

Este trabajo permite adecuar la técnica radiográfica de Doble Pared-Doble imagen, que bajo condiciones adecuadas, puede ser utilizada en la medición de las disminuciones de espesor en tuberías utilizadas para el transporte de fluidos. Además presenta una metodología útil para la identificación y caracterización de discontinuidades en un patrón de tubería, a partir de imágenes radiográficas digitalizadas y tratadas mediante software.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa en la metodología implementada, una respuesta confiable en la medición y cálculo de las pérdidas de espesor generalizadas y puntuales, al igual que la caracterización dimensional de las mismas, utilizando los niveles de gris y la cantidad de píxeles, presentes en las radiografías digitalizadas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Directora: M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz, Codirector: Ing. Edward Yesith Mendoza González.

TITLE: RADIOGRAPHIC IMAGE DIGITIZATION FOR IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF SURFACE DISCONTINUITIES IN PIPES OF STEEL *

AUTHORS: OLARTE SÁNCHEZ LEIDY CRISTINA, VANEGAS MORENO DIEGO ARMANDO**

KEYWORDS: Discontinuities, Double Wall-Double Image, Images digitization, Image Processing, Industrial Radiography, Pattern of pipe.

ABSTRACT

The industrial radiography with X-rays is a technique used in Non Destructive Testing for displaying discontinuities in materials that other techniques can not easily characterize. Similarly industrial radiography presents difficulties when be evaluate radiographic film directly, enabling subjective assessments with uncertainty possible.

The digitization of radiographic images is a useful tool to facilitate assessment of the discontinuities and to store, transfer and preserve information in a way more reliable, that physical radiographic film. For this reason, the introduction of computer technology, can take advantage of software development and apply them to Materials science.

This work allows to adapt the technique of radiographic Double Wall-Double Image, which under appropriate conditions, can be used in the measurement of decreases in thickness in pipes used for transporting fluids. It also presents a useful methodology for the identification and characterization of discontinuities in a pattern of pipe, from digitized radiographic images and treated by software.

According with results obtained, shown in the methodology implemented, a reliable answer in the measurement and calculation of losses and timely generalized thick, like dimensional characterization, using the gray levels and the amount of pixels present in digitized radiographs.

* Grade work.

** Faculty of Physical – Chemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Science of Materials. Director: *M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortíz*, Codirector: Ing. Edward Yesith Mendoza González.

1. INTRODUCCIÓN

En refinerías, plantas químicas y cualquier industria donde hay transporte de fluidos por tuberías, es de gran importancia la confiabilidad en servicio de los tubos sin retirar su recubrimiento. Para esto se necesita realizar evaluaciones periódicas y confiables, siendo la radiografía industrial una de las técnicas utilizadas en los últimos años para este fin.¹

La medición de espesores y profundidades de las discontinuidades en las tuberías, se puede hacer directamente en la película radiográfica, pero puede mostrar resultados difíciles de interpretar y poco confiables, dejando la decisión de sustituir tuberías a valoraciones subjetivas.

Por otra parte, millones de tomas radiográficas se hacen a diario en todo el mundo, ocasionando que las placas de negativos de rayos X se acumulen constantemente en los archivos, aumentando la cantidad de espacio físico ocupado. Así, el almacenamiento, organización, transporte y manipulación de los archivos se empiezan a convertir en un problema, ya que el lugar de análisis debe contar con el espacio suficiente para almacenar la información y además protegerla de factores que puedan alterar la integridad de las películas y la posible pérdida o confusión de las mismas.

Una de las metas a alcanzar es que uno o más analistas puedan disponer de toda la información de un análisis radiográfico sin importar en qué lugar se encuentren y obtenerla en cuestión de segundos. Además toda esa información debe estar archivada y organizada de tal forma que recuperarla sea fácil y rápido.

¹ Ilog S.A. de Cuernavaca; Medición de espesores de pared y mapeo de corrosión utilizando sistemas de radiografía computarizada en aplicaciones de campo; soporte técnico.

La radiografía digitalizada abre un mundo de oportunidades para determinar la condición de tuberías y otros accesorios por medio de cálculos matemáticos más exactos, controlados por software y además permite preservar de una manera más segura y duradera la información de las películas, porque puede ser almacenada en medios magnéticos.

La conversión de una radiografía convencional de tipo analógico en una imagen digital es lo que se llama digitalización o radiografía digital indirecta. La digitalización de películas radiográficas se puede realizar en la actualidad utilizando un escáner con tecnología óptica o láser, con cámaras de vídeo o mediante cámaras fotográficas digitales. Una vez digitalizadas las radiografías, posteriormente pueden ser procesadas y analizadas por medio de un ordenador, desde donde también pueden mejorarse algunas características como el contraste y la definición, así como realizar algunas mediciones.

La presente investigación pretende contribuir en el campo de los Ensayos No Destructivos mediante la digitalización y tratamiento de imágenes radiográficas de un patrón de tubería con discontinuidades simuladas, brindando la posibilidad de que la información proveniente de la radiografía original, sea procesada y almacenada de una manera más cómoda, organizada y segura, lo cual puede ser utilizado con fines investigativos, docentes, de análisis, presentaciones, etc.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar y caracterizar discontinuidades superficiales externas, mediante imágenes radiográficas tratadas digitalmente, obtenidas a partir de un patrón de referencia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y elaborar un patrón de referencia con variaciones de espesor y discontinuidades seleccionadas, generadas artificialmente en la superficie externa.
- Obtener registros radiográficos del patrón elaborado con previo establecimiento de las condiciones adecuadas de exposición.
- Digitalizar y procesar las imágenes radiográficas, para la identificación y caracterización de las discontinuidades.

3. GENERALIDADES

3.1 LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los Ensayos No Destructivos (END) o Pruebas No Destructivas (PND), llamados también en inglés NDT^{*}, NDI^{**}, NDEx^{***} son un conjunto de técnicas que permiten obtener información de un material o pieza en servicio sin alterar permanentemente sus propiedades físicas, mecánicas o dimensionales ni sus capacidades para cumplir con las exigencias de diseño.

Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción ó cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada. Los END pueden aplicarse en diferentes etapas de un proceso de fabricación y además detectan, localizan y determinan la probable naturaleza de discontinuidades inherentes o en servicio.

La amplia aplicación de los métodos de END en materiales se encuentra resumida en los tres grupos siguientes²: Defectología, Caracterización y Metrología.

- *Defectología*: Permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales; determinación de tensiones; detección de fugas.

^{*} Acrónimo en inglés para NonDestructive Testing

^{**} Acrónimo en inglés para NonDestructive Inspection

^{***} Acrónimo en inglés para NonDestructive Examination

² Wood, John D. , *ASM Handbook*, Volume 17, *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, Guide to Nondestructive Evaluation Techniques, Fifth printing, December 1997, p. 87.

- *Caracterización:* Evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales; propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas); transferencias de calor y trazado de isotermas.
- *Metrología:* Control de espesores; medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimiento; niveles de llenado.

Una aproximación para seleccionar un método de END, es considerar que solo hay seis factores primarios involucrados en la selección de éste³: La razón para realizar el END, el tipo de discontinuidad de interés en el objeto, el tamaño y orientación de la discontinuidad que genere rechazo, la localización de las discontinuidades de interés, el tamaño y forma del objeto, las características del material a ser evaluado.

Para la selección de un método de END útil o la combinación de métodos de END, primero se necesita un claro entendimiento del problema a solucionar. La detección de discontinuidades, irregularidades o fallas son consideradas usualmente el aspecto más importante en los END.

Criterios establecidos en especificaciones, normas y códigos, permiten definir que una discontinuidad que ha sido evaluada como rechazable, sea calificada como defecto. En general hay dos tipos de discontinuidades: volumétricas las cuales pueden ser medidas en las tres dimensiones y planares las cuales son medidas en dos dimensiones.

En esta investigación se evaluaron discontinuidades volumétricas simuladas, tales como disminuciones de espesor y orificios circulares que podrían representar porosidades, orificios, corrosión por picado o cualquier otra discontinuidad que

³ Ibid; p.88.

represente un vacío en la superficie del material. El método de END utilizado en la investigación fue el de radiografía de rayos X.

3.2 RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL COMO MÉTODO DE INSPECCIÓN

La inspección por Radiografía Industrial se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o configuración física de un material.⁴ Es un método de END de gran utilidad para el control de calidad en trabajos de soldadura, forja y fundición, ya que pone de relieve defectos que pueden comprometer la utilidad de los productos acabados (recipientes a presión, líneas de tubería, etc.) o bien, limitar su vida en servicio.

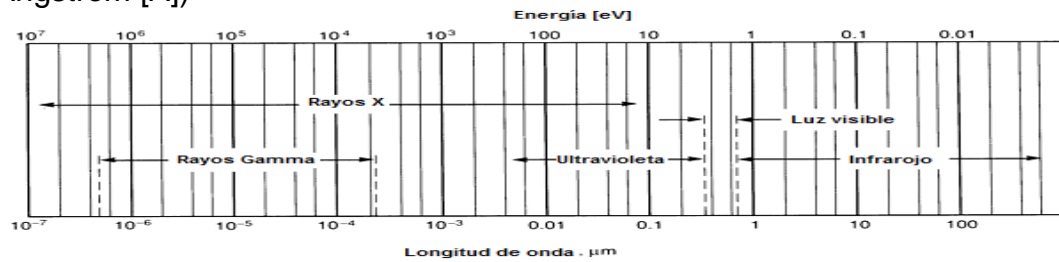
El método de Radiografía se fundamenta en la acción penetrante de la radiación ionizante (rayos X, rayos gamma, neutrones), los cuales, al atravesar un cuerpo y ser detectados en transmisión sobre una película, visualizan en ella las características internas de dicho cuerpo: cavidades, defectos, etc. En la presente investigación se utilizó radiación X para la toma de las radiografías.

3.2.1 Naturaleza de los rayos X: Los rayos X son una forma de radiación electromagnética, generada por la colisión controlada de electrones contra un ánodo conductor, en el interior de un dispositivo llamado tubo de rayos X. Su característica es su longitud de onda extremadamente corta, tan solo 1/10000 de la longitud de onda de la luz. Esta característica es la responsable de la habilidad de los rayos X de penetrar materiales que absorben o reflejan comúnmente la luz⁵. La figura 1 muestra su localización en el espectro electromagnético.

⁴ URL: <http://www.sieend.com.mx/servicios_radiografia.html>

⁵ EAST KODAK COMPANY. Radiography in Modern Industry 4th; año 1980, ed; p.7.

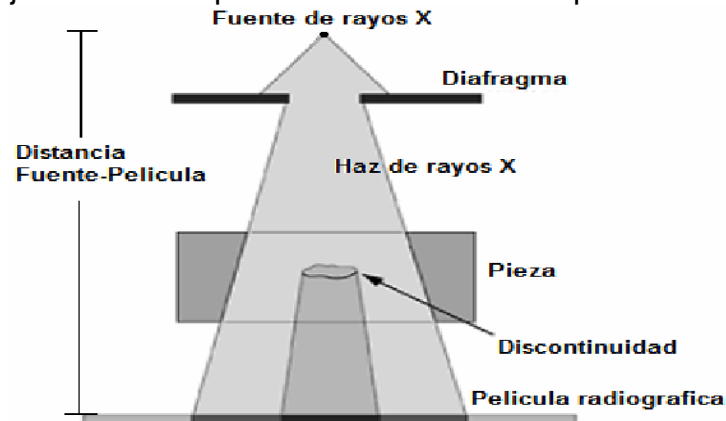
Figura 1. Porción del espectro electromagnético. (Longitud de onda en unidades de Angstrom [Å])



Fuente: ASME-Metal Handbook. Vol.17

El diagrama de la figura 2 muestra los componentes esenciales en la exposición de una radiografía. El punto focal es una pequeña área en el tubo de rayos X del cual la radiación es emanada; algunos de los rayos pasan y otros son absorbidos. La cantidad de radiación transmitida depende de la naturaleza del material y de su espesor.

Figura 2. Montaje del sistema para llevar a cabo una exposición radiográfica

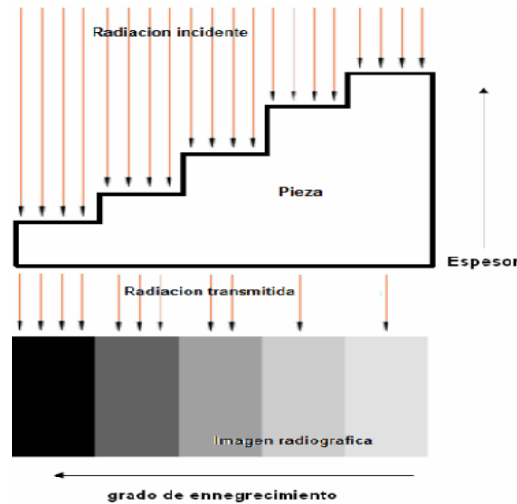


Fuente: EAST KODAK COMPANY. Radiography in Modern Industry 4th ed

Las radiografías obtenidas después del proceso de revelado muestran una imagen que se compone de zonas claras y oscuras generadas por la interacción entre la radiación transmitida a través de la pieza y los componentes químicos de la película radiográfica. Las zonas claras representan una mayor absorción de radiación por parte de la pieza, debido posiblemente a un mayor espesor o a la presencia de un material distinto de alta densidad. Por otro lado, la presencia de

zonas oscuras se debe a que una cantidad mayor de radiación interactuó con la película debido al mayor paso de ésta a través de la pieza. La figura 3 ilustra lo mencionado anteriormente.

Figura 3. Representación esquemática de la absorción diferencial de radiación en una pieza de espesor variable



Fuente: Santamaría T. Ricardo A; 2007⁶

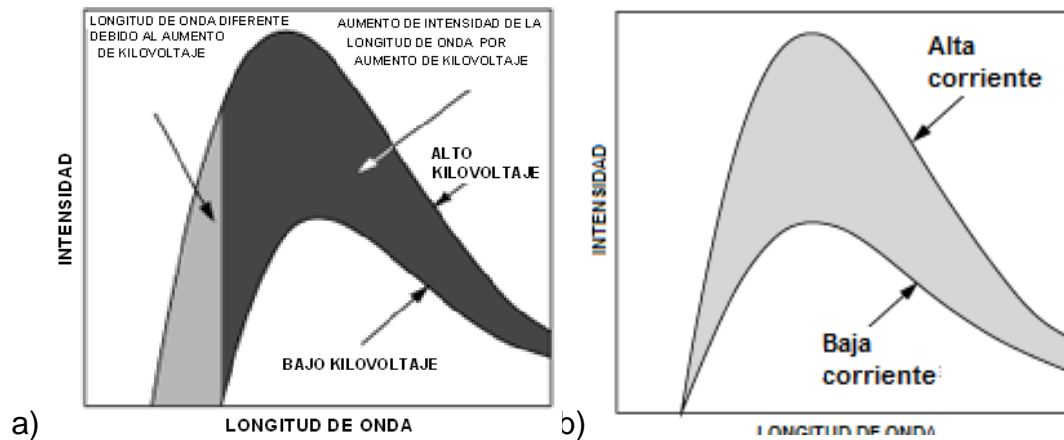
3.2.2 Factores de exposición: La cantidad de radiación absorbida por la emulsión sensible de la película, depende de los siguientes factores: la cantidad total de radiación emitida por el tubo de rayos X, distancia fuente película, tipo de película radiográfica y la acción intensificadora de las pantallas, si estas son usadas

3.2.2.1 Radiación emitida por la fuente: La cantidad total de radiación emitida por el tubo de rayos X, depende de la corriente dada en miliamperaje [mA], el kilovoltaje [kV] y el tiempo que el tubo esté energizado. Cuando las condiciones de operación son mantenidas constantes, una variación en el miliamperaje causa un cambio en la intensidad de la radiación emitida, por eso la intensidad llega a ser

⁶ Diseño, desarrollo e implementación de una herramienta informática que simula el proceso radiográfico de uniones soldadas; Trabajo de grado; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga-Colombia; 2007; p12.

proporcional al miliamperaje. De igual manera, el kilovoltaje aplicado a los tubos de rayos X afecta no sólo la calidad sino también la intensidad del rayo. La figura 4 (a) muestra las curvas de emisión espectral para un tubo de rayos X operando a dos voltajes distintos pero con el mismo miliamperaje y la figura 4 (b) operando a la mismo kilovoltaje a distintas corrientes.

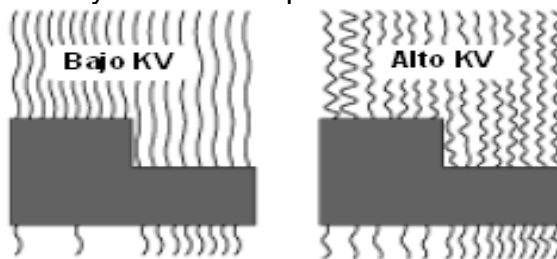
Figura 4. Efecto de un cambio en el kilovoltaje y en corriente respecto a la intensidad de los rayos X



Fuente: EAST KODAK COMPANY. Radiography in Modern Industry 4th ed

Entre más alto sea el kilovoltaje, menor es la longitud de onda de los rayos X emitidos aumentando su intensidad y poder de penetración,⁷ tal como se ilustra en la figura 5.

Figura 5. Penetración de rayos X en una pieza a diferentes kilovoltajes



Fuente: EAST KODAK COMPANY. Radiography in Modern Industry 4th ed

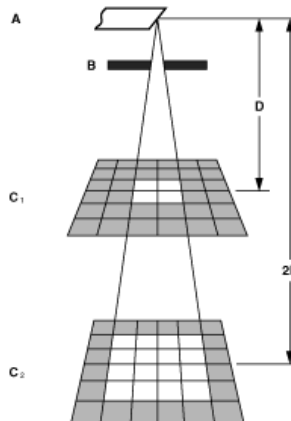
⁷ Ibid; p.11.

El tiempo de exposición y el miliamperaje se pueden relacionar a través de la Ley de la reciprocidad, la cual establece que la exposición de la película radiográfica [mA.s] es igual a la intensidad de los rayos X del haz remanente [mA] por el tiempo de exposición de la película [s].⁸

$$E = mA \times t \text{ Ec. [1]}$$

3.2.2.2 Distancia Fuente-Película: Teórica y prácticamente se demuestra que la intensidad de un haz de radiación, se atenúa en razón inversa al cuadrado de la distancia que separa la fuente del punto donde se mide la intensidad del haz, como se ilustra en la figura 6. Así, si la distancia se duplica, la intensidad se reduce a la cuarta parte.

Figura 6. Diagrama esquemático ilustrando la ley inversa de los cuadrados



Fuente: EAST KODAK COMPANY. Radiography in Modern Industry 4th ed

La ley del inverso de los cuadrados se puede expresar matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2} \text{ Ec. [2]}$$

Dónde I_1 = Intensidad inicial, I_2 = Nueva intensidad, D_1 = Distancia inicial, D_2 = Nueva distancia.

⁸ ASM Handbook, Volume 17, *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, Guide to Nondestructive Evaluation Techniques, Fifth printing, December 1997, p. 649.

Con un kilovoltaje dado de radiación X, los tres factores gobernantes de la exposición son el miliamperaje, tiempo y la distancia fuente – película. El cálculo necesario para algún cambio de distancia fuente – película (D)*, miliamperaje (M), o tiempo (T) son materia de simple aritmética.

La ley del inverso de los cuadrados se puede complementar con la ley de la reciprocidad, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad \text{Ec. [3]}$$

Donde E_1 = exposición inicial, E_2 = exposición final, D_1 = distancia fuente-película inicial, D_2 = distancia fuente-película final

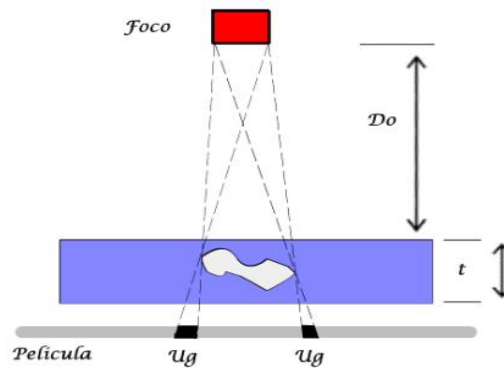
Adicionalmente, la distancia fuente-película influye notablemente en la penumbra geométrica la cual resulta de la superposición de las sombras proyectadas por cada punto de la fuente, cuyas dimensiones son finitas y se comportan como si fueran focos aislados, produciendo una zona de borrosidad alrededor de los bordes externos de la pieza. La penumbra geométrica puede afectar enormemente la apariencia de la imagen radiográfica, por esta razón es necesario determinar su magnitud la cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{U_g}{F} = \frac{t}{D_o} \quad \text{o} \quad U_g = F \left(\frac{t}{D_o} \right) \quad \text{Ec. [4]}$$

Donde U_g es la penumbra geométrica, F es el tamaño de la fuente de radiación, D_o es la distancia fuente – objeto, y t es la distancia objeto – película. D_o y t deben ser medidas en mismas unidades. La figura 7 ilustra el anterior concepto.

