



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE ASISTENCIA PARA EL ANÁLISIS E INSPECCIÓN DE PLACAS RADIOGRÁFICAS DE SOLDADURA

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

ARAUJO LEMA JORGE LUIS
jorge.araujo@epn.edu.ec

TORRES ARMIJOS JHON ADALBERTO
jhon.torres@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO, M.Sc.
homero.barragan@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. ORTEGA LÓPEZ MIGUEL DARÍO, M.Sc.
miguel.ortega@epn.edu.ec

QUITO, JULIO 2018

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por ARAUJO LEMA JORGE LUIS y TORRES ARMIJOS JHON ADALBERTO, bajo nuestra supervisión.

Ing. Homero Barragán, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Miguel Ortega, M.Sc.

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, ARAUJO LEMA JORGE LUIS y TORRES ARMIJOS JHON ADALBERTO, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Araujo Lema Jorge Luis

Torres Armijos Jhon Adalberto

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación se lo dedico a mi madre María Rosario Lema Quinga, por su infinito cariño, apoyo y comprensión durante todas las etapas de mi formación académica y personal, que ha sido el pilar fundamental de mi vida.

A mi padre José Manuel Araujo Paucar, que Dios lo tenga en su santa gloria, por brindarme su paciencia y apoyo incondicional en las decisiones que he tomado en mi vida, hasta su partida.

Jorge Luis Araujo

Este trabajo está dedicado a DIOS, por darme la vida a través de mis PADRES y HERMANOS quienes con mucho cariño, amor y ejemplo han hecho de mí, una persona con valores para poder desenvolverme como: hijo, hermano, amigo, padre y esposo.

A mi esposa DAYSI y a mi hijo SEBASTIAN quienes son el motivo y la razón, para poder alcanzar mis más preciados ideales de superación, ellos fueron quienes en los momentos más difíciles me dieron su amor y comprensión para poderlos superar, quiero también dejarle una enseñanza a mi hijo que “cuando se quiere alcanzar algo en la vida, no hay tiempo ni obstáculo que lo impidan, para poder lograrlo; y permitirse así descansar el día que pueda colgar los lápices”.

Jhon Torres

AGRADECIMIENTO

En primera instancia agradezco a mis padres y hermanos, por brindarme su apoyo, enseñarme que mediante dedicación, esfuerzo, y trabajo duro se pueden lograr todos los objetivos que nos proponemos, por haberme apoyado económicamente, dándome la oportunidad de estudiar y adquirir todos los materiales y herramientas necesarios para afrontar las dificultades en la vida.

A mis amigos, compañeros y docentes, quienes se han cruzado en el transcurso de mi vida académica, que han sabido aportar a mi formación personal y profesional.

A los ingenieros Homero Barragán y Miguel Ortega, quienes nos supieron dirigir, brindar soporte y oportuna colaboración.

Jorge Luis Araujo

Agradecer primeramente a Dios y la Virgen del Cisne por haberme dado la oportunidad de estar vivo, a mis padres Adalberto Torres y Janneth Armijos que hicieron posible la finalización de este sueño tan anhelado.

A todas las personas que lucharon día a día junto a mi lado dentro de la Escuela Politécnica Nacional y en especial a las personas que desde el pre politécnico nos hicimos grandes amigos.

A todas las personas que contribuyeron en mi formación académica y al personal de Bienestar estudiantil.

A mi tío Erwin Armijos, quien me supo apoyar y sobretodo entenderme.

Al ingeniero Miguel Ortega por sus conocimientos impartidos y su colaboración desinteresada en el presente trabajo, quien logro convertirse desde un profesor a un amigo.

Jhon Torres

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
NOMENCLATURA.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	1
IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Generalidades.....	5
1.1.1. Historia de la soldadura.....	5
1.1.2. Procesamiento digital de imágenes.....	6
1.1.3. Defectología.....	8
1.1.4. Herramienta computacional afín a la inspección de soldadura digital.....	12
1.2. Área de estudio (Radiografía Industrial).....	14
1.2.1. Introducción a la radiografía.....	14
1.2.3. La radiografía.....	16
1.2.4. Generación de rayos X.....	17
1.2.4.1. Tubos de rayos X.....	17
1.2.5. Práctica radiográfica.....	19
1.2.5.1. Películas radiográficas.....	19
1.2.5.2. Curvas características.....	21
1.2.5.2.1. Contraste.....	22
1.2.5.2.2. Sensibilidad.....	23
1.2.5.3. Pantallas intensificadoras en la exposición radiográfica.....	23
1.2.5.3.1. Pantallas de plomo.....	24
1.2.5.3.2. Pantallas intensificadoras fluorescentes.....	25
1.2.5.4. Indicadores de calidad de imagen.....	25

1.2.5.5.	Principios geométricos de formación de imagen y ensombrecimiento.....	26
1.2.5.6.	Distancia fuente – película.....	27
1.2.5.7.	Procesamiento digital de imágenes.....	28
1.2.5.8.	Proceso de formación de imágenes y representación.....	29
1.2.5.9.	La cuantificación y el efecto del muestreo.....	30
1.2.5.9.1.	Efecto del muestreo.....	30
1.2.5.9.2.	Efecto de la cuantificación.....	32
1.2.5.10.	Resolución de una imagen.....	32
1.2.6.	Escala RGB.....	33
1.2.6.1.	Modelos de Color.....	34
1.2.6.2.	Modelo RGB.....	35
2.	METODOLOGÍA.....	37
2.1.	Herramientas de programación para creación del software.....	37
2.1.1.	Desarrollo del software.....	37
2.1.1.1.	Estructura del software.....	37
2.1.1.1.1.	Ventana de inicio (Nivel I).....	38
2.1.1.1.2.	Análisis de radiografías (Nivel II).....	39
2.1.1.1.3.	Inspección de radiografías (Nivel III).....	41
2.1.1.1.4.	Reporte (Nivel IV).....	44
2.1.1.1.5.	Preview (Nivel V).....	45
2.2.	Análisis e inspección de imágenes radiográficas.....	46
2.2.1.	Banco de placas radiográficas.....	46
2.2.2.	Ejecución del programa Watching Defects 1.0 (WD 1.0).....	46
2.2.2.1.	Planteamiento del problema para validar el programa WD 1.0.....	47
2.2.2.2.	Ejecución del Nivel II.....	47
2.2.2.3.	Ejecución del Nivel III.....	50
2.2.2.3.1.	Manejo de la imagen radiográfica.....	50
2.2.2.4.	Ejecución del Nivel IV – V.....	62
2.3.	Validación del software WD 1.0.....	64
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
3.1.	Caracterización en negro de las placas radiográficas.....	67
3.2.	Justificación del filtro seleccionado.....	72
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
4.1.	Conclusiones.....	74
4.2.	Recomendaciones.....	76

Referencias Bibliográficas	77
Anexos	79
Anexo 1. Banco digitalizado de placas radiográficas	79
Anexo 2. Manual del Usuario de software Watching Defects 1.0.....	85
Anexo 3. Análisis del contorno de una <i>indicación</i>	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Primera soldadora de arco.	6
Figura 1.2. Primera soldadora por resistencia con secundario de bobina simple.	6
Figura 1.3. Primera cámara digital.	7
Figura 1.4. Esquema de discontinuidades de grietas.	9
Figura 1.5. Esquema de penetración incompleta.	9
Figura 1.6. Esquema de fusión incompleta.	10
Figura 1.7. Esquema de quemón.	10
Figura 1.8. Esquema de inclusiones de escoria.	11
Figura 1.9. Esquema de porosidades.	11
Figura 1.10. Esquema de mordeduras.	11
Figura 1.11. Filtro de VISION IN X aplicado a una radiografía.	13
Figura 1.12. Medición tangencial del grosor de una tubería.	13
Figura 1.13. Esquema de la porción del espectro electromagnético y sus longitudes de onda.	15
Figura 1.14. Esquema de los elementos básicos en una toma radiográfica.	16
Figura 1.15. Esquema de la producción de rayos X.	18
Figura 1.16. Curvas que ilustran el efecto de la variación del miliamperaje y kilovoltaje, respectivamente sobre la intensidad de un haz de rayos X.	19
Figura 1.17. Esquema de la sección transversal de una película de rayos x.	20
Figura 1.18. Curvas características de una película radiográfica que determinan el tipo de película y el gradiente de película, velocidad, y densidad. (a) las curvas típicas para tres películas de rayos X industriales expuestas a la radiación entre pantallas de plomo. (b) evaluación de los gradientes en dos puntos en la curva para la película A en (a). (c) la diferencia de densidades (d) promedio de gradientes para película A determinaron durante dos intervalos de densidad.	22
Figura 1.19. Diseños de varios penetrámetros (indicadores de calidad de imagen). (a) rectangular de tipo placa penetrámetro (estándar ASTM-ASME) para espesores de placa de 0,13 a 1,3 mm (0,005 a 0,050 pulgadas.). (b) circular de tipo placa penetrámetro (estándar ASTM-ASME) para espesores de placa de 4,6 mm (0,180 pulg.) O más. (c) de tipo alambre típico penetrámetro (norma DIN 54109). (d) paso-cuadrado, penetrámetros paso cuña utilizado por la Asociación de Investigación de soldadura británico (estándar BWRA). (e) hexagonal y (f) penetrámetros paso de cuña triangular, pasos lineales utilizados por el (norma AFNOR) Marina francesa. Dimensiones dadas en pulgadas.	26