* DFP es otra manera de denominar la Distancia Fuente - Película

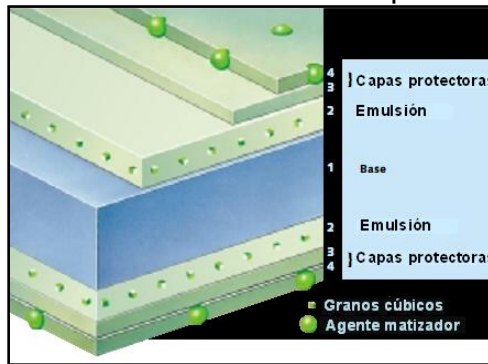
Figura 7. Esquema para determinar la penumbra geométrica (U_g)



Fuente: Duarte V. Gustavo A; Pérez B. Jorge A; 2004⁹

3.2.2.3 Película radiográfica: La película radiográfica está constituida por una capa sensible de una suspensión de halogenuros de plata en gelatina, denominada “emulsión”, recubriendo en ambas caras un soporte flexible y transparente llamado “base” y a su vez las caras externas de la película están protegidas con una capa protectora. La figura 8 muestra un esquema general del corte de una película radiográfica.

Figura 8. Corte esquemático de una sección de la película radiográfica



Fuente: STRUCTURIX – Film Systems

La emulsión es muy sensible a la acción de la luz y de las radiaciones ionizantes, que actúan sobre los granos de halogenuros de plata originando cambios en su

⁹ Elaboración de una página web como apoyo a la educación virtual en el área de radiografía industrial; Trabajo de grado; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga-Colombia; 2004; p45.

estructura física; estos cambios dan lugar a la imagen latente, que no puede ser puesta de manifiesto por métodos físicos. Cuando la película impresionada es tratada con determinados agentes químicos (revelado), se producen una serie de reacciones que dan lugar a que se deposite plata metálica finamente dividida, quedando estos granos en suspensión en la capa de emulsión para dar lugar a la formación de la imagen; cuanto menor sea el tamaño de estos granos de plata será mejor la definición de la imagen. Asimismo una película de grano fino es una película “lenta” con respecto al tiempo de exposición dando lugar a imágenes mejor definidas que las “rápidas”. El Anexo 1 contiene el gráfico que relaciona la calidad de la imagen con respecto a la rapidez para películas STRUCTURIX, utilizadas en las tomas radiográficas.

3.2.2.4 Pantallas intensificadoras: Las películas radiográficas son sensibles a la acción de los rayos X, pero el efecto fotográfico puede ser incrementado muy apreciablemente, y el tiempo de exposición puede ser disminuido por el uso de una pantalla intensificadora en contacto con cada lado de la película. Una forma de la pantalla intensificadora consiste en láminas de plomo, o una película delgada de plomo que recubre el papel. Bajo la excitación de los rayos X de longitud de onda corta, el plomo es un buen emisor de electrones, el cual al exponer la película sensible incrementa el efecto fotográfico total.

3.2.3 Fundamentos del procesado de las películas radiográficas: En el procedimiento del revelado, la película primero es inmersa en una solución reveladora, la cual causa que las áreas expuestas a la radiación lleguen a ser ennegrecidas dependiendo del grado de exposición recibido. Después del revelado, se inserta en el baño de parada el cual sirve para retirar de la película los haluros de plata que no fueron ionizados a plata metálica, luego se introduce en el baño de fijado, cuya función es la de disolver las porciones no ennegrecidas de la sal sensible. La película es entonces lavada con agua circulante para remover los químicos y solubilizar las sales, y finalmente es secada al aire. En la

radiografía obtenida después del revelado se evalúan, la densidad y la calidad de imagen obtenida (contraste y definición).

3.2.3.1 Densidad radiográfica: La densidad radiográfica se refiere a la medida cuantitativa del grado de ennegrecimiento de una película que ha sido expuesta a los rayos X y posteriormente revelada. Se define mediante la siguiente ecuación:

$$D = \log \frac{I_o}{I_t} \quad \text{Ec. [5]}$$

Donde D es la densidad, I_o es la intensidad de luz incidente en la película y I_t es la intensidad de luz transmitida. La densidad de la película se mide en un densitómetro.


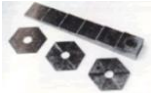


3.2.3.2 Calidad de una imagen radiográfica: Se define como calidad o sensibilidad de una imagen radiográfica a la cantidad de información que contiene en relación con la que debería contener si estuviera correctamente expuesta, procesada y examinada; la fiabilidad y valor de las imágenes radiográficas son función de la definición y el contraste. La definición se puede definir como la nitidez entre los límites de zonas con diferente grado de ennegrecimiento y el contraste como la diferencia del grado de ennegrecimiento de dos zonas adyacentes.¹⁰ En una pieza sometida a un examen radiográfico, la percepción de los posibles defectos que en ella se pueden presentar depende de la calidad de la imagen radiográfica.

La calidad de la imagen, es necesario cuantificarla y para ello se recurre a los “indicadores de calidad de imagen” (IQI), que son pequeños dispositivos que pueden ser huecos o macizos, constituidos por un material de naturaleza idéntica a la pieza a radiografiar. Estos indicadores son especificados mediante normas

¹⁰ Ortiz Martínez, Antonio Carlos; Base defectológica de soldaduras Evaluación, caracterización e interpretación radiográfica de soldaduras en materiales metálicos; Universidad Politécnica de Cartagena; p.11.

como las ASTM, ASME, AFNOR, DIN, BWRA, entre otras. El cuadro 1 muestra algunos de los indicadores más utilizados.

Cuadro 1. Indicadores de imagen

TIPO DE INDICADOR	CARACTERISTICAS	IMAGEN
De hilos	Formados por una serie de hilos de diámetros crecientes embutidos en una lamina de goma o material plástico	
De escalones	Consisten en placas de espesores crecientes provistas o no de varias perforaciones de diámetros constantes. También pueden tener orificio de diámetro igual al espesor del escalón donde se encuentra	
De escalones con cifras de referencia	Cada espesor está provisto de cierto número de orificios formando una cifra de referencia característica	
De orificios calibrados en una placa de espesor constante	El espesor de la placa representa un porcentaje del espesor a radiografiar. La placa tiene una serie de orificios de diámetros crecientes, iguales o múltiplos del espesor de la placa	

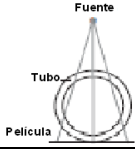
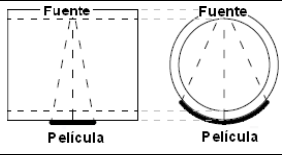
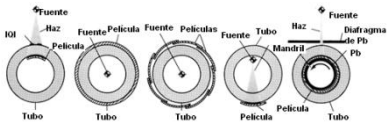
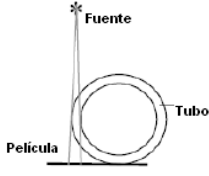
Fuente: Los autores

La calidad de la radiografía es tanto mejor cuanto más visibles son sobre ellas las partes más finas del indicador de calidad. Sin embargo los indicadores de calidad no pueden garantizar la detección de los defectos cuyas dimensiones sean iguales al valor de la sensibilidad obtenida en la radiografía, ya que la detección de los defectos dependen, por un lado, de su tamaño, y por otro, de su orientación con respecto a la dirección del haz de radiación. Por lo tanto, es un error considerar los resultados de la sensibilidad como una medida absoluta.¹¹

3.2.4 Técnicas radiográficas: Existen cuatro técnicas radiográficas las cuales pueden ser empleadas para la inspección de secciones tubulares, ilustradas en el cuadro 2.

¹¹ Ibid; p. 43.

Cuadro 2. Técnicas radiográficas para piezas con sección tubular

Técnica radiográfica	Características	Esquema
Doble pared, doble imagen	Ampliamente aplicada a secciones tubulares con diámetros menores a 90 mm ¹² produciendo radiografías en la cuales las imágenes de ambas paredes, quedan superpuestas una sobre la otra.	
Doble pared, simple imagen	Ampliamente aplicada a secciones tubulares que tienen diámetros mayores de 90 mm ¹³ . Esta técnica produce una imagen radiográfica de sólo la sección de la pared que está más cercana al plano de la imagen.	
Simple pared, simple imagen	Puede ser usada sólo cuando el interior de una sección es accesible para ubicar la fuente de radiación adentro del cilindro aunque puede ser colocada afuera. Una ventaja de esta técnica es que es más sensible que las técnicas de doble pared porque se puede ocupar una gran parte del espesor penetrado ¹⁴ .	
Radiografía tangencial	Es la técnica más adecuada para medir espesores de pared de tuberías. En esta técnica una vista de la sección longitudinal y una vista del perfil de la pared del tubo, son proyectadas en la película, permitiendo una medición directa del espesor de pared	

Fuente: Los autores

La técnica a utilizar se escoge de acuerdo al tipo de análisis que se vaya a realizar, al diámetro y al espesor de pared de la tubería, al material y a la naturaleza de la fuente de radiación a utilizar. Se observa que para medir espesores de pared, con o sin recubrimiento, la técnica más adecuada es la radiografía tangencial, pero no debe usarse para evaluaciones de pequeñas zonas aisladas (defectos pequeños), sino para zonas más extensas con defectología generalizada;¹⁵ la técnica está limitada a las características dimensionales del tubo así como la fuente de radiación a emplear. La figura 9 muestra los parámetros a tener en cuenta para usar esta técnica radiográfica.

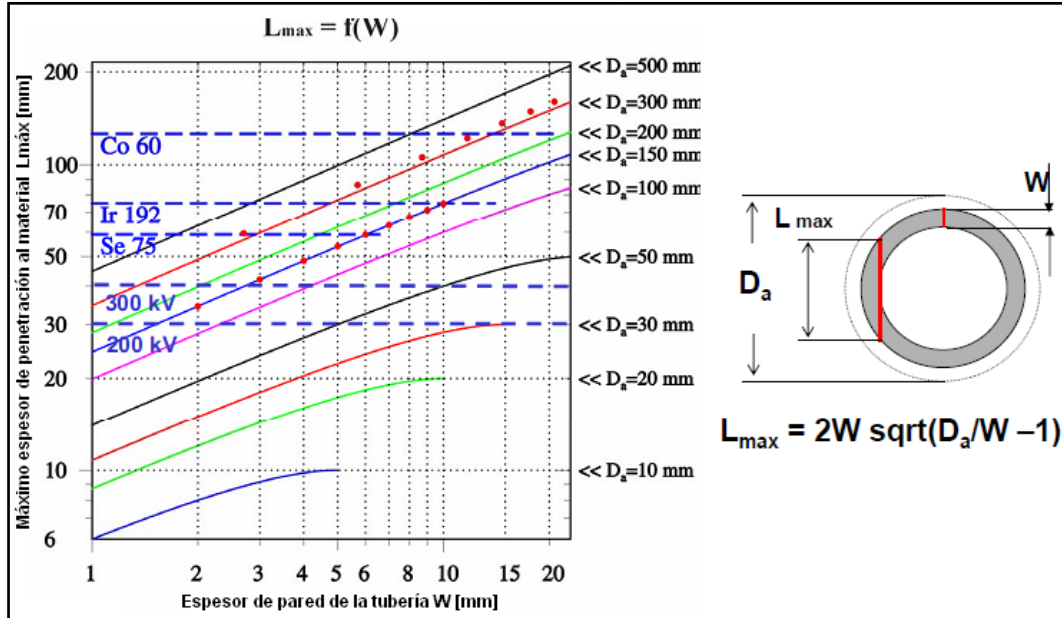
¹² ASM Metals Handbook; Inspection of tubular sections; vol 17; p.713.

¹³ Ibid; p.715.

¹⁴ Ibid; p. 416.

¹⁵ AEA Technology; Recommended practice for the rapid inspection of small bore connectors using radiography; p.3.

Figura 9. Parámetros para una radiografía tangencial



Fuente: Corrosion and wall thickness measurement - BASF

La otra técnica que puede ser utilizada para medir espesores en tuberías es la de doble pared, donde el espesor es medido utilizando los valores de densidades de las radiografías, pero puede presentar inconvenientes cuando las tuberías tienen recubrimientos, depósitos o hay alguna sustancia en su interior.¹⁶

3.2.5. Algunos estudios de la aplicación técnica radiográfica en la inspección de tuberías: Para la optimización de las técnicas radiográficas empleadas en las mediciones de disminuciones de espesor, se realizan experimentos con secciones tubulares llamados patrones, de características similares a las tuberías en servicio. De igual manera se simulan discontinuidades superficiales reales en las secciones tubulares, con el fin de registrarlas en películas radiográficas para su posterior

¹⁶ K. Edalati, N. Rastkhah, A. Kermani, M. Seiedi, A. Movafeghi; The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes; Department of NDT, Nuclear Safety and Radiation Protection Technological Centre; Tehran, Iran; 2006; p.1.

medición y análisis. Las dimensiones de las discontinuidades se diseñan de acuerdo a los límites establecidos en cada técnica radiográfica.¹⁷

Los diseños de patrones de tubería empleados para estos estudios presentan algunas discontinuidades simuladas tales como ranuras, orificios y disminuciones de espesor, con diferentes dimensiones. El cuadro 3 ilustra algunos ejemplos de estos patrones encontrados en la literatura.

Cuadro 3. Tipos de patrones con discontinuidades simuladas

Disminuciones de espesor externas con perforaciones en cada una¹⁸	
	<p>Este tipo de patrones presenta diferentes disminuciones de espesor externas hasta la mitad del tubo. En cada disminución de espesor presenta una perforación de diámetro y profundidad variables, con fondo plano.</p>
Disminuciones de espesor internas y externas con perforaciones en cada una¹⁹	
	<p>Este tipo de patrones presenta diferentes disminuciones de espesor, ya sean internas o externas en la totalidad de la superficie del tubo. En cada disminución de espesor presenta una perforación de diámetro y profundidad variables con fondo plano.</p>
Orificios y ranuras a lo largo de la superficie externa²⁰	
	<p>Este tipo de patrón presenta ranuras con diferentes dimensiones y perforaciones con diámetro constante y diferentes profundidades con fondo plano, a lo largo de la superficie externa del patrón.</p>

¹⁷ Uwe zscherpel, Infanzón Silvia, Rastkhan Nasser, P. R. Vaidya, Einav Isaac, Ekinici Sinasi; Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits in Pipelines: Results of an IAEA Co-ordinated Research Programme;

¹⁸ Márton Balaskó, Erzsébet Svább, Attila Kuba, Zoltán Kiss, Lajos Rodek, Antal Nagy; Pipe corrosion and deposit study using neutron- and gamma- radiation sources; Hungary; February 2005.

¹⁹ N. Rastkhah, K. Edalati, A. Kermani, M. Seiedi, A. Movafeghi; Corrosion evaluation of pipes by radiography; Iranian Nuclear Regulatory Authority;

²⁰ Edmilson M. de Souza, Samanta C. A. Correa, Davi F. Oliveira, Deisemar H. Cassiano, Ademir X. da Silva, Ricardo T. Lopes; Modelagem e calibração de um sistema de radiografia computadorizada utilizando o código de monte carlo mcnp; XXVI CONAEND&IEV-026.

3.3 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

La inspección visual es un proceso comparativo, no cuantitativo y es fácilmente alterado por la presencia de información adicional que no es representativa en el análisis. Los métodos de análisis de imágenes por computador están disponibles para superar la mayoría de estos problemas específicos, pero ellos proporcionan respuestas que sólo son buenas si hay claridad en lo que se desea evaluar en la imagen.²¹

En la actualidad son muchas las aplicaciones que hacen uso de las técnicas de procesamiento digital de imágenes, las cuales se encuentran en las áreas de la medicina, la biología, el procesamiento de documentos, la industria cinematográfica, la fotografía, la electrónica, la industria aeroespacial, el control de calidad, la ciencia e ingeniería de los materiales, entre otras. En esta investigación el tratamiento digital de imágenes fue aplicado a la ciencia e ingeniería de los materiales en el área de inspección de tuberías.

3.3.1 Visión por computador: Según la Automated Vision Association, “la visión por computador, se define como la utilización de dispositivos de detección óptica, sin contacto, para recibir e interpretar automáticamente una imagen de una escena real, con el fin de obtener información”.

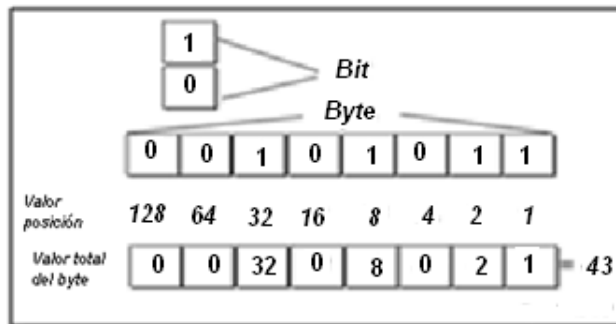
La interpretación de la información en una imagen puede ser una tarea complicada y que podría llevar mucho tiempo si se realiza aplicando la inspección visual directa. Por lo tanto la evaluación de las imágenes se hace más fácil utilizando un software con paquetes de procesamiento de imágenes, que permitan el mejoramiento y análisis de las mismas. Las operaciones de mejoramiento elevan la calidad de la imagen y las operaciones de análisis extraen información de un

²¹ Taylor & Francis Group, LLC; The Image Processing Handbook, Chap. 2 , Fifth Edition 2007, p. 133

objeto. Para que un computador pueda procesar la información de una imagen, es necesario que éstas estén representadas numéricamente, lo cual se logra con el proceso conocido como digitalización de imágenes.

3.3.2 Imagen digital: La notación binaria, es el principio en el que se basan los computadores para entender la información. Todo dato introducido en un computador se transforma en números binarios compuestos de dos dígitos: 0 y 1 donde cada uno es un bit y un conjunto de 8 bits se denomina un byte, este conjunto produce 256 combinaciones posibles de colores o de niveles de escala de grises. La figura 10 muestra posiciones que pueden ocupar los bits dentro de un byte.

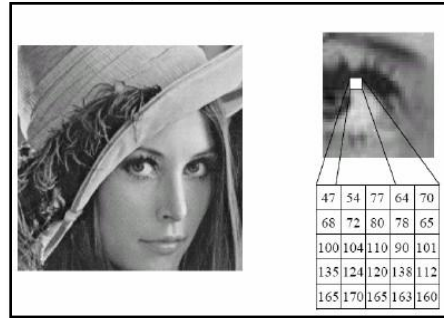
Figura 10. Esquema de valores de bits en un byte



Una imagen digital es una imagen que ha sido dividida en una cuadrícula bidimensional de minúsculos cuadrados, denominados píxeles, que son el elemento más pequeño en una imagen digital.²² Cada píxel tiene un valor que indica su nivel de gris en imágenes en escala de grises como se muestra en la figura 11; esta información se calcula en términos de bits y bytes.

²² ASTM E 1316, Standard Terminology for Nondestructive Examinations; Section D; p. 14

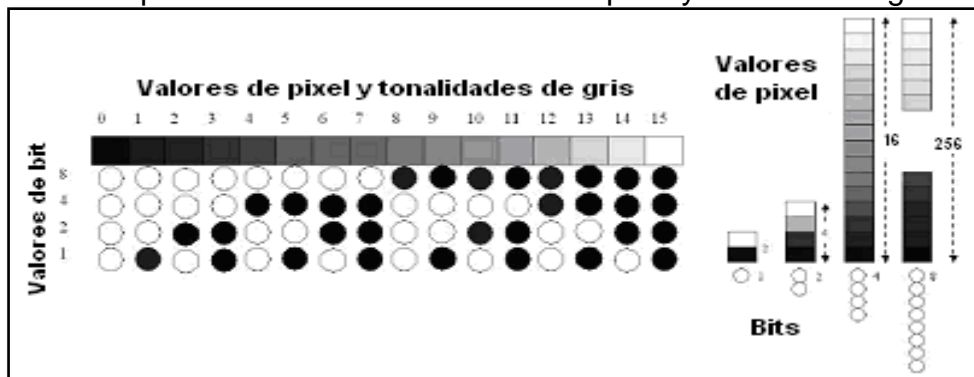
Figura 11: Estructura de una imagen digital en escala de grises



Fuente: Editor de imágenes basado en regiones. Aplicación en entorno MATLAB

3.3.3 Imágenes en escala de grises: Por lo general, las imágenes en blanco y negro no contienen solo dos colores (blanco y negro), sino que también contienen diversas tonalidades de gris, denominados niveles de gris. La cantidad de niveles de gris posibles es función del número de bits disponible para cada píxel. Normalmente en una imagen de 8 bits, el nivel de gris más alto es 255, el cual representa el píxel más claro, mientras que el nivel de gris 0, representa el píxel más oscuro. La figura 12 muestra la relación entre las configuraciones de bytes, valores de píxel y tonalidades de gris.

Figura 12. Comportamiento entre los valores de píxel y los tonos de gris



Fuente: CONAEND & IEV -2008

Entre las ventajas de utilizar imágenes en escala de grises con respecto a las de color en aplicaciones de visión por computador, están:²³

- Las imágenes en escala de grises se almacenan en archivos más pequeños y menos pesados, por lo tanto son más fáciles de transferir de un medio a otro, lo cual agiliza el trabajo.
- En las imágenes en escala de grises, los cambios leves se notan más y los objetos individuales se distinguen mejor que en una de color.