Figura 1.20. Esquema del efecto de las relaciones geométricas. (A) fuente de radiación puntual y aumento de superficie. (B, C y D) fuente de radiación finita. (E y F) variación en el ángulo provocando distorsión en la imagen.	27
Figura 1.21. Formación de imágenes.	30
Figura 1.22. Muestreo de imágenes a 256x256, 128x128, 64x64 y 32x32.	31
Figura 1.23. Efecto de la cuantificación. De izquierda a derecha: 8 y 1 bit.	32
Figura 1.24. Variación de cada uno de los componentes de la escala RGB.	35
Figura 2.1. Estructura del software.	38
Figura 2.2. Ventana de inicio.	39
Figura 2.3. Ventana de análisis de radiografías.	40
Figura 2.4. Ventana de inspección de radiografías.	42
Figura 2.5. Ventana de reporte.	44
Figura 2.6. Ventana de preview.	45
Figura 2.7. Análisis Nivel II de la Placa N° 6.	47
Figura 2.8. Porosidad clúster.	48
Figura 2.9. Inspección visual de la Placa N° 6.	48
Figura 2.10. Análisis Nivel II de la Placa N° 8.	49
Figura 2.11. (a) Penetración inadecuada (b) Grieta transversal.	49
Figura 2.12. Inspección visual de la Placa N° 8.	49
Figura 2.13. Cambios de luminosidad de la componente G en el encuadre 1.	53
Figura 2.14. Análisis de la componente R.	54
Figura 2.15. Análisis de la componente G.	54
Figura 2.16. Análisis de la componente B.	54
Figura 2.17. Preview del reporte de la Placa N° 6.	62
Figura 2.18. Preview del reporte de la Placa N° 8.	63
Figura 2.19. Medición convencional realizada en AutoCAD – Placa N° 6.	64
Figura 2.20. Medición convencional realizada en AutoCAD – Placa N° 8.	64
Figura 3.1. Curva de tendencia de la caracterización a negro.	67
Figura 3.2. Curva de tendencia del rango.	70
Figura 3.3. Dispositivos LEDs utilizados en el estudio.	72
Figura 3.4. Sensibilidad del ojo a los distintos Colores.	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de la película radiográfica.	21
Tabla 2.1. Selección del incremento de tamaño de imagen del encuadre 1.	51
Tabla 2.2. Lectura de un pixel de los tres valores RGB.	52
Tabla 2.3. Filtrado de encuadre 1 en los componentes R, G y B al 50% de luminosidad.	55
Tabla 2.4. Cuadro comparativo del encuadre 1 – Placa N° 6.	56
Tabla 2.5. Cuadro comparativo del encuadre 2 – Placa N° 6.	57
Tabla 2.6. Cuadro comparativo del encuadre 3 – Placa N° 6.	58
Tabla 2.7. Cuadro comparativo del encuadre 4 – Placa N° 6.	59
Tabla 2.8. Cuadro comparativo del encuadre 1 – Placa N° 8.	60
Tabla 2.9. Cuadro comparativo del encuadre 2 – Placa N° 8.	61
Tabla 2.10. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 6 – Encuadre 1.	65
Tabla 2.11. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 6 – Encuadre 2.	65
Tabla 2.12. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 6 – Encuadre 3.	66
Tabla 2.13. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 6 – Encuadre 4.	66
Tabla 2.14. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 8 – Encuadre 1.	66
Tabla 3.1. Datos tabulados de la caracterización de las imágenes radiográficas.	68
Tabla 3.2. Datos obtenidos de rango para cada valor porcentual.	69
Tabla 3.3. Comprobación de la caracterización a negro en la placa N° 9.	71

NOMENCLATURA

a, b	Dimensiones de la película
d	Distancia fuente – película
d_{op}	Distancia óptima fuente – película
d_{min}	Penumbra o falta de definición
e	Espesor de la pieza
t	Tiempo de exposición
Di	Distancia fuente-película
Do	Distancia fuente-objeto
F	Diámetro de la fuente
E	Exposición
I_1	Intensidad original de radiación de una fuente
I_2	Intensidad nueva de radiación de una fuente
D_1^2	Distancia original al cuadrado desde la fuente a la película
D_2^2	Distancia nueva al cuadrado desde la fuente a la película
L_i	Longitud inclinada [mm]
L_p	Longitud de la película [mm]
M	Intensidad de corriente del tubo
Pa	Porcentaje de ancho vertical del defecto [%]
Pl	Porcentaje de longitud horizontalmente del defecto [%]
Ph	Número de pixeles enmarcados horizontalmente
Pv	Número de pixeles enmarcados verticalmente
Pth	Número de pixeles totales de la imagen horizontalmente
Ptv	Número de pixeles totales de la imagen verticalmente
Si	Dimensión la imagen radiográfica
So	Dimensión del objeto
T_1	Tiempo de exposición original dado por el diagrama técnico
T_2	Nuevo tiempo de exposición
W_p	Ancho de la película [mm]
X	Longitud del defecto [mm]
Y	Ancho del defecto [mm]

RESUMEN

El presente estudio técnico consistió en el desarrollo de un software de asistencia para el análisis e inspección de placas radiográficas de soldadura (Watching Defects 1.0, WD 1.0), para el cual se utilizó una serie de películas radiográficas, proporcionadas por la empresa ENDE Cía. Ltda., digitalizadas en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional; creando así un banco digitalizado de placas disponible para el análisis.

La creación del software de asistencia se basó en la utilización de múltiples ventanas de asistencia que permiten al usuario navegar por una interfaz fluida y amigable. La interfaz además permite una conexión entre los comandos de medición de discontinuidades, procesamiento de imágenes (mediante el contrastado de imágenes con la utilización de la escala RGB de color de píxeles) y la creación de reportes. El reporte incluyó los valores más relevantes para la evaluación de radiografías.

La metodología utilizada para realizar el estudio se basa en el desarrollo del software con un lenguaje de programación orientado a objetos, el cual nos permitió ingresar las radiografías, digitalizadas, procesarlas y filtrarlas, buscando la mejor condición de aspecto para realizar las mediciones del largo y ancho de discontinuidades y compararlas con los límites de admisibilidad dictadas por las normas pertinentes; estas normas consideran el tipo de construcción y proceso de soldadura. De esta forma, se proporciona un soporte paralelo para la realización de inspección de soldaduras mediante Radiografía Industrial como método de ensayos no destructivos.

El software concluye con la presentación de un reporte en el que constan las variables más relevantes en el análisis e inspección de las placas radiográficas y permite probar el filtro más idóneo. Se recomienda, en base al estudio de la caracterización en negro (desarrollada sobre los tres casos analizados más representativos) que permite identificar los rangos aceptables para el filtrado, usar el filtro verde con un brillo de 16 %G.