La figura 13 muestra una imagen a color y en escala de grises.

Figura 13. Imagen a color y en escala de grises



Fuente: Procesamiento morfológico de imágenes en color

3.3.4 Formatos de imagen: Hoy en día se utilizan programas gráficos tan completos que permiten la utilización de una gran variedad de formatos y la capacidad de transformar las imágenes de uno a otro entre ellos, de manera que el usuario puede comprobar cuál es el más útil en cada situación. Para la digitalización de imágenes se recomienda usar formato BitMap (.bmp) o formato Tagged Image File Format (.tiff), debido a que se almacena la imagen sin pérdida de información.²⁴

²³ SENA; Curso virtual Aplicaciones de Procesamiento de Imágenes al Control de Calidad; semana 3; agosto 2009; p.13.

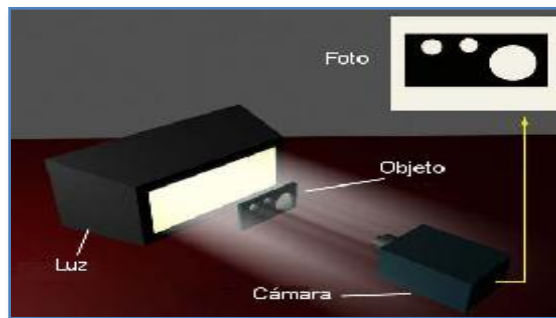
²⁴ IMAGEN Y FOTO DIGITAL; la imagen digital; formatos de archivos; En: <http://www.digitalfotored.com/imagendigital>

3.3.5 Digitalización de imágenes: El proceso de digitalización es un proceso de transformación de una imagen en medio físico, a una imagen que se pueda visualizar por computador. La captura de las imágenes y conversión a medio digital, se puede hacer mediante escáneres, cámaras de video o cámaras fotográficas digitales.

El sistema general de adquisición y procesamiento de las imágenes consta de los siguientes componentes:

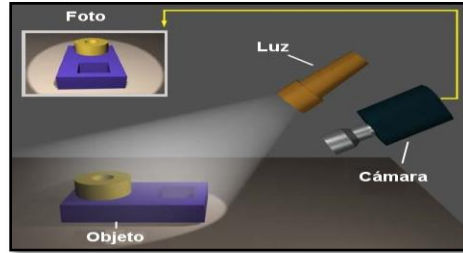
a) *Fuente de luz:* Suministra iluminación, mediante la cual el dispositivo de adquisición puede ver la información visual acerca de los objetos con claridad. Con respecto a la posición, se puede ubicar la fuente detrás del objeto (contraluz), para producir una silueta del mismo con un buen contraste, así como se ilustra en la figura 14. Una aplicación de la fuente a contraluz, es la evaluación de las placas radiográficas.

Figura 14. Iluminación ubicada a contraluz



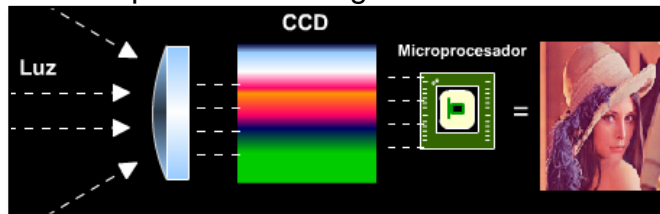
La fuente también se puede colocar frente al objeto (iluminación frontal) reflejándose la luz del mismo hacia la cámara como se muestra en la figura 15. Una de las ventajas de este tipo de iluminación es que revela la superficie y la textura del objeto. Sin embargo, este posicionamiento puede dar como resultado sombras, que podrían impedir al sistema de visión analizar correctamente las características del objeto.

Figura 15. Iluminación frontal



b) *Cámara:* Las cámaras digitales capturan imágenes electrónicamente y las convierten en datos que un computador puede almacenar y tratar. Estas cámaras poseen lente, diafragma, obturador y se basan en la luz para capturar imágenes mediante un sensor fotoeléctrico que puede ser un Dispositivo de Acoplamiento de Carga (CCD) o un Semiconductor Complementario de Oxido Metálico (CMOS), que detectan el volumen de luz recibido y emiten señales eléctricas y a través de un microprocesador, se transforman en lenguaje binario para ser transferidas a un computador.²⁵ La figura 16 muestra el sistema general de adquisición de imágenes de una cámara digital.

Figura 16. Sistema de adquisición de imágenes de una cámara digital



Fuente: Los autores

Es importante resaltar que la capacidad de visualización e interpretación de la imagen, depende de la calidad de la conversión de medio físico a digital y de la resolución de la cámara.

c) *Computador:* Permite procesar y analizar la información proveniente de la cámara mediante un software de procesamiento de imágenes. Para la

²⁵ WATANABE, P.C.A. et al. Estado atual da arte da imagem digital em odontologia. Rev Assoc Paul Cirur Dent, v. 53, n.4, p.320-325, jul/ago 1999

visualización de imágenes radiográficas, es importante que el monitor utilizado tenga como mínimo los siguientes requisitos: luminancia de 100 cd/m^2 , resolución igual o mayor que 1280×1024 pixeles y tamaño máximo de pixel de $30 \text{ }\mu\text{m}$.²⁶

3.3.6 Procesamiento digital de imágenes: Los sistemas de visión realizan la identificación de defectos mediante características en la imagen de un objeto, suponiendo que estas características no cambian con respecto a las reales. Sin embargo, en algunas aplicaciones, el mismo objeto puede presentar características diferentes por la forma en que la cámara adquiere esta información. El procesamiento digital de imágenes consiste en la utilización de herramientas asistidas por software, las cuales permiten realizar un mejoramiento, realzar características específicas y realizar análisis de las imágenes.

Para el procesamiento de imágenes, lo primero que se hace es evaluar la calidad de la imagen, la cual viene determinada desde el proceso de captura de la misma. Existen algunos problemas de interferencia que afectan la calidad de la imagen, tales como una mala posición de la cámara en relación al objeto que se captura, tipo de iluminación utilizada, presencia de ondas electromagnéticas, etc. Asimismo, se debe decidir qué características se desean analizar y definir cuál es la zona de interés dentro de la imagen.

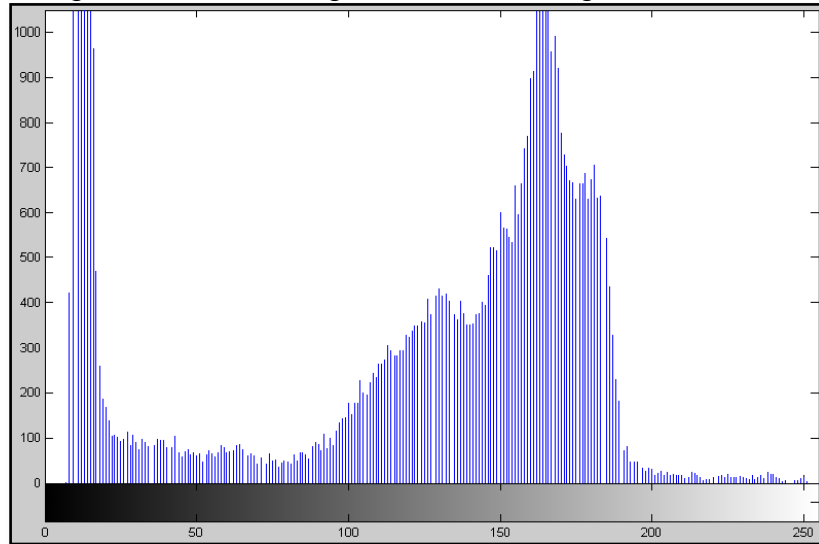
Dos herramientas comúnmente utilizadas en el procesamiento digital de imágenes son los ajustes en el histograma y la binarización de las imágenes.

El histograma de una imagen, como se observa en la figura 17, permite medir la frecuencia de cada nivel de gris en la imagen. El eje horizontal del histograma

²⁶ Aiub de Mello, Marcos; B. Rabello, José Mauricio; T. Iguchi, Eduardo, Alves Marinho, Carla; Digitalização de filmes radiográficos industriais – O estado da arte; Imagem Digital – Visão geral; XXVI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção; 12^a CONAEND & IEV; São Paulo, junho de 2008; p.8

representa todos los niveles de gris posibles en la imagen, mientras que el eje vertical representa la cantidad de píxeles con cada uno de esos valores. Dado que un histograma resume la distribución de valores de píxeles en una imagen, permite revelar el grado de contraste o brillo de la misma.

Figura 17. Histograma de una imagen en escala de grises



Fuente: Los autores

El contraste es un factor importante en la determinación de la calidad de las imágenes, especialmente si se trata de imágenes radiográficas. El contraste de una imagen digital se refiere al rango de niveles de gris de la misma. Si un histograma no cubre todos los niveles de grises, su contraste es bajo. El ajuste de contraste puede volver una imagen más nítida o más borrosa, hacer que los colores parezcan más saturados y resaltar áreas específicas.²⁷

El ajuste del brillo aclara u oscurece toda la imagen o un área seleccionada de ella. Si una imagen es demasiado clara o demasiado oscura, será difícil reconocer los objetos en ella, ya que los píxeles del objeto tendrán valores similares a los

²⁷ SENA; Curso virtual Vision por Computador y Procesamiento de imágenes; actividad 3, Calidad de la imagen y problemas de interferencia; Junio 2008; p.15.

pixeles del fondo. En tal caso, será necesario ajustar el contraste o el brillo de la imagen para facilitar las operaciones de análisis.²⁸

Por otro lado, cuando la característica principal de una imagen es de un color y el fondo de otro color, se puede elegir un valor de umbral entre ambas áreas para reducirla a blanco y negro, definiendo por ejemplo que todo color que esté por encima de dicho umbral sea blanco y todo color que esté por debajo de él, sea negro. Esta umbralización se puede utilizar para seleccionar características de las imágenes con fines de cálculo entre las cuales están área, perímetro, dimensiones, forma, etc.

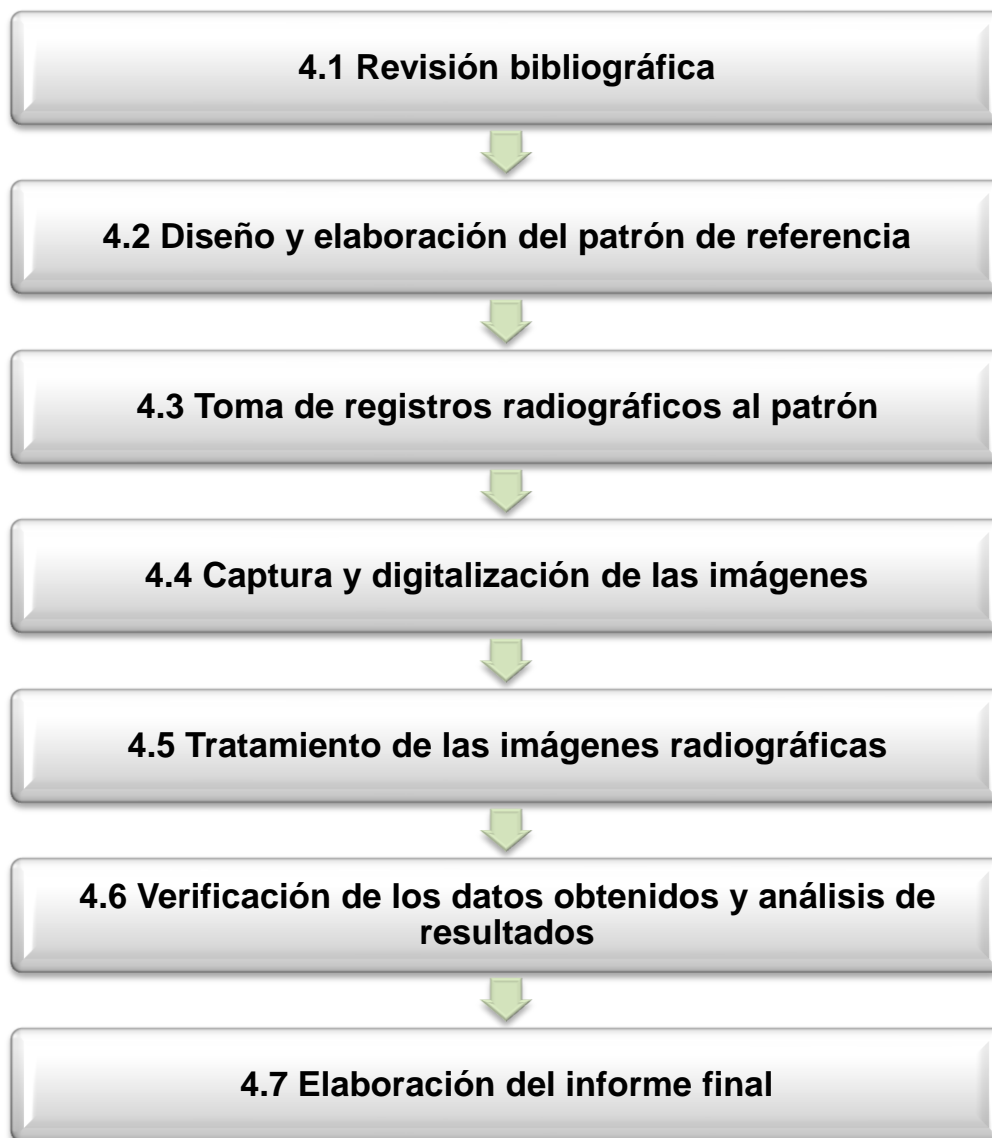
La mayoría de los paquetes de software de procesamiento de imágenes le permiten al usuario utilizar algoritmos incorporados, que se emplean para mejorar la calidad de la imagen.

²⁸ Ibid, p.17

4. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA

La metodología desarrollada en la presente investigación, consistió de 7 etapas, las cuales se ilustran en el esquema de la figura 18.

Figura 18. Diagrama esquemático de la metodología de trabajo



4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA:

La primera etapa, la cual se llevó a cabo durante todo el proyecto, consistió en una minuciosa revisión bibliográfica de libros especializados, tesis, manuales, artículos, normas técnicas, revistas, información digital y páginas de Internet, que permitió obtener la información y los conocimientos necesarios en temas específicos tales como defectología de piezas tubulares, el proceso de radiografía industrial, digitalización de imágenes y software para tratamiento de imágenes.

4.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PATRÓN DE REFERENCIA:

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, la disponibilidad de materiales, las dimensiones de la película radiográfica y la capacidad operativa del equipo de rayos X del laboratorio de END de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander, se definió el diseño con las características propias y dimensiones del patrón de referencia, para realizarle las tomas radiográficas y posterior digitalización y tratamiento de las imágenes radiográficas.

El patrón de tubería fue mecanizado con torno y fresadora, en los talleres de la División de Mantenimiento Tecnológico de la Universidad Industrial de Santander, donde se simuló discontinuidades superficiales tanto en la superficie externa como en la superficie interna. Los detalles geométricos y dimensionales del patrón se presentan en el capítulo 5.

El patrón se elaboró a partir de un tramo de tubería de acero ASTM A53 grado A, utilizada para el transporte de fluidos, disponible en el mercado local. En la tabla 1 se presentan la composición química y otras características básicas de la tubería utilizada.

Tabla 1. Características del tramo de tubería

Tipo de acero	Schedule	Diámetro exterior (mm)	Espesor de pared (mm)	Longitud (mm)	Aplicaciones			
ASTM A53	40	73	6	225	Instalaciones de gas y conducción de fluidos poco corrosivos como aceite, aire, agua, gas y vapor a altas y medias presiones			
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO DEL PATRÓN DE TUBERÍA²⁹								
%C	%Mn	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mb	%V
0,25	0,95	0,050	0,045	0,40	0,40	0,40	0,15	0,08

Adicionalmente se empleó como patrón de calibración para las tomas radiográficas, una escalerilla de acero de 18 pasos (ver figura 19), la cual se tomó de un anterior trabajo de grado.³⁰ Debido a que la escalerilla presenta disminuciones de espesor casi constantes, se le realizaron tomas radiográficas, con el fin de evaluar las densidades resultantes, las cuales sirvieron para determinar los niveles de gris presentes durante el procesamiento digital de las imágenes radiográficas del patrón. El Anexo 2 muestra las dimensiones de la escalerilla.

Figura 19. Escalerilla de calibración



Fuente: Los autores

²⁹ ASTM A53/A 53M-07; Standard specification for pipe, steel, black and hot-dipped, zinc-coated, welded and seamless; p.1.

³⁰ Quintero G. Norberto A; Cáceres J. Cesar E; Elaboracion de cartas de exposición radiografica mediante un proceso de simulación asistido por computador; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga-Colombia; 1992; p70.

4.3 TOMA DE REGISTROS RADIOGRAFICOS AL PATRÓN




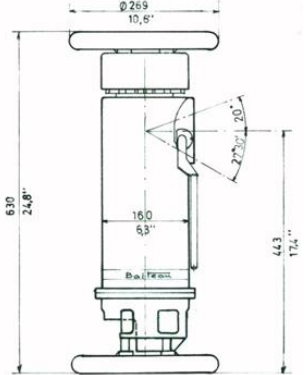
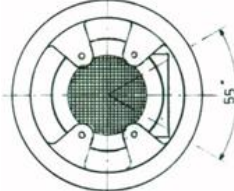
Esta fase de la metodología consistió en tres etapas en las cuales se obtuvieron las condiciones de exposición de las tomas radiográficas, el montaje y adecuación para realizar las tomas y el proceso de revelado de las películas.

Luego de la revisión bibliográfica, se evaluaron las diferentes técnicas posibles para realizar las tomas radiográficas al patrón de tubería. De acuerdo a las dimensiones del patrón, las características del equipo de rayos X y los elementos disponibles en el laboratorio, se definió que la técnica de Doble Pared – Doble Imagen, era la más adecuada.

Con el fin de determinar las mejores condiciones de exposición para el patrón de referencia, se hicieron 11 tomas radiográficas, con diferentes condiciones de exposición; cada una de ellas se realizó primero a la escalerilla y luego al patrón, manteniendo las mismas condiciones, las cuales fueron comparadas entre sí para determinar las imágenes radiográficas de mejor calidad que posteriormente fueron digitalizadas y procesadas mediante un software para tratamiento de imágenes.

4.3.1 Determinación de las condiciones de exposición de las tomas radiográficas: El laboratorio de END, cuenta con un equipo de rayos X el cual fue utilizado para realizar las tomas radiográficas de esta investigación y sus características se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Características del equipo de rayos X

EQUIPO DE RAYOS X		
Marca	BALTOSPOT GFD165	
Rango de kilovoltaje (kV)	50 – 160	
Rango de corriente en el tubo (mA)	0,1 – 5	
Tamaño del punto focal (mm²)	1,5 * 1,5	
Tipo de enfriamiento	Aire	
Máxima temperatura de operación (°C)	70	
Unidad de control	CF2000	
Diafragma	Rectangular	
Apertura lateral del haz de radiación	47,30°	
Apertura superior del haz de radiación	55°	

Fuente: Operating and maintenance manual – BALTOSPOT

Una vez identificadas las características del equipo de rayos X y definida la técnica radiográfica a utilizar, se establecieron las variables para calcular las condiciones de exposición, las cuales fueron:

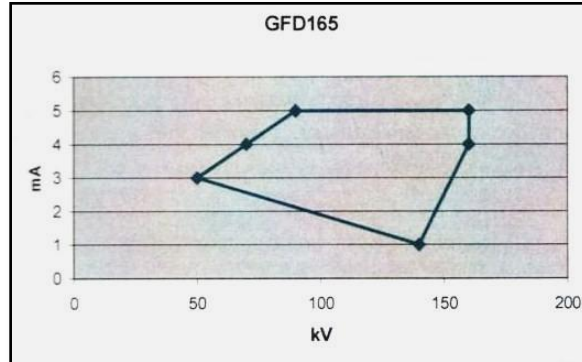
- a) Material de la pieza
- b) Miliamperaje
- c) Kilovoltaje
- d) Espesor de la pieza
- e) Tiempo de exposición
- f) Distancia Fuente – Película
- g) Tipo de película
- h) Pantallas intensificadoras

a.) *Material de la pieza:* El material de la pieza es acero al carbono, razón por la cual se ubicó en el manual de operación y mantenimiento del equipo, el ábaco* utilizado para irradiar piezas de hierro. Este ábaco se muestra en el Anexo 4.

b.) *Miliamperaje:* De acuerdo con las características del equipo de rayos X, utilizando el gráfico de la figura 20, se estableció que la corriente de operación fuera de 5mA para el rango de kilovoltajes empleado en las pruebas, que fue entre 120 y 160 kV.

* Abaco es una grafica que correlaciona las características de la pieza junto con el kV, el mA, el tiempo de exposición, la distancia fuente – película y el uso o no de pantallas intensificadoras, el tipo de equipo y el tipo de película.