Palabras clave: Banco digitalizado, escala, ensayos, interfaz, inspección, software.

ABSTRACT

Through this project, an assistance software for the analysis and inspection of radiographic welding films (Watching Defects 1.0, WD 1.0) is developed. To do this it was necessary the use of a group of radiographic films, which were provided by the ENDE Cía. Ltda. Company and were digitalized in the non-destructive test laboratory at National Polytechnic School. So, it was created a scanned data base of radiographic films which are available for analysis.

The assistance software contains multiple assistance windows that allow the user the navigation through a fluid and user-friendly interface. The whole interface also allows a connection between the measurement commands of discontinuities, image processing (by contrasting images with the use of the RGB color scale of pixels) and the creation of reports based in recorded data. The report includes the most relevant values for the evaluation of radiographs.

The methodology used includes the development of a software based on an object-oriented programming language. This allows us entering the digitized radiographs, processing and filtering them, searching for the best appearance condition to make the length and width measurements of the discontinuities and comparing the partial results with the limits of admissibility dictated by the appropriate norms. These norms consider the type of construction and welding process. In this way it is provided a parallel support to the industrial radiography test as a non-destructive testing method.

The software concludes with the creation of a report which includes the most relevant variables in the analysis and inspection of the radiographic films and also let the user to test the most suitable filter to use. Based on the characterization in black (developed over the three more representative analyzed cases) which lets the identification of the acceptable ranges for the filtering, it is recommended the use of the green filter with brightness of 16%G.

Keywords: Scanned data base, scale, tests, interface, inspection, software.

DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE ASISTENCIA PARA EL ANÁLISIS E INSPECCIÓN DE PLACAS RADIOGRÁFICAS DE SOLDADURA

INTRODUCCIÓN

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el estudio, realización y aplicación de ensayos es una disciplina esencial en la formación de cualquier técnico e inspector, que abarca un nivel de estudios desde formativos hasta de ingeniería. Esto debido a que el campo de aplicación de los ensayos es amplio, desde el conocimiento y prueba de nuevos materiales, hasta aplicaciones comunes como son el control de calidad, análisis de defectos de fabricación o metrología. (Loriente, 2011)

Es así que las técnicas de ensayo son cada vez más usuales, debido que estas nos ayudan a caracterizar y verificar propiedades de los materiales, simulando las condiciones a las que estos están expuestos debido a su funcionamiento y bajo solicitaciones de servicio, es así que estas pueden clasificarse dependiendo de la utilidad de la pieza después de ser sometida al ensayo, como destructivos y no destructivos.

Los ensayos no destructivos son aquellos que al aplicar a un material sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y dimensionales no cambian o reciben un daño insignificante. Este tipo de ensayos se ayudan de fenómenos físicos tales ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable al material examinado. (Trecco, 2013)

En base a la gran cabida que tienen los ensayos no destructivos y el actual uso de la Radiografía Industrial en la inspección, se establece utilizar un banco de radiografías pertenecientes a entidades relacionadas a actividades de soldadura e inspección, que conjuntamente ayudara al desarrollo del software, buscando establecer una muestra de estudio específico para analizar y poder compararlo de acuerdo a normas establecidas en la inspección de soldadura.

La creación de formularios y múltiples funciones han hecho que se rescate la utilidad de un lenguaje de programación orientada a objetos (Visual Basic 6.0). Dentro del cual se establecerá una programación con interfaz de conexión entre los resultados y comandos didácticos de uso para el usuario.

La base de la programación se destina a la medición de la longitud y ancho de *indicaciones* presentes en la radiografía del cordón de soldadura. Además de la utilización de la escala RGB de color de píxeles, para ayudar con el procesado de imágenes radiográficas mediante la manipulación del contraste, obteniendo una mejor visibilidad de la *indicación* presente. Siendo así que la creación de este software debe ser de fácil manejo e interpretación para evaluar sus resultados.

En el software además se desarrollará un reporte donde consten los valores más relevantes sobre la interpretación e inspección de las radiografías analizadas, además de que el software trabajara a múltiples ventanas para proporcionar la facilidad del usuario. La creación del software permitirá conservar y evitar el deterioro de las características que definen la radiografía industrial dada en la película radiográfica, creando así un banco de datos a ser conservado para futuras comparaciones de otros procesos u proyectos.

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

A través del tiempo el desarrollo e implementación de nuevas formas de inspección han permitido garantizar la calidad de productos y servicios en la industria, esto incluye los procesos de soldadura, los cuales deben asegurar la confiabilidad en las uniones soldadas frente a las sollicitaciones mecánicas en servicio.

Los ensayos no destructivos permiten detectar *indicaciones* en probetas de materiales sin alterar permanentemente sus propiedades físicas o químicas, además de evaluar y calificar en base de criterios de aceptación dictaminadas por normas o códigos; y en específico, la utilización de radiografía industrial en la inspección de uniones soldadas nos asegura un método confiable que permita la detección de discontinuidades que comprometan la unión, visibles en películas radiográficas consideradas un registro permanente de la inspección, pero el paso del tiempo genera una desventaja en cuanto a los materiales de las cuales están elaboradas, ya que están propensas al deterioro. Más aún que por definición de políticas de proyectos, las radiografías industriales deben guardarse en buenas condiciones durante 5 años.

En radiografía, el nivel de detalle más pequeño capaz de ser observado por el inspector en una película es conocido como la calidad de imagen radiográfica o sensibilidad, los cuales son detectables por el ojo humano, siempre y cuando el manejo de las variables de exposición radiográfica sean correctos y estos entreguen una imagen de calidad. Debido a un mal manejo de las variables muchas veces se plasman imágenes radiográficas con bajo contraste, opacidad, zonas de diferente densidad, entre otras, las cuales dificultan la observación y detección de discontinuidades.

Una solución tentativa con gran proyección se enmarca en la creación de un software que brinde soporte y ayude al análisis e inspección de radiografías industriales de probetas de soldadura, para que las películas no pierdan calidad en la imagen radiográfica con el paso del tiempo, facilitando además la observación de discontinuidades; es por ello que se plantea usar el análisis de imágenes en escala RGB con un lenguaje de programación acorde a la facilidad de uso e interpretación del mismo y de sus resultados. Creando así un banco de datos digital y reporte de las imágenes radiográficas representativas, provenientes de proyectos o muestras realizados a tiempo real por empresas o industrias especializadas en el uso de equipos de Ensayos no Destructivos.

Concluyendo así, que con todos estos antecedentes se pretende explorar este espacio de aplicación para desarrollar un software de interpretación radiografías de soldaduras, que se establezcan en este estudio bajo la metodología de ensayos no destructivos.

Objetivo general

Desarrollar un software de asistencia para el análisis e inspección de placas radiográficas de soldadura.

Objetivos específicos

- Crear un software que contribuya en el análisis de radiografías industriales de soldadura.
- Elaborar una base digitalizada de placas radiográficas.
- Evaluar las imágenes radiográficas y elaborar registros digitales.
- Validar los resultados obtenidos entre el software y la medición convencional, bajo su respectiva norma.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades

1.1.1. Historia de la soldadura

La unión de metales se remonta desde épocas tan remotas, inclusive antes de cristo dado que el hombre tenía la necesidad de supervivencia y por ello debía unir piezas metálicas para construir herramientas. El crecimiento de esta disciplina y conformación como tecnología no estaría completa sin las contribuciones de metalúrgicos que van desde el tiempo de los Faraones del antiguo Egipto, hasta el tiempo del Imperio Romano, donde existían procesos como lo eran el soldering, brazing y la forja. (ACHISOL, 2012)

El asentamiento de la tecnología de soldadura se dió gracias a la contribución de varios hombres comunes al resolver problemas de una manera muy práctica. No es hasta 1801 que existe un gran auge de la soldadura tras el descubrimiento del arco eléctrico, otorgado a Sir Humphrey Davy y en 1880 Auguste De Meritens con la invención de la primera soldadora por arco eléctrico.

Entre los primeros avances, la cronología de la soldadura se podría decir que se desarrolla de la siguiente manera:

Soldadura por forja: es una arte que ha perdido su uso de a poco, dado que existen procesos más industrializados y rápidos, este se considera el primer proceso de unión de metales que consistía en calentar metales o piezas y golpearlas una sobre otra para fusionarlas.