Figura 20. Diagrama miliamperaje vs kilovoltaje



Fuente: Operating and maintenance manual – BALTOSPOT

- c.) *Kilovoltaje:* Se realizaron tomas con 120kV y 140kV, para evaluar las densidades resultantes, el contraste y definición de las imágenes radiográficas resultantes.
- d.) *Espesor de la pieza:* El espesor de la pieza a radiografiar se tomó como el doble del espesor de pared del patrón de tubería en la zona de interés, debido a que la técnica radiográfica empleada fue la de Doble pared – Doble imagen. Los espesores a evaluar según el kilovoltaje utilizado se definieron de acuerdo al gráfico del Anexo 5. Debido a que la superficie a evaluar no era uniforme, sino escalonada, se realizaron cálculos con espesores intermedios entre el espesor más alto y el más bajo tanto de la escalerilla como del patrón.
- e.) *Tiempo de exposición:* El tiempo de exposición se calculó de acuerdo al kilovoltaje y al espesor establecido, interpolando esos valores en el ábaco para hallar el tiempo de exposición necesario. Luego, el valor de tiempo hallado se multiplicó por un factor de corrección asociado al tipo de película indicado en el ábaco. Los valores de exposición se hallaron aplicando la ecuación [1].
- f.) *Distancia fuente – película (DFP):* El ábaco está diseñado para una DFP de 700 mm, con los cuales se calcularon las condiciones iniciales de exposición.


Algunas tomas se realizaron con esta distancia y otras a 1000 mm, debido a que existen estudios que muestran que la DFP debe ser superior a 8 veces el diámetro del tubo,³¹ para obtener menor penumbra y mejor calidad de imagen. Para obtener los valores de exposición modificando la distancia, se utilizó la ecuación [3].

g.) *Tipo de película:* El tipo de película radiográfica disponible en el laboratorio y que fue utilizada fue de marca AGFA tipo STRUCTURIX D7 Rollpac Pb, cuyas características se muestran en el cuadro 5.

h.) *Pantallas intensificadoras:* Las películas utilizadas tienen incluidas pantallas intensificadoras de 0.027mm de espesor, ubicadas en ambas caras de la película con el fin de disminuir el tiempo de exposición e incrementar el efecto fotográfico.

Cuadro 5. Características de la película radiográfica

PELICULA RADIOGRAFICA	
Marca	AGFA STRUCTURIX D7
Granulometría	Fina
Pantallas intensificadoras	Láminas de plomo en ambas caras
Velocidad	Rápida
Contraste	Alto
Dimensiones	10 x 26 cm para el patrón 10 x 23 cm para la escalerilla

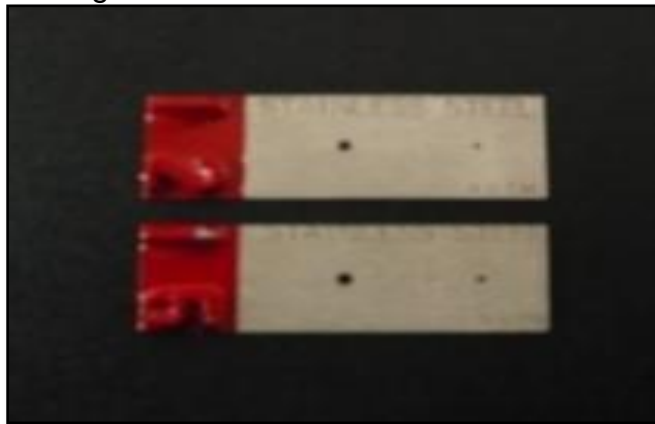


Después de establecidos los valores iniciales de las variables de las condiciones de exposición, se aplicó la ecuación [3], para hallar las condiciones definitivas de cada una de las tomas radiográficas.

³¹ Redouan Draï, Yacine Kabir, Amal Azmane, Farid Adbat, Amar Benchaala; "Evaluation of corroded pipelines wall thickness using image processing in Industrial Radiography". Laboratoire de traitement de signal et de l'image du Centre de Soudage et de Contrôle. Route de Dély-brahim Chéragha – Algérie; WCNDT-Roma-2000.

Una vez definido el espesor de interés en cada toma, se ubicó allí el respectivo IQI tanto en la escalerilla como en el patrón. Se utilizaron indicadores API 1104 y ASTM E-142 de la figura 21, donde finalmente se determinó utilizar los ASTM por efectos de concordancia con la norma de fabricación de la tubería. El número de indicadores seleccionados y los espesores donde fueron ubicados, se seleccionaron de acuerdo a la tabla 2.

Figura 21. Registro fotográfico de los IQI ASTM E-142 utilizados



Fuente: Los autores

Tabla 2. Espesor de pared en tuberías vs espesor de IQI ASTM E142

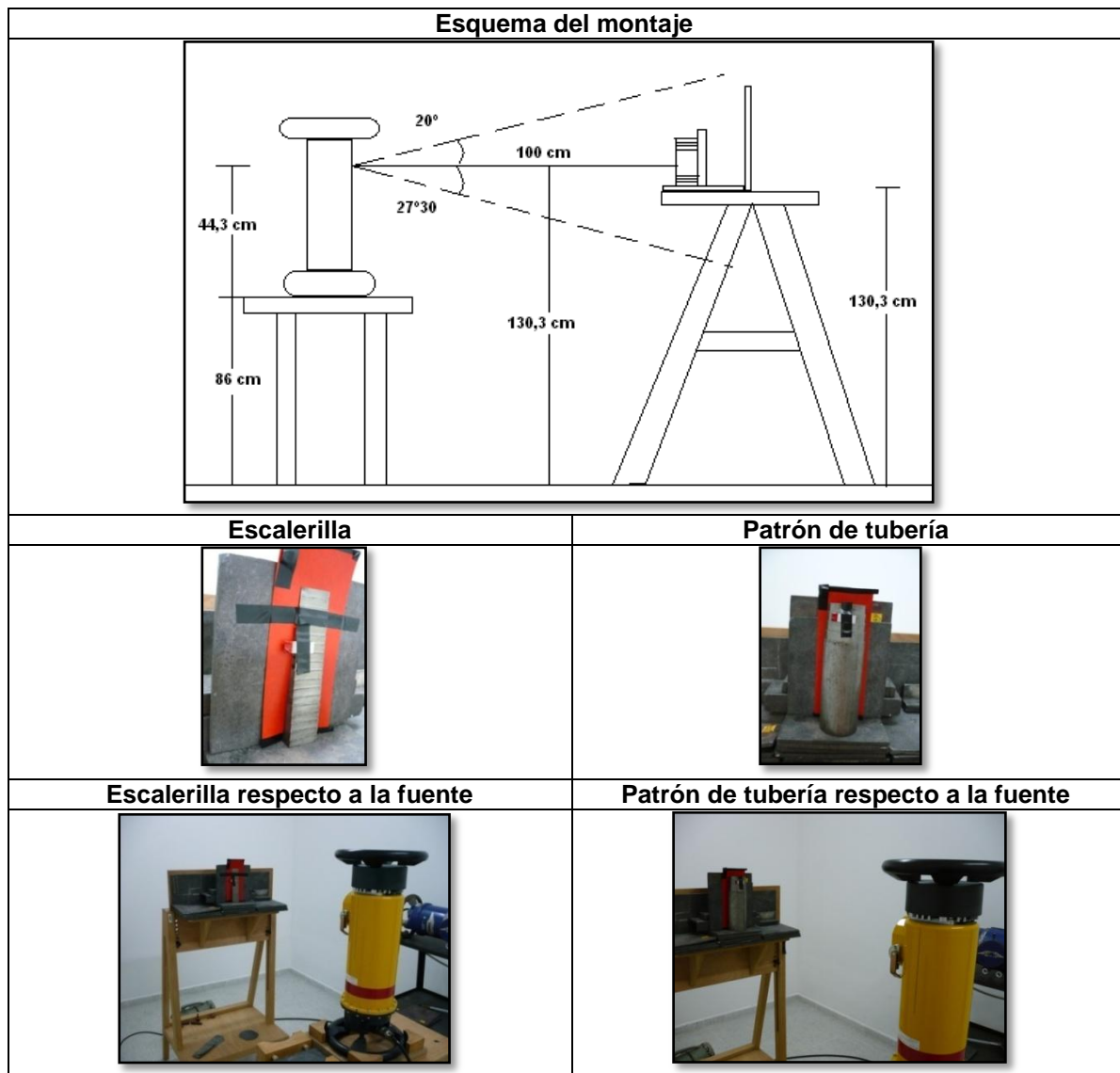
ESPESOR DE PARED Vs ESPESOR DE PENETRAMETRO ASTM E 142				
Espesor de pared o espesor de soldadura		Máximo espesor del penetrámetro		Número de identificación
in	mm	in	mm	
0 – 1/4	0 – 6.35	0.0125	0.317	12
1/4 – 3/8	>6.35 – 9.52	0.0150	0.381	15
3/8 – 1/2	>9.52 – 12.70	0.0175	0.444	17
1/2 – 3/4	>12.70 – 19.05	0.020	0.508	20
3/4 – 1	>19.05 – 25.40	0.025	0.635	25
1 - 2	>25.40 – 50.80	0.030	0.762	30

Fuente: RADIATRONICS NDT.COM, INC.

4.3.2 Tomas radiográficas: Para las tomas radiográficas, la escalerilla y el patrón se ubicaron de manera vertical procurando que el haz actuara en el centro de la pieza; a una altura de acuerdo a la apertura del haz de radiación y la ubicación del equipo. Los orificios del patrón se ubicaron en contacto con la película y se colocó

un diafragma rectangular frente a la fuente de radiación para efectos de reducir el área de exposición y disminuir la radiación dispersa. Las tomas radiográficas se realizaron en el cuarto blindado del laboratorio de END, adecuado para realizar tomas radiográficas. El cuadro 6 muestra como fue el montaje de las tomas radiográficas en forma esquemática y con registro fotográfico.

Cuadro 6. Montajes de las piezas durante las tomas radiográficas



4.3.3. Revelado de las películas radiográficas: El revelado se hizo de forma manual según la norma ASTM E-999-05 en grupos de a cuatro películas en bandejas donde se depositaban las diferentes mezclas utilizadas para tal proceso; el lugar fue un cuarto oscuro con una luz roja de baja intensidad. Los reactivos utilizados y condiciones del proceso de revelado, se indican en la tabla 3:

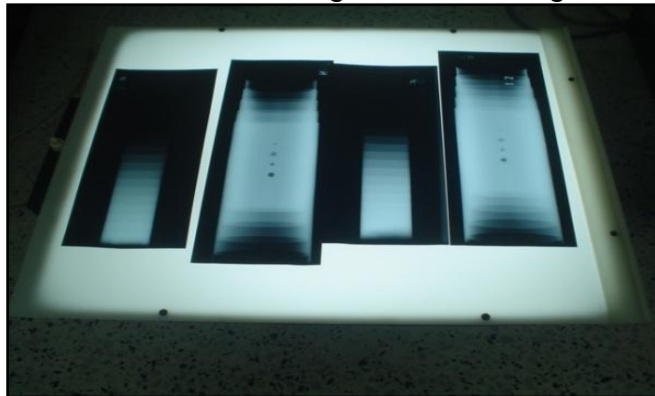
Tabla 3. Proceso de revelado de las películas radiográficas

Reactivo	Marca	Para 1 Litro		T (°C)	Tiempo de inmersión de la película	Agitación
		Cantidad de producto (L)	Agua (L)			
Revelador	Kodak GBX	0,2	0,8	25	2 minutos	Vigorosa
Baño de parada	Ácido acético	0,025	0,78	25	30 segundos	Moderada
Fijador	Kodak GBX	0,2	0,8	25	5 minutos	Vigorosa
Agua de lavado	Agua del grifo	1		25	15 minutos	Sin agitación

Fuente: Guide to manual processing of NDT film – TI2643

Después de obtenidas las radiografías, se realizó una inspección visual preliminar de cada película en un negatoscopio tal como se muestra en la figura 22, para escoger las de mejor calidad.


Figura 22. Inspección visual de las radiografías en el negatoscopio



Fuente: Los autores

De acuerdo a lo anterior se preseleccionaron las películas radiográficas que mostraron mejor calidad. Las mediciones de densidades se realizaron utilizando un densitómetro cuyas características se presentan en el cuadro 7.


Cuadro 7. Características del densitómetro

Marca	Tipo	Imagen del densitómetro
Macbeth TD528	Densitómetro de transmisión	

4.4 CAPTURA Y DIGITALIZACIÓN DE LAS IMÁGENES RADIOGRÁFICAS

Después de analizar las radiografías preseleccionadas, se seleccionó la mejor tanto de la escalerilla como del patrón, de acuerdo a la definición de la imagen y los valores de densidades en las zonas a evaluar. Posteriormente se realizó la captura y digitalización de éstas, en las instalaciones del CENTIC con el apoyo de la División de Servicios de Información de la universidad, utilizando una cámara digital cuyas características se describen en el cuadro 8.

Cuadro 8. Características de la cámara fotográfica

Marca	Tipo	Tipo de sensor	Pixeles	Formato de imagen	Tamaño de imagen	Imagen de la cámara
CANON EOS DIGITAL REBEL XT/EOS 350 D	Cámara digital réflex monocular con AF /AE y flash incorporado	Sensor CMOS de una placa	8 megapixeles 3:2	RAW	8,3 MB (3456x2304 pixeles)	

Los parámetros tenidos en cuenta para una captura adecuada de las imágenes radiográficas fueron los presentados en el cuadro 9.

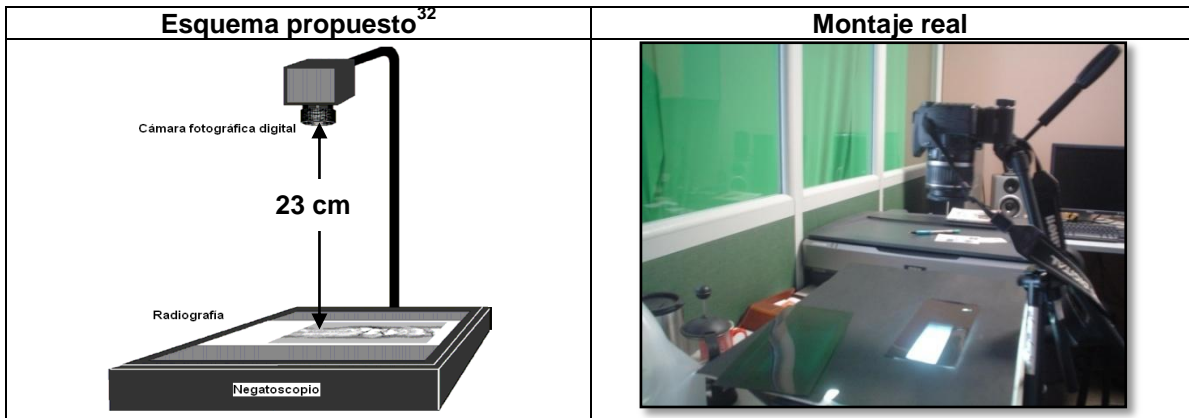
Cuadro 9. Parámetros de las tomas fotográficas

Fuente de luz	Distancia focal	Abertura del diafragma
<p>Se empleó el mismo negatoscopio de luz blanca con el cual fueron observadas las radiografías, ya que su luz era lo suficientemente intensa como para ser direccionada hacia la cámara. La posición de la luz con respecto a la radiografía fue a contraluz. Las tomas fotográficas se realizaron con la menor luz exterior posible y sin flash.</p>	<p>La distancia fue definida hasta el punto de quedar lo suficientemente cerca para capturar los detalles y lo suficientemente lejos para abarcar toda la imagen.</p>	<p>La abertura del diafragma controla el paso de luz, lo cual se ajustó hasta que se pudo visualizar las regiones de interés en las radiografías manteniendo un nivel de brillo adecuado.</p>

Fuente: Los autores

Para la captura, se realizó un montaje como se muestra en el cuadro 10, donde la cámara se ubicó a una distancia de 23 cm sobre la radiografía; la radiografía fue enmascarada con una cartulina negra para que la cámara solo capturara el paso de luz a través de la radiografía.

Cuadro 10. Montaje de captura de imágenes.



Fuente: Los autores

³² Aiub de Mello, Marcos; B. Rabello, José Mauricio; T. Iguchi, Eduardo, Alves Marinho, Carla; Digitalização de filmes radiográficos industriais – O estado da arte; Imagem Digital – Visão geral; XXVI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção; 12^a CONAEND & IEV; São Paulo, junho de 2008; p.3.

4.5 TRATAMIENTO DE LAS IMÁGENES RADIOGRÁFICAS:

Durante el proceso del tratamiento digital de las imágenes, se utilizó la plataforma de MatLab,^{*} la cual es una herramienta de programación que permite realizar cálculos numéricos con números escalares, vectores y matrices.³³

Para el procesamiento de imágenes, MatLab posee códigos y librerías especializadas (Toolbox), que contienen un conjunto de funciones para trabajar con imágenes binarias, transformaciones geométricas, morfología y manipulación de color.³⁴ Para el manejo del toolbox de imágenes de MatLab, se recibió una capacitación básica complementada con la revisión bibliográfica y la asesoría del codirector de la investigación.

Se realizaron mediciones de cantidad de píxeles y de los niveles de gris, utilizando perfiles^{**} de las imágenes, para calcular el valor de los espesores remanentes y las profundidades, utilizando una curva de referencia que se elaboró. De igual manera se realizaron mediciones en cantidad de píxeles de regiones de interés, para calcular longitudes y áreas.

4.6 VERIFICACION DE LOS DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de los ensayos se encuentran debidamente organizados y reportados en el capítulo 5, en el cual se muestran las diferentes etapas de cada

^{*} Acrónimo en inglés para Matrix Laboratory.

³³ J.G. Velásquez-Aguilar, U. Alcázar-Carreño, R. Mañón-Abarca, L. Martínez-Rebollar, G. Ortiz-Ojeda; Herramienta de apoyo para cursos de procesamiento digital de imagen; Universidad Autónoma del Estado de Morelos; Cuernavaca-México.

³⁴ Cuevas Jimenez Erik Valdemar; Zaldivar Navarro Daniel; Visión por Computador utilizando MatLAB el Toolbox de Procesamiento Digital de Imágenes; p.4.

^{**} Perfil se denomina a un segmento de la imagen que se convierte a una señal unidimensional, para analizar sus cambios.

ensayo, las variables establecidas, los resultados obtenidos y sus respectivos análisis de donde finalmente se sacaron las conclusiones.

4.7 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Finalmente se elaboró el presente informe escrito donde se describe la totalidad de la investigación desarrollada.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en esta investigación y sus respectivos análisis.

5.1 DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PATRÓN DE REFERENCIA

Las discontinuidades simuladas en el patrón de referencia fueron disminuciones de espesor y picaduras, ya que son algunos de los tipos de defectología presentes en líneas de tuberías utilizadas en el transporte de fluidos.

La distribución de las discontinuidades en el patrón fue diseñada, combinando los modelos de patrones encontrados en la bibliografía revisada, con el fin de tener discontinuidades tanto externas como internas.

En uno de los extremos del tubo, se diseñaron cuatro disminuciones de espesor externas, aproximadamente del 20%, 40%, 60% y 80% del espesor nominal, al igual que en el otro extremo, pero en el interior del tubo; a cada disminución de espesor se le denominó “paso”.

La selección de esta disminución de espesores se basó en el código ASME B31 G que contempla que pérdidas de espesor inferiores al 10% no son significativas y superiores al 80% se considera que se debe reemplazar la tubería. Debido a las limitaciones del torno utilizado en el maquinado, no era posible maquinar disminuciones de espesor menores del 20% del espesor nominal.

Para simular las picaduras, se diseñaron cuatro orificios en línea con diferentes dimensiones a lo largo de la superficie externa del patrón. La profundidad de los orificios se diseñó con el mismo porcentaje que las disminuciones de espesor, con

respecto al espesor nominal. Después del maquinado, el fondo de cada orificio no fue totalmente plano debido a que allí, quedó una pequeña protuberancia causada por la fresa utilizada en el maquinado.

La medición de las discontinuidades simuladas, se realizaron en Fresados de Santander utilizando un calibrador, previamente calibrado. Se pudo comprobar que las disminuciones de espesor de las discontinuidades, no correspondieron exactamente a las del diseño, debido a que el espesor nominal del tubo no era completamente homogéneo y además las herramientas con las cuales se realizó el maquinado, no son automatizadas.

La figura 23 muestra el plano de diseño del patrón de referencia, el cuadro 11 muestra un registro fotográfico del patrón, donde se identifican los pasos y los orificios elaborados y la tabla 4 muestra las dimensiones finales de las discontinuidades simuladas del patrón de referencia.

Cuadro 11. Identificación de los pasos y las perforaciones



Fuente: Los autores

Tabla 4. Dimensiones reales de las discontinuidades simuladas en el patrón de tubería

DIMENSIONES DE LAS DISCONTINUIDADES DEL PATRON (mm)											
Disminuciones de espesor en el patrón											
Paso	Espesor del paso		Ancho del paso		Longitud del tubo	Espesor nominal					
	Externo	Interno	Externo	Interno							
1	4,96	4.25	14.4	15.5	225	6					
2	3.75	3.1	15	15.5							
3	2.68	2,08	15.4	15							
4	1,12	0,98	15.2	15							
Orificios en el patrón											
Orificio # 1			Orificio # 2			Orificio # 3			Orificio # 4		
∅	Profundidad		∅	Profundidad		∅	Profundidad		∅	Profundidad	
5	4,4		3,4	3.0		5	2.55		3.4	1	
DISMINUCIÓN DE ESPESOR CON RESPECTO AL ESPESOR NOMINAL (%)											
Pasos externos				Pasos internos				Orificios			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
17,3	35,3	55,3	80	29,1	48,3	65,3	83,6	26,6	50	57,5	83,3

Fuente: Los autores

5.2 TOMA DE REGISTROS RADIOGRÁFICOS AL PATRÓN

Obtener unas buenas imágenes digitales se logra si se obtienen unas buenas radiografías, por ese motivo se tomaron 11 radiografías con diferentes condiciones de exposición, mientras se evaluaba cuales presentaron la mejor calidad hasta que se escogió la definitiva. La tabla 5 muestra las diferentes condiciones de exposición de cada una de las radiografías.

Tabla 5. Condiciones de exposición de las 11 radiografías

Nombre de las muestras (escalerilla y patrón)	mA	kV	DFP (mm)	Espesor de interés (mm)	Tiempo de exposición	Indicador	Tipo de película
UN ₁	5	120	1000	2	1'1"	ASTM-E142 #12	D7
QN	5	120	1000	6	6'26"	ASTM-E142 #12	D7
N	5	140	700	2	38"	API 1104 #5	D7
UN ₂	5	140	700	3	54"	ASTM-E142 #12	D7
DD	5	140	700	1	27"	API 1104 #5	D7
QU	5	140	1000	1	55"	API 1104 #5	D7
NQ ₁	5	140	1000	3	1'1"	ASTM-E142 #12	D7
UD	5	140	1000	5	1'50"	ASTM-E142 #12	D7
DUN	5	140	1000	6	2'39"	ASTM-E142 #12	D7
NQ ₂	5	140	1000	7	3'19"	ASTM-E142 #15	D7
NDD	5	140	1000	7	4'36"	ASTM-E142 #15	D7

Durante la evaluación de cada una de las radiografías obtenidas, se buscó que fueran claramente visibles los 4 pasos externos e internos en las disminuciones de espesor y los 4 orificios de la superficie del tubo. Pero debido a las limitaciones de la técnica radiográfica, del equipo de rayos X y el tipo de película utilizada, no fue posible que fueran visibles con nitidez y un buen contraste, la totalidad de los 4 pasos, especialmente los del interior del tubo. Por ese motivo, el paso 4 (correspondiente al 80% del espesor nominal), fue omitido de los análisis, lo que llevó a la búsqueda de condiciones de exposición a partir de un espesor mínimo en la escalerilla, cercano al del paso 3, buscando que éste fuera claramente visible al igual que la totalidad de los orificios.

El intervalo de espesores seleccionados para el análisis de las densidades de las radiografías, fue entre 4mm y 9mm, dentro del cual se ubican los espesores de interés del patrón.

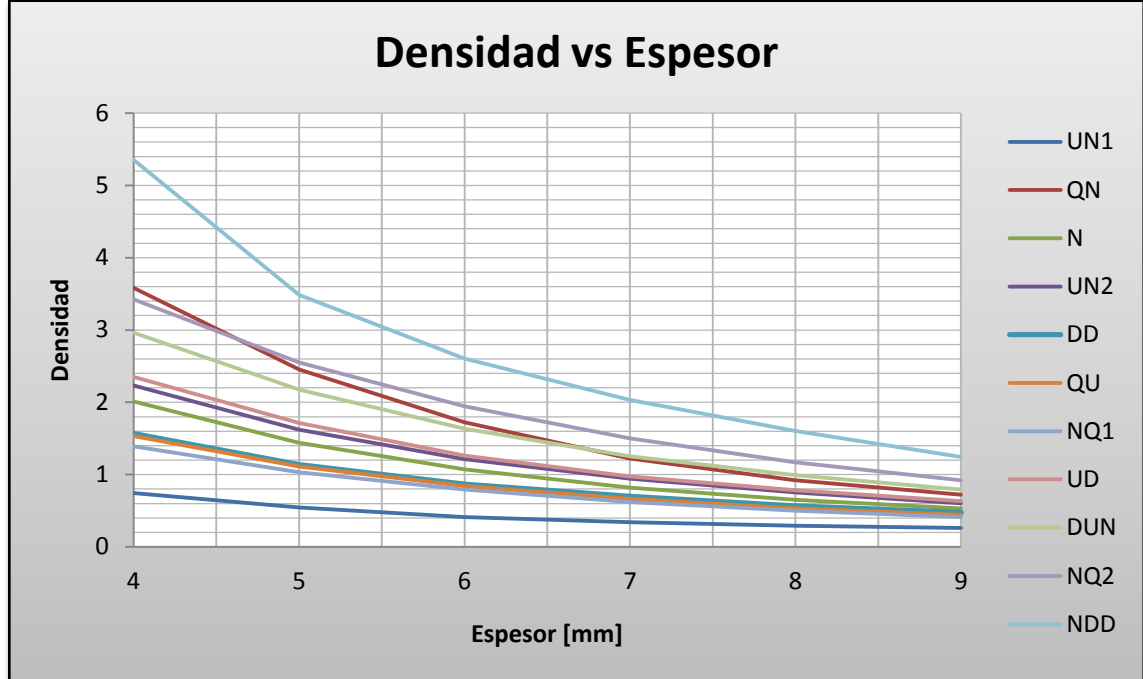
Después del proceso de revelado de las películas radiográficas, se realizaron mediciones de densidades en las radiografías correspondientes a la escalerilla, en los pasos del 5 al 10, equivalentes a los espesores del intervalo seleccionado, mostrando los resultados indicados de la tabla 6.

Tabla 6. Densidades de las radiografías de la escalerilla

Nombre de la película	Paso 5 (4mm)	Paso 6 (5mm)	Paso 7 (6mm)	Paso 8 (7mm)	Paso 9 (8mm)	Paso 10 (9mm)
UN ₁	0,74	0,54	0,41	0,34	0,29	0,26
QN	3,58	2,45	1,72	1,22	0,92	0,72
N	2,01	1,44	1,07	0,82	0,65	0,53
UN ₂	2,23	1,62	1,21	0,94	0,75	0,60
DD	1,56	1,13	0,86	0,69	0,56	0,47
QU	1,53	1,11	0,84	0,66	0,53	0,44
NQ ₁	1,39	1,03	0,79	0,62	0,5	0,41
UD	2,35	1,71	1,26	0,97	0,78	0,63
DUN	2,96	2,17	1,63	1,25	0,99	0,79
NQ ₂	3,42	2,55	1,94	1,50	1,17	0,92
NDD	5,35	3,48	2,60	2,03	1,60	1,24

Como se puede observar en la tabla, no fue posible obtener los valores de densidades en una misma radiografía, dentro del intervalo entre 1.5 y 4.0, especificado por la norma ASTM E1742-08a, pese a ensayar con diferentes condiciones de exposición, debido probablemente, a la diferencia de espesores de la pieza. En el gráfico de la figura 24, se muestra el comportamiento de las densidades con respecto a los espesores.

Figura 24. Densidad radiográfica en función del espesor de la escalerilla



Fuente: Los autores

El gráfico indica que a medida que aumenta el espesor de la muestra, disminuye el grado de ennegrecimiento de la radiografía, ubicando cada curva dentro de un intervalo de valores de densidad. La magnitud de este intervalo permite aproximarse a un análisis gráfico del nivel de contraste de cada una de las imágenes radiográficas.

Inicialmente se descartó la radiografía UN1 por tener valores de densidad por debajo de 1 aún en su menor espesor y la NDD por tener valores de densidad por encima de 4 en su menor espesor, implicando la pérdida de la información de un escalón adicional.

Descartadas las radiografías NDD y UN1, se evaluaron los valores de densidades de las 9 radiografías restantes, en los espesores de interés; los valores de densidad en tales espesores, debían cumplir con los requerimientos de la norma.

Las radiografías preseleccionadas que cumplen con los valores de densidades especificados en la norma en los espesores de interés, son las que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Radiografías preseleccionadas

Nombre de la radiografía	Espesor de interés (mm)	Densidad
QN	6	1,72
UD	5	1,71
DUN	6	1,63
NQ ₂	7	1,50

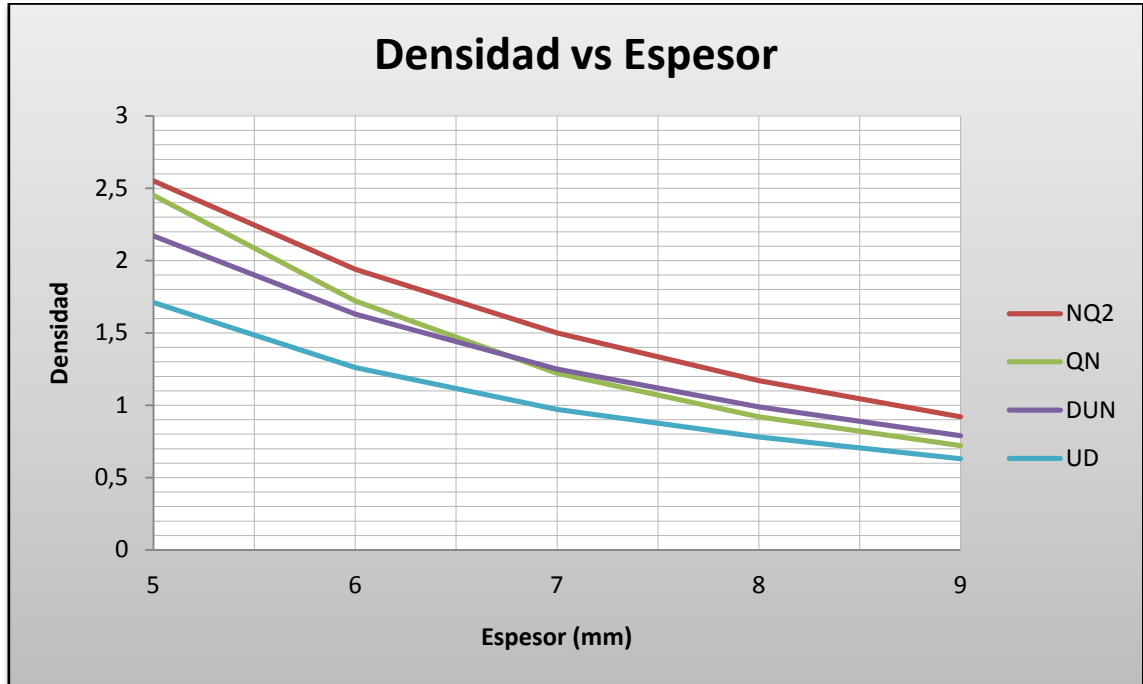
La tabla 8 muestra los valores de densidades en los espesores a evaluar, en las radiografías preseleccionadas.

Tabla 8. Densidades radiográficas de la escalerilla en los espesores a evaluar

Nombre de la película	Paso 6 (5mm)	Paso 7 (6mm)	Paso 8 (7mm)	Paso 9 (8mm)	Paso 10 (9mm)
NQ ₂	2,55	1,94	1,50	1,17	0,92
QN	2,45	1,72	1,22	0,92	0,72
DUN	2,17	1,63	1,25	0,99	0,79
UD	1,71	1,26	0,97	0,78	0,63

El gráfico de la figura 25 muestra la relación entre densidad radiográfica y espesor de las radiografías preseleccionadas.

Figura 25. Relación de densidades contra espesor de las radiografías preseleccionadas de la escalerilla.



Fuente: Los autores

El análisis del comportamiento de las curvas, permite una aproximación a la selección de la radiografía a digitalizar, debiendo ser aquella que presentara valores intermedios entre las densidades medidas, con el fin de no perder detalles importantes de la radiografía. Para confirmar lo anterior, se analizaron en el negatoscopio, las radiografías preseleccionadas del patrón, asegurándose de poder observar de manera nítida, el paso 3 de la superficie exterior e interior, así como el orificio 4. Todo lo anterior se hizo para garantizar que la cámara fotográfica captara estos detalles con total claridad. Producto del anterior análisis, fue la escogencia de la radiografía DUN tanto de la escalerilla como del patrón,

A las radiografías seleccionadas, se les verificó la calidad de imagen con respecto a la visibilidad de los tres orificios del IQI, donde se observaron todos claramente, tal como se muestra en el cuadro 12, lo cual las clasifica con un nivel de calidad

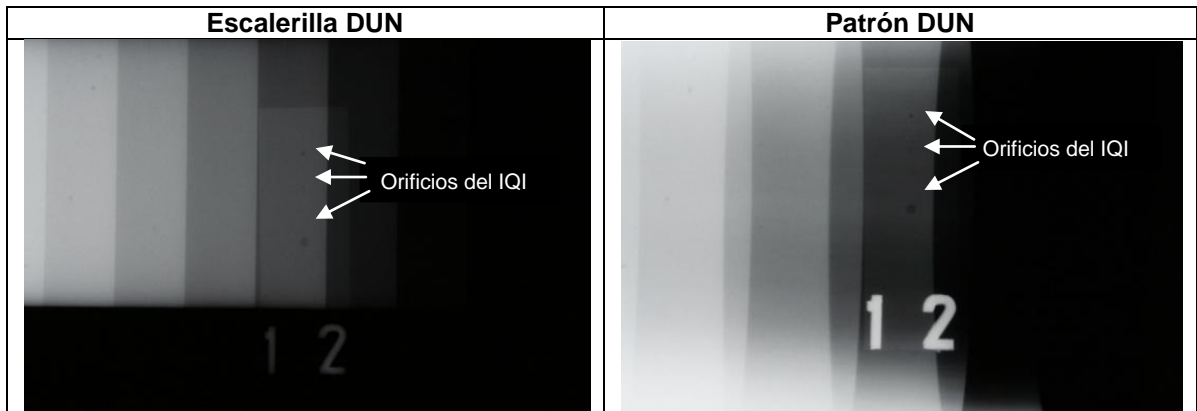
de imagen superior a 2-1T. La tabla 9 muestra la calidad de la imagen para indicadores ASTM de placas de espesor constante y orificios calibrados.

Tabla 9. Niveles de calidad de imagen

Niveles estándares de calidad de imagen			
Niveles de calidad de imagen	Espesores IQI	Mínimo orificio perceptible	Sensitividad equivalente, %
2-1T	1/50 (2%) del espesor de la pieza	1T	1,4
2-2T		2T	2,0
2-4T		4T	2,8
Niveles de especiales de calidad de imagen			
1-1T	1/100 (1%) del espesor de la pieza	1T	0.7
1-2T		2T	1
4-2T	1/25 (25%) del espesor de la pieza	2T	4

Fuente: Norma ASTM E1025-05

Cuadro 12. Calidad de imagen de la radiografía DUN

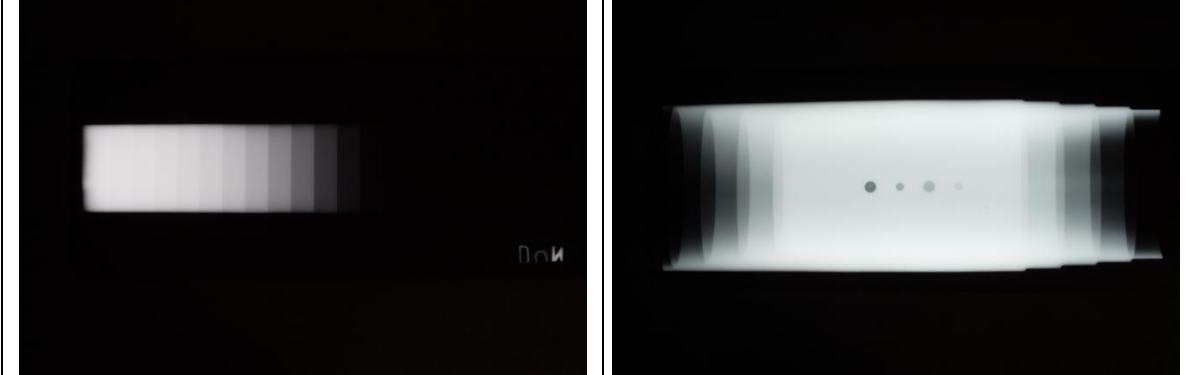


Fuente: Los autores

5.3 CAPTURA Y DIGITALIZACIÓN DE LAS IMÁGENES

Luego de seleccionada la radiografía definitiva, tanto de la escalera como del patrón, se tomaron las fotografías digitales de las películas con las características del cuadro 13.

Cuadro 13. Características de las tomas fotográficas de la radiografía DUN

Escalera DUN	Patrón DUN
	
Formato de imagen: RAW	
Tamaño de la imagen: 3456 x 2304 pixeles	
Tamaño de archivo: 7964 KB	Tamaño de archivo: 8121 KB
Espacio de color: RGB	
Longitud focal: 22 mm	
Valor de apertura del diafragma: F22	
Velocidad del obturador: 0,55 s	

Fuente: Los autores

Las fotografías fueron capturadas y digitalizadas en formato RAW, que es propio de éste tipo de cámaras. Este formato almacena gran cantidad de información, pero no es compatible con MatLab, que es el software empleado en esta investigación. Por esta razón las imágenes fueron convertidas a formato .tif mediante el software Digital Photo Professional, el cual es proporcionado por el fabricante de la cámara fotográfica.

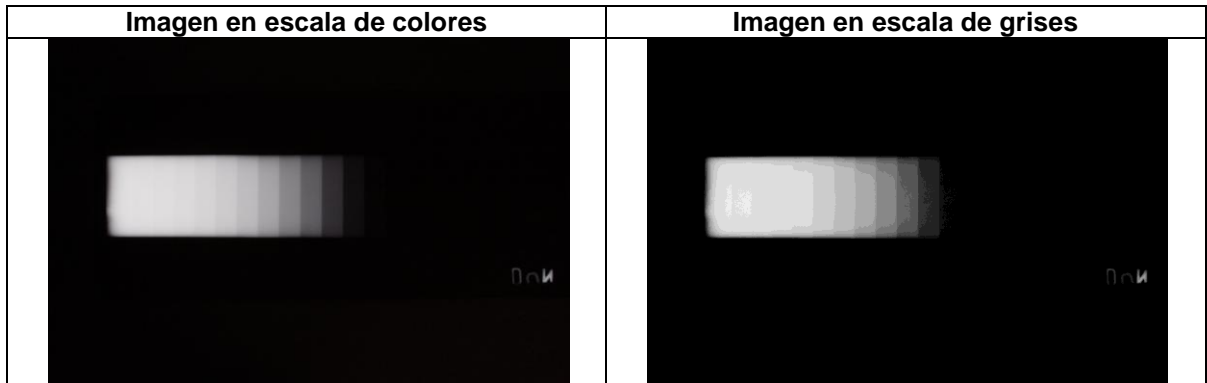
5.4 TRATAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES

El tratamiento de imágenes se efectuó de acuerdo a las siguientes etapas: segmentación, identificación, representación y caracterización (ver Anexo 6) con el fin de caracterizar las discontinuidades simuladas en el patrón. A las imágenes radiográficas digitalizadas, se le evaluaron características tales como tipo de color, tamaño y espacio ocupado en disco, para posteriormente adecuarlas y realizar las mediciones.

Con el fin de medir los espesores del patrón tubular, se elaboró una curva de referencia, utilizando los niveles de gris de la radiografía digitalizada de la escalera. Para determinar las dimensiones de los agujeros del patrón tubular se calculó experimentalmente un factor de conversión de píxeles a milímetros.

5.4.1 Elaboración de la curva de medición de espesores: Inicialmente la imagen de la escalera se cargó en MatLab, utilizando el comando *imread* y se visualizó con el comando *imshow*. Luego mediante el comando *whos* se pudo observar las características de tamaño y espacio ocupado en disco por la imagen. Debido a que la imagen original estaba en escala de colores RGB, se convirtió a escala de grises mediante el comando *rgb2gray* para facilitar su tratamiento y análisis. El cuadro 14 muestra la imagen en RGB y escala de grises.

Cuadro 14. Imagen en escala de color y escala de grises



Fuente: Los autores

Una vez convertida la imagen a escala de grises, se observó que es similar a la original, pero se diferencian en que la imagen en escala de color, está representada por una matriz tridimensional, mientras que la imagen en escala de grises está representada por una matriz bidimensional, lo cual se traduce en un menor tamaño de espacio ocupado en disco, tal como se muestra en la tabla 10.

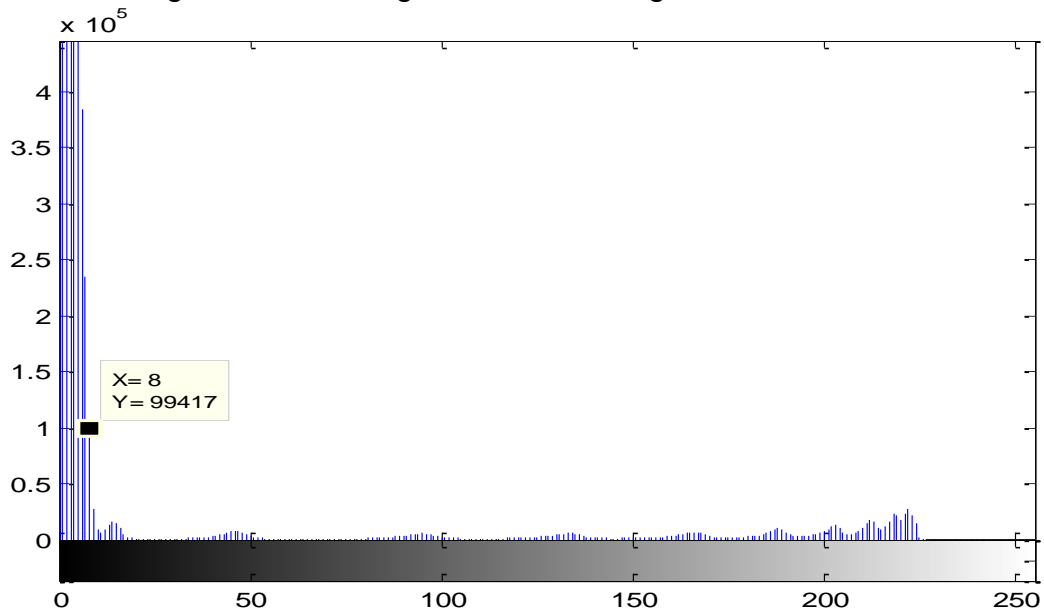
Tabla 10. Características de las imágenes en escala de color y escala de grises

Imágenes a color (RGB)		Imágenes en escala de grises	
Tamaño	Bytes	Tamaño	Bytes
2304x3456x3	23887872	2304x3456	7962624

Fuente: Los autores

Para determinar la distribución de los niveles de gris en la imagen de la escalera, convertida a escala de grises, se visualizó su histograma (ver figura 26), mediante el comando *imhist*.

Figura 26. Histograma de la imagen en escala de grises

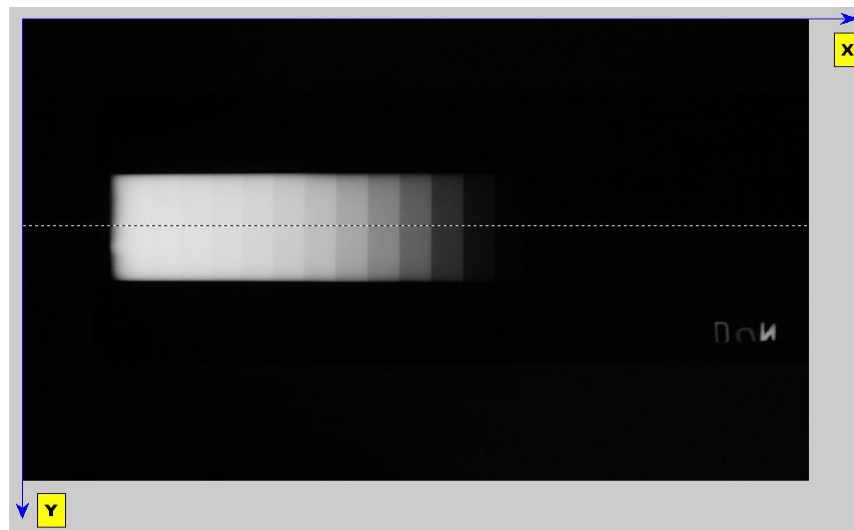


Fuente: Los autores

De la figura 26, se observa que hay una cantidad elevada de píxeles con niveles de gris entre 0 y 8, debido a que hay grandes zonas oscuras alrededor de la imagen de la escalera.

Para obtener un perfil de la mitad de la imagen de la escalera, se trazó manualmente un segmento de recta tal como se observa en la figura 27, utilizando el comando *improfile*.

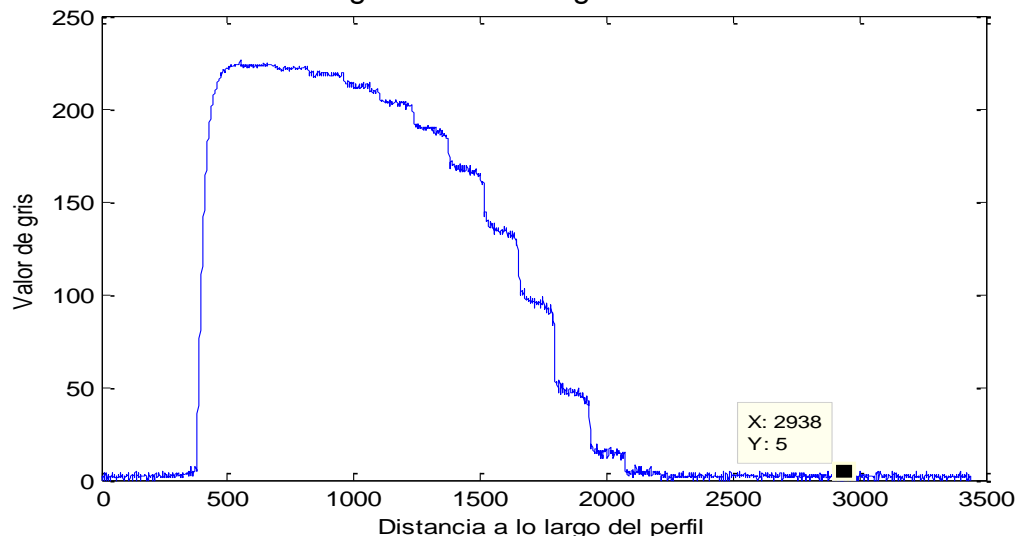
Figura 27. Línea de perfil en la mitad de la imagen



Fuente: Los autores

El perfil obtenido muestra una señal correspondiente a las fluctuaciones de las intensidades de gris de la imagen a lo largo de la misma (ver figura 28). La forma escalonada del perfil es debido a la diferencia de niveles de gris entre cada paso de la escalerilla.

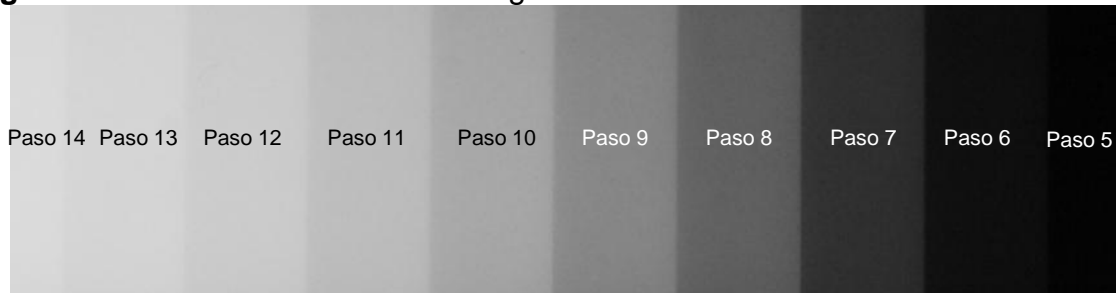
Figura 28. Perfil de escala de grises de la imagen



Fuente: Los autores

Para facilitar el análisis digital de la imagen se puede obtener un perfil más detallado de la misma, por lo tanto se extrajo una sección más pequeña de la imagen original, donde incluyera solamente los pasos de interés a analizar. Para definir el área a extraer se aplicó el comando *impixelinfo*, el cual permite observar el valor de gris y la posición del pixel en el lugar de la imagen donde se ubique el cursor. La imagen cortada se muestra en la figura 29.

Figura 29. Sección extraída de la imagen



Fuente: Los autores

A la nueva imagen se le evaluaron sus características de tamaño y espacio ocupado en disco como se muestra en la tabla 11.

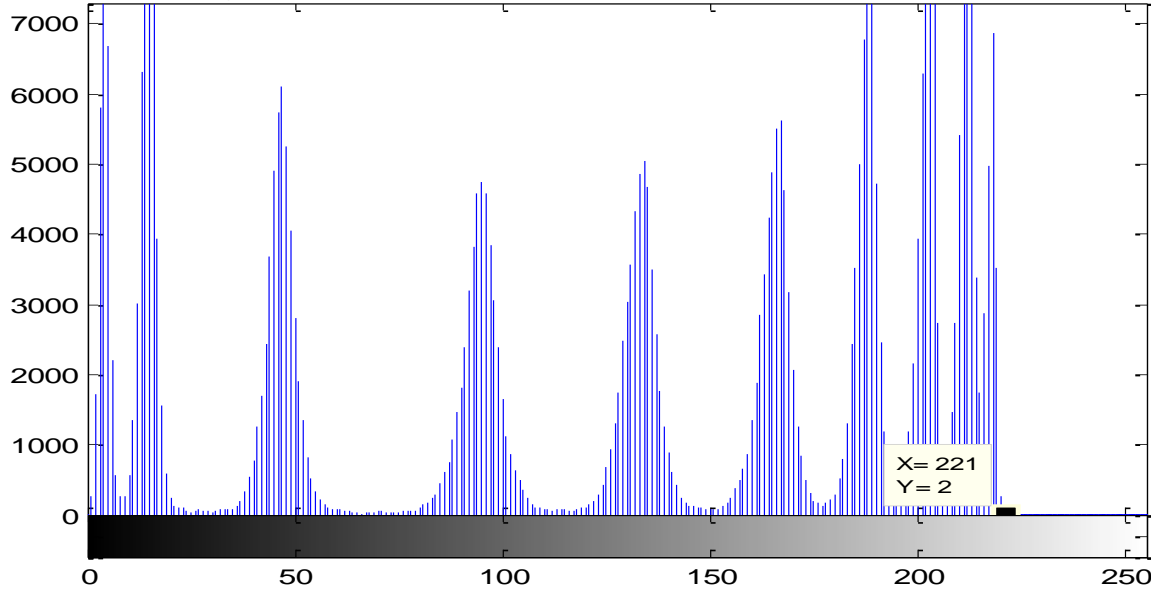
Tabla 11. Características de la imagen seccionada

Imagen seccionada	
Tamaño	Bytes
331x1253	414743

Fuente: Los autores

Para determinar la distribución de los niveles de gris de la sección extraída de la imagen, se visualizó su histograma (ver figura 30), donde se observa con mayor detalle la distribución de la cantidad de pixeles de la imagen a lo largo del eje de nivel de gris.

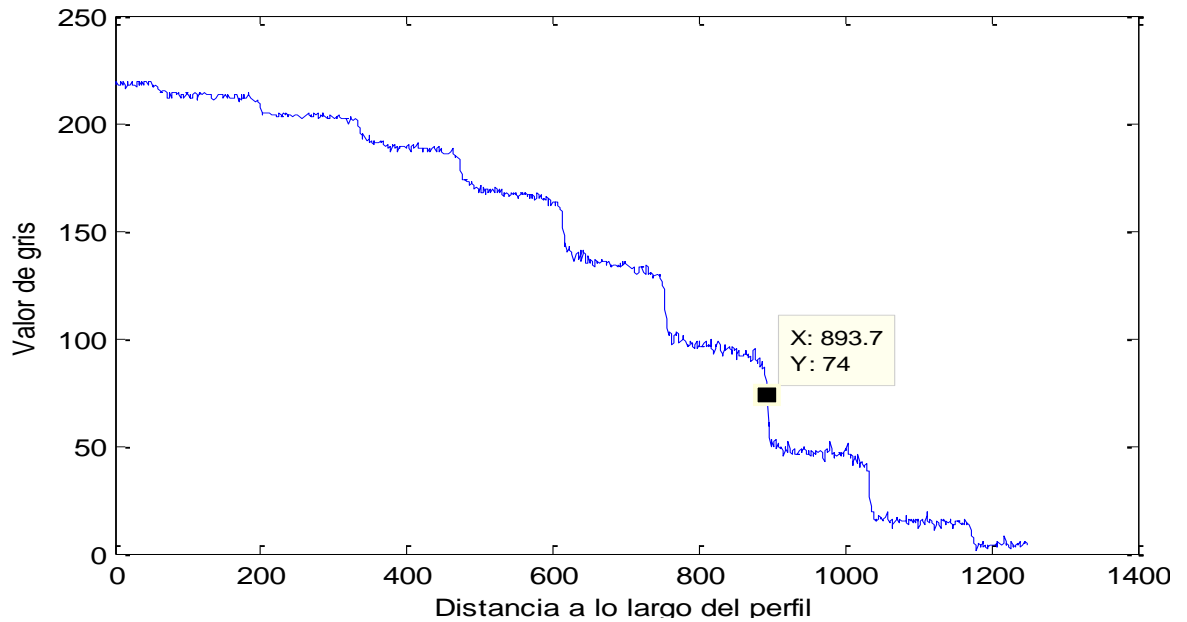
Figura 30. Histograma de la sección extraída.



Fuente: Los autores

Seguidamente se obtuvo el perfil de la imagen, para determinar los cambios de niveles de gris y la longitud en píxeles de cada paso tal como se muestra en la figura 31.

Figura 31. Perfil de la imagen extraída de la escalera



Fuente: Los autores

Analizando el perfil más detalladamente, se observa un comportamiento fluctuante en el valor de los niveles de gris en cada paso, lo cual se denomina ruido causado probablemente a las condiciones con las cuales fue digitalizada la imagen. A esta imagen no se le realizó ningún tipo de tratamiento para disminuir el ruido, con el fin de no alterar la información e incurrir en errores en posteriores lecturas de los espesores del patrón de tubería.

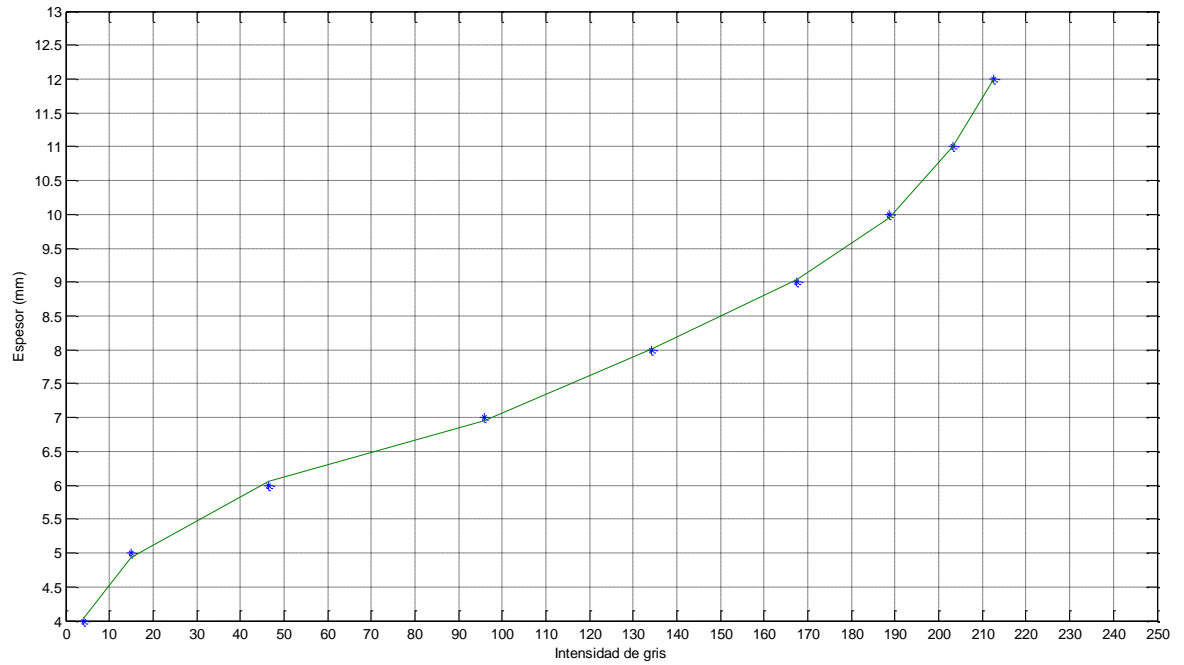
Utilizando la información del perfil anterior, se obtuvo un promedio de los niveles de gris de cada paso, el cual representa un determinado espesor. En las mediciones se incluyeron los valores del paso 5 debido a que hay valores por debajo de 5mm. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Niveles de gris en cada paso

	Paso 5	Paso 6	Paso 7	Paso 8	Paso 9	Paso 10	Paso 11	Paso 12	Paso 13
Espesor del paso [mm]	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Promedio de valores de gris	4.09	15	46.61	95.84	134.15	167.53	188.52	203.27	212.66

Teniendo en cuenta los niveles de gris correspondientes a cada espesor de la escalerilla, se elaboró en MatLab una curva de regresión (ver figura 32), para determinar espesores de acuerdo al nivel de gris de la imagen digitalizada del patrón de tubería.

Figura 32. Curva de medición de espesores

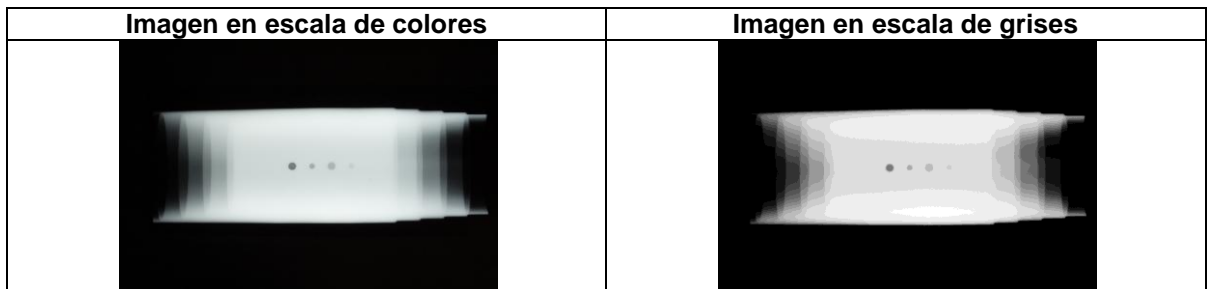


Fuente: Los autores

5.4.2 Medición de espesores en la imagen del patrón de referencia:

Antes de realizar la medición de los espesores del patrón, se cargó la imagen y fue convertida a escala de grises. Las imágenes original y en escala de grises se muestran en el cuadro 15.

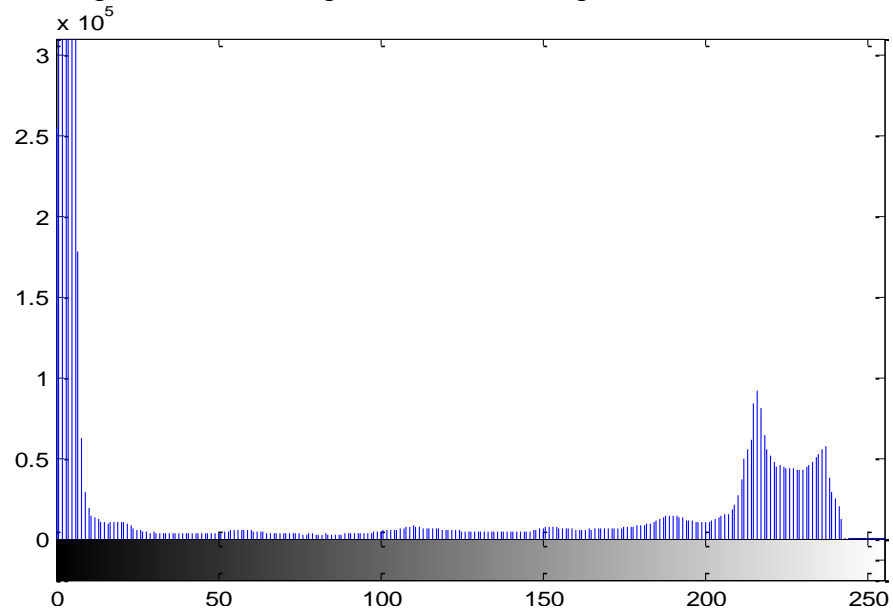
Cuadro 15. Imagen en RGB y en escala de grises



Fuente: Los autores

Se visualizó el histograma de la imagen convertida a escala de grises, el cual se muestra en la figura 33.

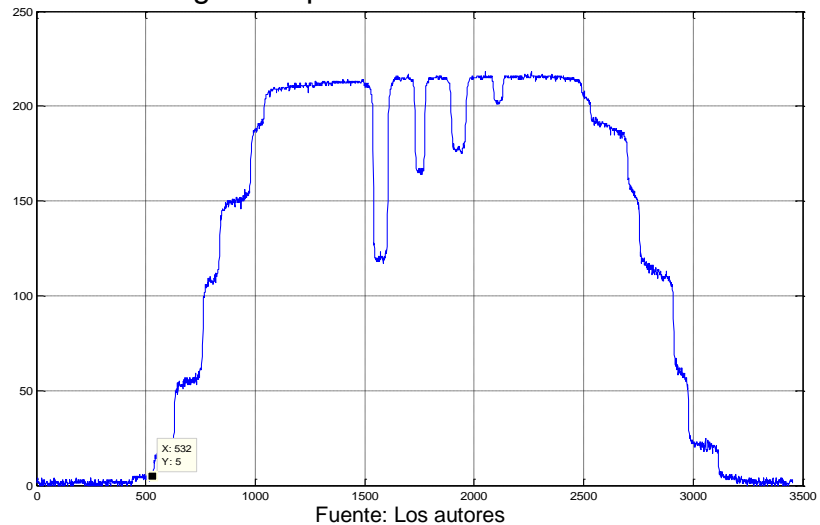
Figura 33. Histograma de la imagen en escala de grises



Fuente: Los autores

De la figura 33 se puede observar que la mayor cantidad de píxeles se encuentra en los niveles de gris más bajos, debido a las zonas oscuras que rodean la imagen radiográfica del patrón. Luego mediante el comando *plot* y con las coordenadas de la fila correspondiente a la mitad de la imagen, se obtuvo un perfil de la misma, como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Perfil de la imagen del patrón



Es importante resaltar que se obtuvo el perfil en la parte central de la imagen a lo largo de toda su longitud, debido a que en esa región es donde se encuentran los agujeros y además se puede medir con certeza el doble del espesor de una sección tubular, tal como se ilustró anteriormente la sección transversal de un tubo en la figura 9. Los valores del nivel de gris se tomaron directamente del perfil, para luego, utilizando la curva de medición de espesores, encontrar su respectivo valor en milímetros. Los valores correspondientes a las disminuciones de espesor, son reportados en la tabla 13.

Para un mejor análisis de las profundidades de los orificios, se extrajo una sección de la imagen completa, donde se incluyeron los 4 orificios, tal como se muestra en la figura 35.

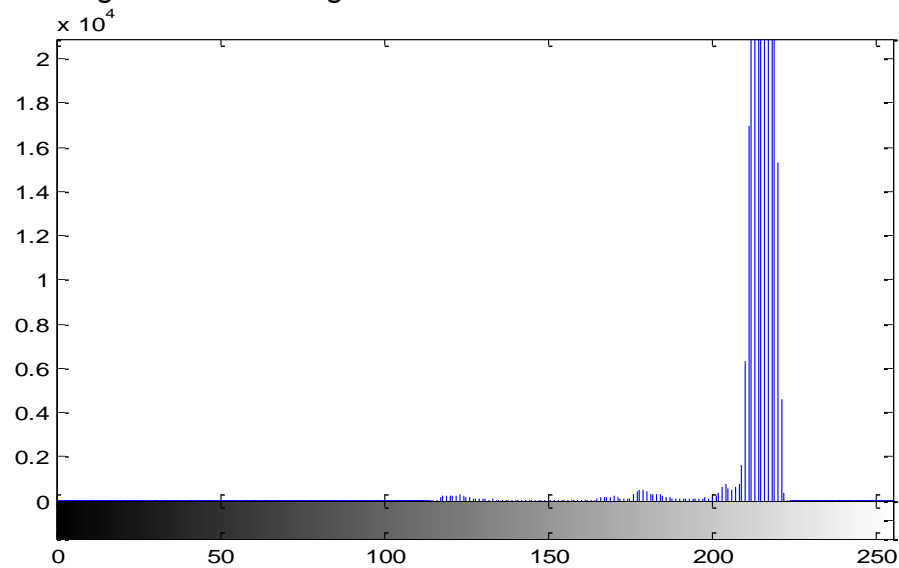
Figura 35. Imagen de los orificios



Fuente: Los autores

En esta vista más detallada de los orificios, se pueden observar puntos claros en el centro de cada uno de ellos, los cuales corresponden a las protuberancias del fondo de los mismos, producto de un defecto en su maquinado como se explicó anteriormente. Para observar la distribución de píxeles en la imagen de acuerdo a los niveles de gris, se obtuvo el histograma de la misma, el cual se presenta en la figura 36.

Figura 36. Histograma de la imagen extraída

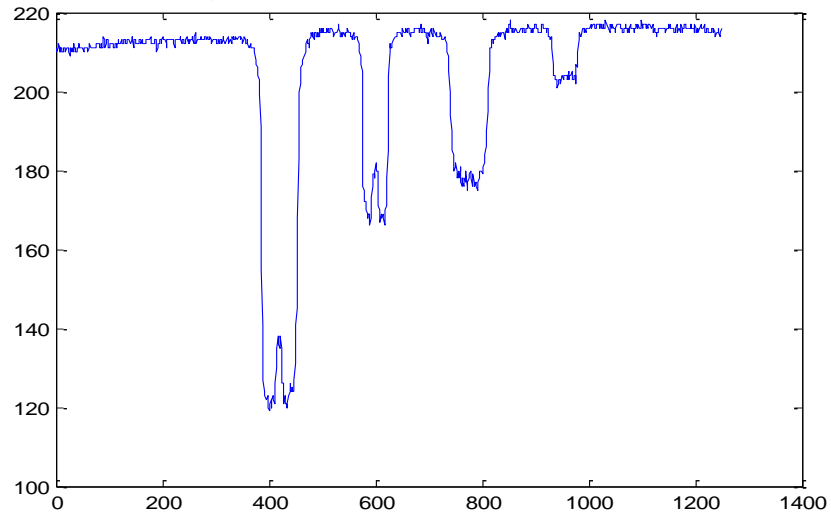


Fuente: Los autores

En la figura 36, se observa que la mayor cantidad de píxeles se tienen valores de nivel de gris, mayores a 200, los cuales corresponden a las zonas más claras que rodean los orificios.

De la figura 35 se obtuvo un perfil correspondiente a la parte central de la imagen a lo largo de toda su longitud, atravesando todos los agujeros, el cual fue utilizado para la medición del nivel de gris de los mismos. Este perfil se puede observar en la figura 37.

Figura 37. Perfil de la imagen extraída



Fuente: Los autores

El perfil de la región de los orificios ofrece una mejor visualización, para así evaluar los niveles de gris que permitieron realizar las mediciones de las profundidades de los orificios. Nótese que en este perfil, se observan claramente las protuberancias presentes en el fondo de cada orificio, indicando que en esos puntos no se debe medir el nivel de gris, sino en sus alrededores que presentan valores de intensidad más bajos. Estos niveles de gris representan el espesor remanente de las zonas donde se encuentran los orificios.

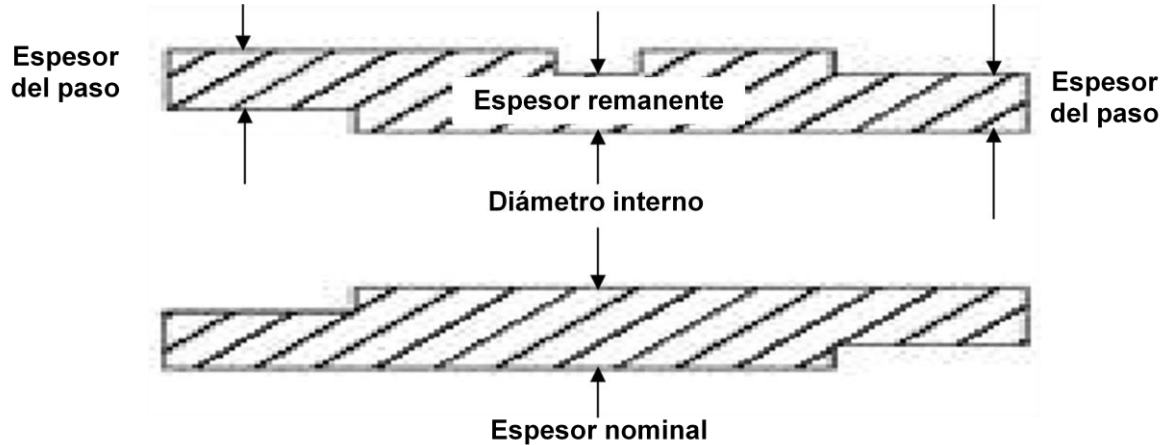
Luego de medir el nivel de gris en los puntos más representativos de los agujeros, se determinó, mediante la curva de medición de espesores, el espesor remanente en milímetros.

Es importante aclarar que el valor proporcionado por la curva, es la suma de las dos paredes superpuestas del tubo. En la tabla 13 se reportan los resultados de las mediciones.

Tabla 13. Resultados de las mediciones de niveles de gris en las discontinuidades

Discontinuidades simuladas		Niveles de gris medido en el perfil de la imagen de la radiografía del patrón	Espesor remanente en milímetros según la curva de medición de espesores
Disminuciones de espesor internas	Paso 1	150.52	8.49
	Paso 2	53.88	6.18
	Paso 3	4.52	4.08
Espesor nominal		211.29	11.84
Disminuciones de espesor externas	Paso 1	189.59	10.02
	Paso 2	114.98	7.46
	Paso 3	21.33	5.29
Orificios	N° 1	119.64	7.59
	N° 2	165.72	8.97
	N° 3	177.05	9.40
	N° 4	202.47	10.94

El nivel de gris medido en el patrón, se hizo teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: el nivel de gris medido en las disminuciones de espesor corresponden al doble del espesor de cada paso y en el caso de los agujeros corresponde al espesor remanente junto con el espesor nominal del patrón.



5.4.3 Medición de diámetros y áreas de los orificios: Para hallar los diámetros y áreas de los orificios, fue necesario determinar la cantidad de píxeles en 1 mm. Esto se realizó a partir de la medición de la longitud en píxeles del ancho de cada uno de los pasos de la escalerilla, de donde se obtuvo un promedio de 138,5 píxeles por paso. Cada paso de la escalerilla corresponde a 10mm, medidos con

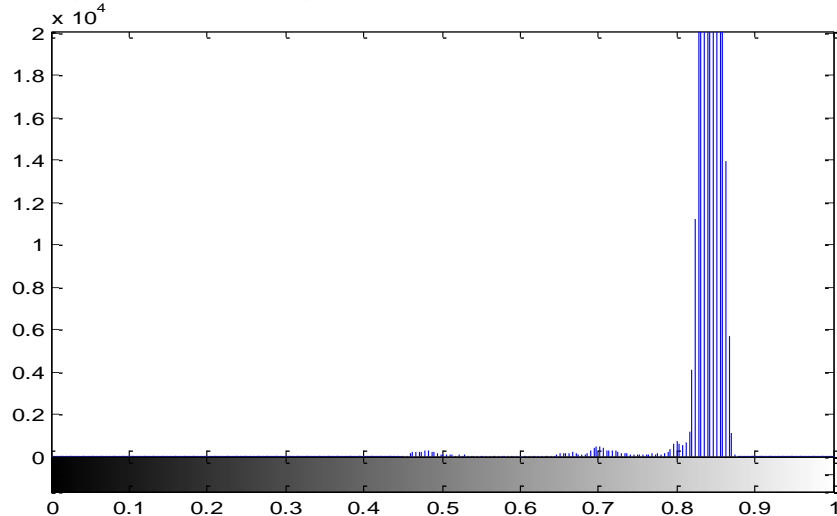
calibrador. Por lo tanto, se obtuvo un factor de conversión de pixeles a milímetros (f_c) igual a 13,85 pixeles/mm según la ecuación 6.

$$f_c = \frac{138,5 \text{ pixeles}}{10 \text{ mm}} = 13,85 \text{ pixeles/mm} \quad \text{Ec. [6]}$$

Una vez obtenido el factor de conversión, se utilizaron técnicas de tratamiento de imágenes tales como binarización y segmentación para representar los orificios y mediante los descriptores, se hallaron los diámetros y áreas en pixeles.

Este procedimiento se inició cargando la imagen de la figura 36, la cual se normalizó con el comando *im2double*, permitiendo convertir los niveles de gris de 0 a 255 a niveles de gris de 0 a 1. El histograma de la imagen normalizada se muestra en la figura 38.

Figura 38. Histograma de la imagen normalizada



Fuente: Los autores

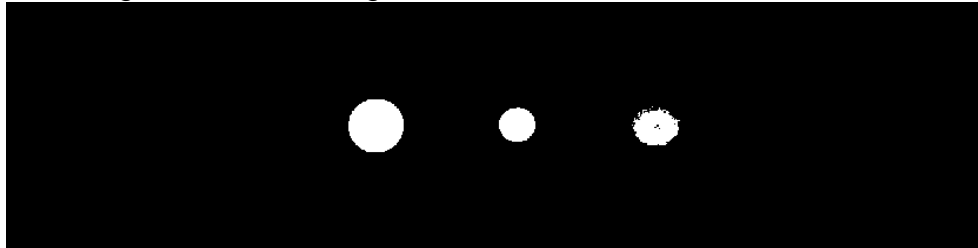
Observando los valores de gris mostrados en la figura 38 y a partir de ensayos de prueba y error, se determinó un umbral adecuado para binarizar la imagen empleando el comando *im2bw*, obteniéndose la imagen de la figura 39:

Figura 39. Imagen binarizada



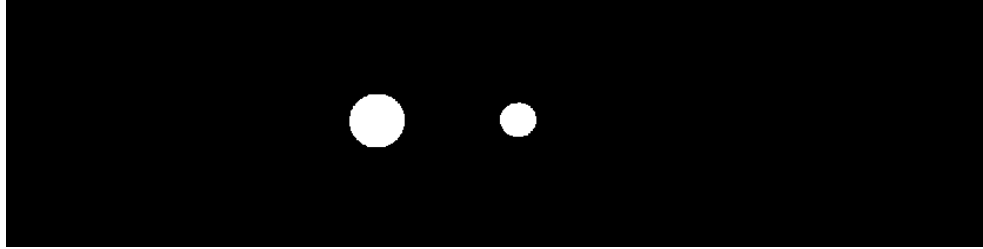
Al umbralizar la imagen, los agujeros se consideraron como los elementos de interés de la imagen, razón por la cual se asume que el fondo es blanco. Notese que el agujero 4 se desaparece y parte del 3 también, debido a que poseían niveles de gris por encima del umbral. Para una mejor visualización se procedió a invertir la imagen. Como se observa en la figura 40, mediante una operación matricial para cambiar los 0 por 1 y los 1 por 0.

Figura 40. Imagen con fondo negro



Posteriormente con el comando *bwselect*, se seleccionaron los objetos a caracterizar que son: el elemento de la izquierda de la imagen que corresponde al orificio 1 y el siguiente que corresponde al orificio 2. Es importante recordar que el orificio 1 y el 3 poseen el mismo diametro, asi como el orificio 2 y el 4, por esta razón se caracterizaron los dos primeros orificios mostrados en la figura 41.

Figura 41. Orificios seleccionados



Una vez seleccionados los elementos a caracterizar, se aplicó el comando *regionprops*, para determinar el diámetro y área de cada uno de los elementos seleccionados. Los resultados de la caracterización de cada uno de los orificios se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de las mediciones

Elemento caracterizado	Característica medida en cantidad de pixeles	
	Diámetro	Área
Orificio 1=Orificio 3	70.79	3936
Orificio 2=Orificio 4	45.78	1646

5.5 VERIFICACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS

En esta etapa se verificaron los datos obtenidos en las mediciones en escala de grises y cantidad de pixeles y se compararon con las medidas físicas del patrón de referencia, para luego calcular el porcentaje de error entre ellas.

5.5.1 Evaluación de la lectura de los espesores: Debido a la aplicación de la técnica de doble pared, se resalta que para la lectura de los espesores remanentes en escala de grises, se debe tener en cuenta el doble espesor de la misma, ya que esto es lo observado en la radiografía del patrón. La tabla 15 muestra los resultados de las mediciones en niveles de gris de las disminuciones de espesor y sus valores en milímetros contra las mediciones hechas físicamente.

Tabla 15. Resultados de las mediciones en las disminuciones de espesor.

Discontinuidad simulada	Mediciones con la curva		Mediciones físicas		Diferencia entre la medición de espesor digital y física [%]	
	Espesor remanente [mm]	% de disminución del espesor nominal	Espesor doble de la pared del tubo [mm]	% de disminución del espesor nominal		
Espesor nominal	11.84	0	12	0	1.33	
Disminuciones de espesor internas	Paso 1	8.49	28.29	8.50	29.17	0.12
	Paso 2	6.18	47.80	6.20	48.33	0.32
	Paso 3	4.08	65.54	4.16	65.33	1.92
Disminuciones de espesor externas	Paso 1	10.02	15.37	9.92	17,33	1.01
	Paso 2	7.46	36.99	7.50	37,50	0.53
	Paso 3	5.29	55.32	5.36	55.33	1.31

La tabla 16 muestra las profundidades de los orificios calculados de acuerdo al nivel de grises comparados con las profundidades medidas físicamente.

Tabla 16. Profundidades de los orificios

Discontinuidad simulada	Medidas según la curva			Medida física		Diferencia entre la medición de espesor digital y física [%]	
	Espesor remanente (doble pared) [mm]	Profundidad del orificio [mm]	Disminución del espesor nominal [%]	Profundidad del orificio [mm]	Disminución del espesor nominal [%]		
Orificios	1	7.59	4.25	71.79	4.4	73.33	3.41
	2	8.97	2.87	48.48	3	50	4.33
	3	9.40	2.44	41.22	2.55	42.50	4.31
	4	10.94	0.9	15.20	1	16.67	10

Como se puede observar en las anteriores tablas, donde se comparan los datos de espesores y profundidades medidos físicamente, con los obtenidos digitalmente, se deduce que los porcentajes de error son relativamente bajos, lo cual indica la efectividad de la técnica de medición de espesores a partir de los niveles de gris, obtenidos en la radiografía.

5.5.2 Caracterización de los orificios: En la tabla 17, se ilustran los datos de las mediciones hechas físicamente, comparados con los hallados digitalmente, mediante la aplicación de la técnica de umbralización.

Las características de diámetro y área halladas, se obtienen en cantidad de pixeles que deben ser convertidos a unidades del sistema métrico (mm). La conversión se realiza utilizando el facto de conversión fc [pixeles/mm] de la ecuación 6.

$$X[mm] = \frac{\# \text{ de pixeles}}{fc [\text{pixeles/mm}]}$$

Tabla 17. Dimensiones de los orificios

Objetos	Medidas físicas		Mediciones digitales				Diferencia entre mediciones físicas y digitales [%]	
	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Cantidad de pixeles		Equivalente en mm		Diámetro	Área
			Diámetro	Área	Diámetro	Área		
Orificio 1	5	19.62	70.79	3936	5.11	20.52	2.2	4.38
Orificio 2	3.4	9.07	45.78	1646	3.31	8.58	2.64	2.64

6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación y sus respectivos análisis, se puede concluir lo siguiente:

- ✓ El diseño y elaboración de patrones de tubería similares a las utilizadas en servicio, representando discontinuidades superficiales reales, con características morfológicas y dimensiones específicas, es una herramienta que puede ser utilizada para ajustar, no solo la técnica de radiografía industrial, sino otros métodos de END usados en la medición de pérdidas de espesor. El uso de estos patrones, a diferencia del uso de patrones planos, es una aproximación más exacta a las condiciones reales.
- ✓ Con el patrón de tubería diseñado, utilizando la técnica radiográfica con rayos X de Doble Pared- Doble Imagen (DPDI) y película AGFA STRUCTURIX D7 con pantallas intensificadoras, se pudieron evaluar disminuciones de espesor entre el 20% y el 60%, cumpliendo con los valores de densidad radiográfica especificados en la norma ASTM E1742-08a, no siendo confiable la evaluación de espesores fuera de este intervalo.
- ✓ A través del uso de la medición de variación de densidades radiográficas, la técnica DPDI, puede ser utilizada como método alternativo o complementario a otras técnicas de END, empleadas en la medición de espesores de pared en tuberías con diámetros menores a 90mm, aunque puede presentar costos elevados en energía y tiempo, especialmente si se utiliza fuente de rayos X.
- ✓ La correcta visualización y evaluación de las características morfológicas y dimensionales de pérdidas de espesor puntuales, usando la técnica

radiográfica de DPDI, dependen en gran parte de una correcta posición de la tubería con respecto al haz de radiación y a la película utilizada, para no realizar valoraciones equivocadas. Por esta razón, mediante esta técnica es más fácil la detección de disminuciones de espesor generalizadas.

- ✓ Unas condiciones de exposición radiográfica adecuadas y un revelado óptimo de las películas, garantizan una buena imagen radiográfica, pero esto no es suficiente para obtener una imagen digital de calidad, lo cual depende de la capacidad de resolución del dispositivo y condiciones de captura. Lo anterior se debe tener en cuenta para no perder información en la imagen digitalizada con respecto a la radiografía física.
- ✓ La digitalización de imágenes radiográficas es una técnica complementaria a la radiografía tradicional, permitiendo realizar mediciones de discontinuidades (determinación de forma y dimensiones), mediante software y además la información puede ser almacenada en medios magnéticos, preservando un registro digital, en caso de que la radiografía original sea dañada o extraviada. Sin embargo el proceso de digitalización de imágenes radiográficas aun no está normalizado lo cual conlleva a un cierto nivel de incertidumbre en las mediciones.
- ✓ Las medidas de pérdida de espesor generalizado en el patrón de tubería, utilizando los niveles de gris de la imagen digitalizada, fueron efectivas aproximadamente en un 99.07%. Las medidas de profundidades de espesores puntuales fueron efectivas en un 94.49% y la medición de áreas circulares en un 96.49%. Lo anterior confirma, que la digitalización de imágenes radiográficas, obtenidas mediante la técnica de Doble Pared-Doble imagen, puede ser empleada en la medición de disminuciones de espesor generalizada en tuberías de acero.

7. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda:

- El maquinado de los patrones debe elaborarse con maquinas y herramientas de precisión automatizadas, para garantizar que las medidas del diseño del patrón coincidan con las obtenidos después del maquinado.
- Realizar pruebas utilizando otras fuentes de radiación y otras técnicas radiográficas empleadas en la medición de espesores para compararla con la de Doble Pared Doble imagen.
- Utilizar películas más lentas y de granulometría más fina para garantizar una buena calidad de imagen en las placas radiográficas. Si se realizan tomas con la técnica de pared doble imagen, las películas deben tener espacio suficiente para colocar la escalerilla patrón al lado de la pieza y realizarles una sola toma.
- Continuar con los procesos de digitalización de imágenes radiográficas experimentando otras técnicas de captura, como por ejemplo, escáneres de alta resolución para placas radiográficas. De igual manera, aplicar a las imágenes digitalizadas otros tipos de tratamientos tales como ajuste de contraste, brillo, mejoramiento de bordes, eliminación de ruido, hasta construcción en 3D de las defectologías, para mejorar las características y visualización de los detalles.
- Continuar el desarrollo de investigaciones interdisciplinarias que permitan la implementación de herramientas informáticas, para el apoyo de la evaluación

de discontinuidades en los Ensayos No Destructivos y otras aplicaciones en las diferentes áreas de la Metalurgia y Ciencia de los Materiales.

8. BIBLIOGRAFÍA

AEA Technology. *Recommended practice for the rapid inspection of small bore connectors using radiography*, p.3.

AGFA-GEVAERT. **AGFA STRUCTURIX** film systems, *Radiographics film systems*. Belgium: Mortsel. 2002. p6.

AGFA-GEVAERT. *Radiografía Industrial. Examen No Destructivo holográfico*. p68.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Practice for Radiographic Examination*. ASTM E 1742 – 08a. Philadelphia. USA. 2008.

_____. *Standard Guide for Controlling the Quality of Industrial Radiographic Film Processing*. ASTM E 999 – 05. Philadelphia. USA. 2005.

_____. *Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology*. ASTM E 1025 – 05. Philadelphia. USA. 2005.

_____. *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. ASTM E 1316 – 08a. Philadelphia. USA. 2008.

_____. *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*. ASTM A 53/A 53M – 07. Philadelphia. USA. 2007.

_____. *Standard Guide for Radiographic Examination*. ASTM E 94 – 04. Philadelphia. USA. 2004.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines.* ASME B31G – 1991. USA. 1991.

ARIZA JIMÉNEZ, Leandro F. *Práctica no. 1, Contraste, Histograma y Transformaciones de Intensidad. Laboratorio de procesamiento digital de imágenes.* Universidad Industrial de Santander. 2008.

ATTAELMANAN, A. Borg E. and GRONDAHL, H-G. *Digitization and display of intra-oral films.* Dentomaxillofac Radiol, v.29, p.97-102, 2000.

BALASKÓ, Marton, et al. *Pipe corrosion and deposit study using neutron- and gamma- radiation sources;* Hungary; February 2005.

CUEVAS JIMENEZ, Erik Valdemar y ZALDIVAR NAVARRO, Daniel. *Visión por Computador utilizando MatLAB el Toolbox de Procesamiento Digital de Imágenes;* p.16.

EAST KODAK COMPANY. *Radiography in Modern Industry 4th;* año 1980, p.7-11.

EDALATI, K, et al. *The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes;* Department of NDT, Nuclear Safety and Radiation Protection Technological Centre. Iran: Tehran; 2006; p.1.

GONZALEZ, Rafael and WOODS, Richard. *Tratamiento digital de imágenes; filtrado espacial;* Addison-Wesley Iberoamericana S.A; Massachusetts, EUA; 1992; p.207.

HERVELLA AZOUZI, Samira. *Editor de Imágenes basado en regiones, aplicación en entorno Matlab;* Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Terrasa; 2005-2006.

ILOG S.A. *Medición de espesores de pared y mapeo de corrosión utilizando sistemas de radiografía computarizada en aplicaciones de campo; Soporte técnico.* Cuernavaca, México. (Disponible en: [http:// www.llogsa.com/](http://www.llogsa.com/)).

KABIR, Yacinea; et al. *Evaluation of corroded pipelines wall thickness using image processing in Industrial Radiography.* Laboratoire de traitement de signal et de l'image du Centre de Soudage et de Contrôle.. Algérie: Chéraga Route de Délybrahim. 2000.

MELLO, Marcos Aiub de; et al. *Digitalização de filmes radiográficos industriais – O estado da arte; Imagem Digital – Visão geral; XXVI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção; 12ª CONAEND & IEV.* Brazil: São Paulo, junho de 2008; p.8

ORTIZ MARTÍNEZ, Antonio Carlos. *Base defectológica de soldaduras Evaluación, caracterización e interpretación radiográfica de soldaduras en materiales metálicos.* Universidad Politécnica de Cartagena, España.

RASTKHAH, N, et al. *Corrosion evaluation of pipes by radiography;* Iranian Nuclear Regulatory Authority. Iran: Tehran; 2004.

SENA. *Curso virtual Aplicaciones de Procesamiento de Imágenes al Control de Calidad;* semana 3; agosto 2009; p.13.

SIEEND S.A. *Radiografía Industrial.* Monterrey, México. (Disponible en http://www.sieend.com.mx/servicios_radiografia.html).

SOUZA, Edmilson M. de, et al. *Modelagem e calibração de um sistema de radiografia computadorizada utilizando o código de Monte Carlo mcnp; XXVI*

Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção. 12ª CONAEND & IEV. Brazil: São Paulo, Junio 2008.

TAYLOR & FRANCIS Group, LLC. *The Image Processing Handbook*, Chap. 2 , Fifth Edition 2007, p. 133.

VELÁSQUEZ AGUILAR, J.G; *et al. Herramienta de apoyo para cursos de procesamiento digital de imagen*; Universidad Autónoma del Estado de Morelos; México: Cuernavaca. 2006.

WATANABE, P.C.A. *et al. Estado atual da arte da imagem digital em odontologia.* Rev Assoc Paul Cirur Dent, v. 53, n.4, p.320-325, Jul/Ago 1999.

WOOD, John D. *ASM Handbook, Nondestructive Evaluation and Quality Control*, Fifth printing, December 1997, vol. 17, p. 87 – 88, 649

ZSCHERPEL, Uwe, *et al. Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits in Pipelines: Results of an IAEA Co-ordinated Research Programme.* Austria: Vienna. 2006.

ANEXO 1

Alta calidad de imagen y perceptibilidad través de la optimización de "la señal de ruido "para todas las películas STRUCTURIX³⁵.

Figura 42. Calidad vs rapidez en películas radiográficas STRUCTURIX

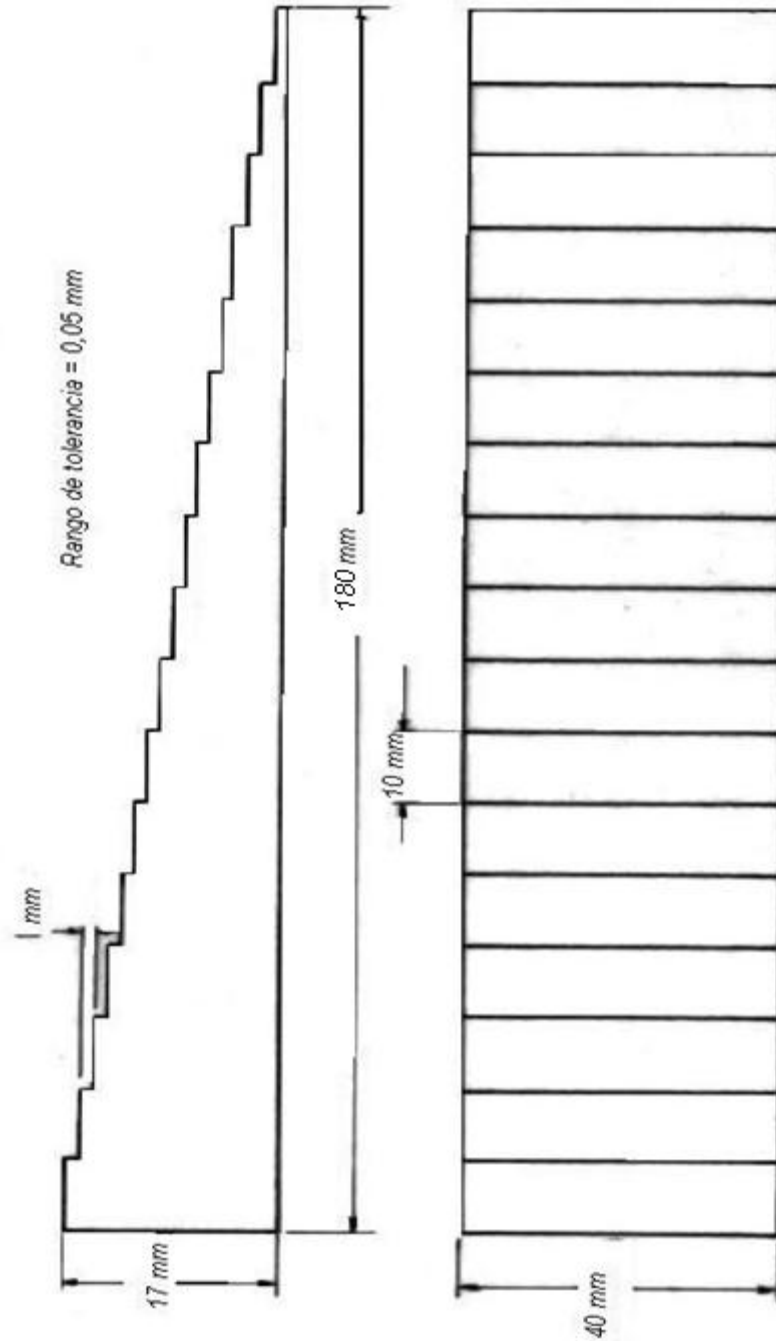


Fuente: Structurix – Film Systems

³⁵ AGFA STRUCTURIX film systems, Radiographics film systems; p.6.

ANEXO 2

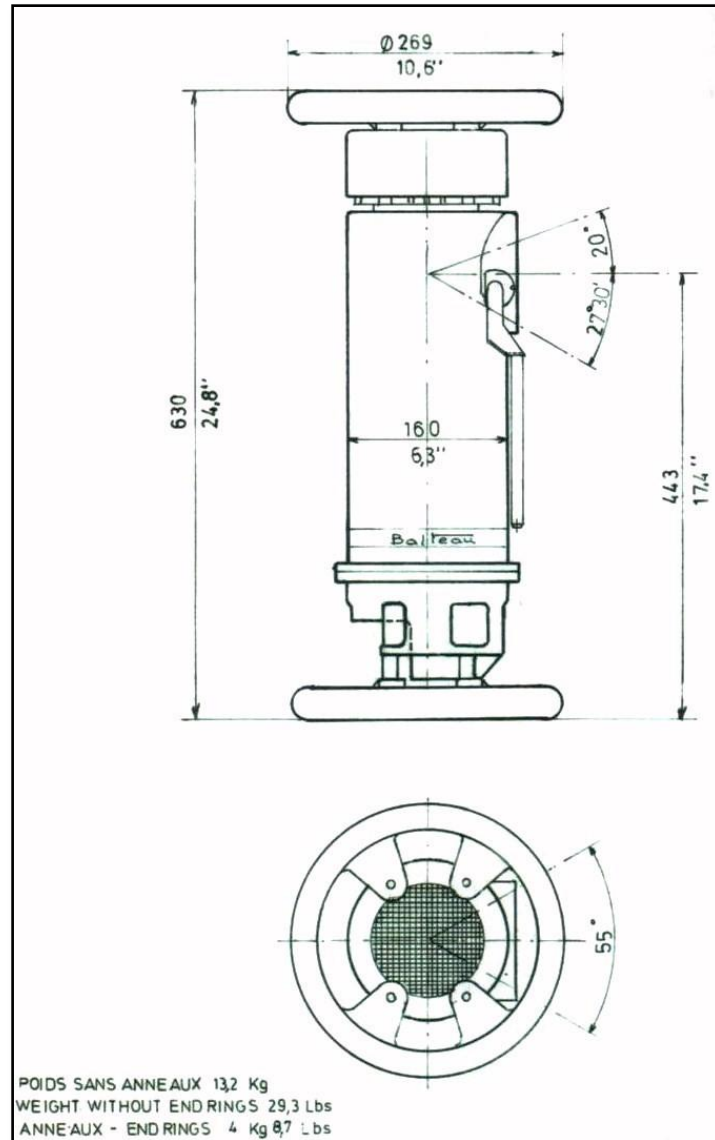
Figura 43. Dimensiones de la escalerilla



Fuente: Quintero G. Norberto A; Cáceres J. Cesar E; 1992

ANEXO 3

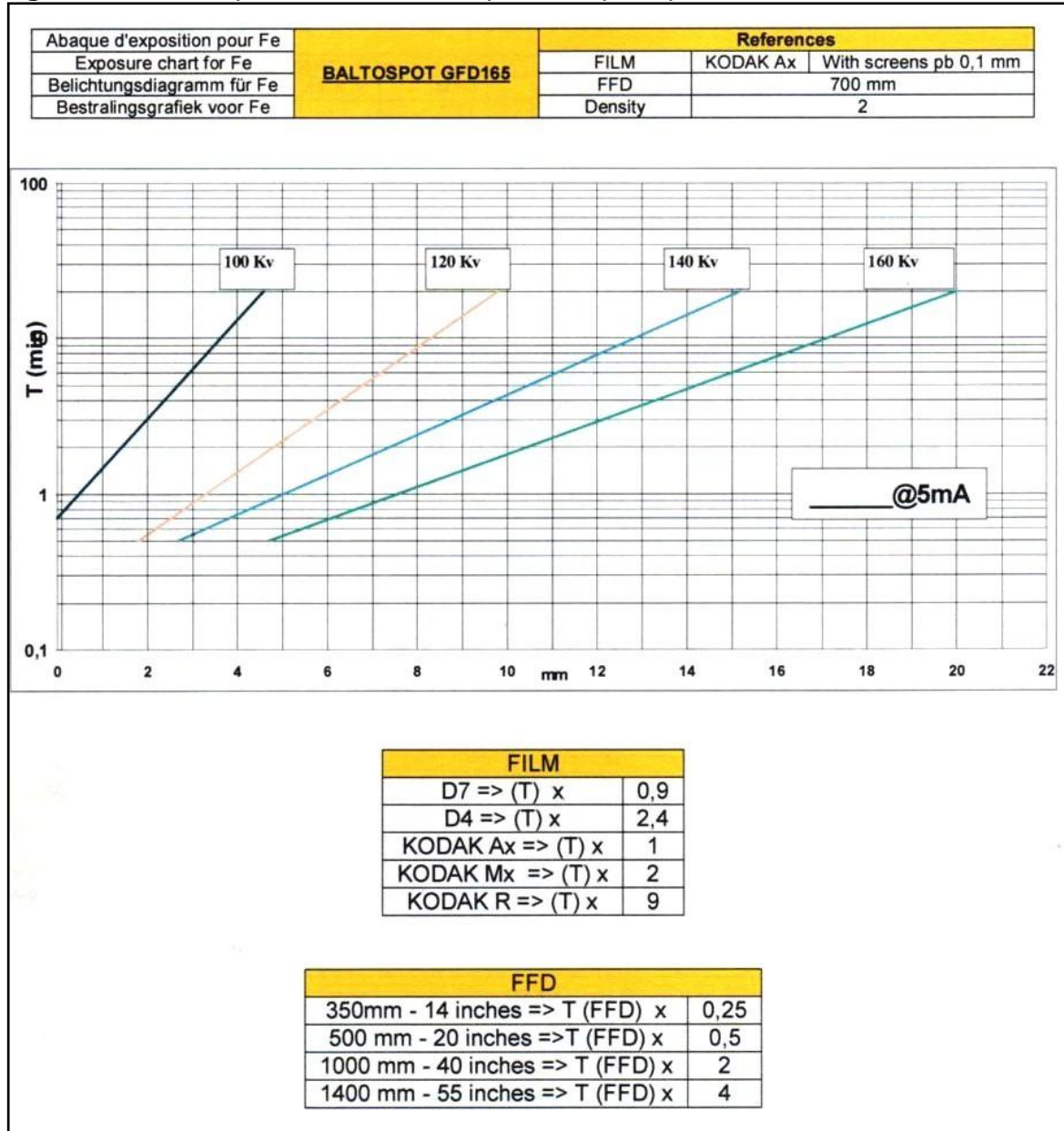
Figura 44. Características del haz de radiación del equipo de rayos X.



Fuente: Operating and maintenance manual - Baltospot

ANEXO 4

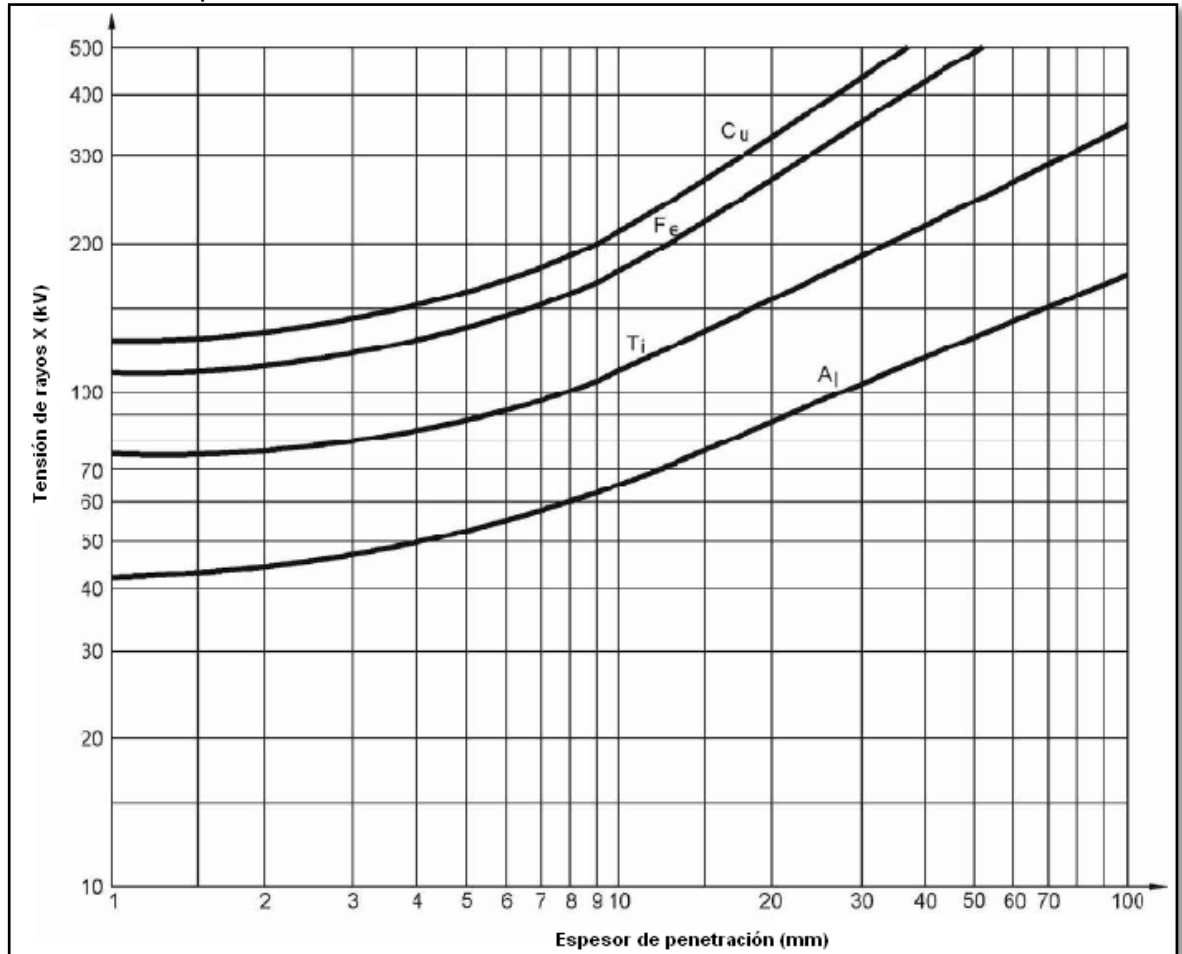
Figura 45. Abaco para cálculos de exposición para piezas de hierro



Fuente: Operating and maintenance manual - Baltospot

ANEXO 5

Figura 46. Kilovoltaje para equipos de rayos X en función del espesor y del material de la pieza



Fuente: PrNM 24:04 - 00001

ANEXO 6

Figura 47. Etapas para el procesamiento digital de las imágenes radiográficas.