Soldadura por gas: se utilizaba una llama Oxi-gas considerada a alta temperatura. Donde el proceso se derivaba en tres formas de mezcla: Oxi-hidrógeno, OxígenoCarbón- Gas y Aire-hidrógeno. Las tres llamas obtenidas de la mezcla presentaban dos limitaciones básicas; la primera se relacionaba con sus relativas bajas temperaturas que limitan el espesor y tipo de metal a trabajar que, solía ser de ½ pulgada como máximo. Y la segunda se relaciona con lo difícil de controlar las soldaduras frágiles debido a la característica altamente oxidante de la llama. (ACHISOL, 2012)

Soldadura al arco eléctrico: el desarrollo del arco eléctrico como fuente de aplicación a la soldadura se desarrolla cerca del año 1890. Las primeras máquinas soldadoras en funcionar correctamente fue la de N. V. Benardos quien lo patentó en 1885. Ver figura 1.1.

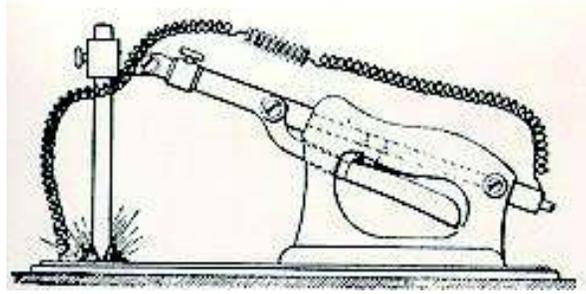


Figura 1.1. Primera soldadora de arco.
(Fuente: ACHISOL, 2012)

Soldadura por resistencia: gracias a que las grandes compañías lograron el desarrollo y la distribución de energía y con el complemento del estudio de Joule del calentamiento mediante resistencias eléctricas. Elihu Thompson desarrolló una máquina, ver figura 1.2, conformada por una bobina simple y una batería que descargaba alta tensión y con un principio básico de descarga desde el condensador a la bobina creo y patentó la primera soldadora eléctrica por resistencia de puntos.



Figura 1.2. Primera soldadora por resistencia con secundario de bobina simple.
(Fuente: ACHISOL, 2012)

1.1.2. Procesamiento digital de imágenes

El procesado digital de imágenes está ligado al desarrollo tanto de la cámara fotográfica digital como de los ordenadores (computadores), debido a que se requiere un mínimo de potencia, capacidad y procesamiento tecnológico dado por los ordenadores y cámaras a lo largo de la historia.

Históricamente se remonta al año 1921 donde la codificación y transmisión de datos de carácter noticioso se realizaban de submarinos entre Londres y New York, en donde se reconstruía la información e imprimía. En 1922 se mejoró el proceso al emplear una técnica

basada en la reproducción fotográfica a través de cintas perforadas en las terminales telegráficas receptoras que permitían obtener 5 niveles de gris. Para 1929 la técnica mejoró aún más, permitiendo obtener 15 niveles de gris en la reproducción fotográfica. A partir de los años 60 el procesamiento digital de imágenes avanzó desde la invención del transistor en los Laboratorios de Bell en 1948, la invención de circuitos integrados por Texas Instrument en 1958, hasta la invención del computador personal en 1981 por parte de IBM. (Laorden, 2012)

Remontándonos a los años 60 y 70 donde una de las empresas fotográficas pioneras fue Eastman Kodak asentada en Rochester, Nueva York, donde esta empresa fabricaba películas fotográficas para las ya existentes cámaras rudimentarias; es así que el joven Ingeniero Steven Sasson en 1973 a cargo del proyecto sobre sensores CCD buscaba almacenar la señal eléctrica dada por el sensor a través de la luz.

Utilizando un cassette digital se podía almacenar casi 30 imágenes de 0,01 megapíxeles, que Sasson pensó que estaba bien, dado que era algo entre los típicos carretes fotográficos de 24 a 36 fotos. El primer prototipo de Sasson, ver figura 1.3, presentaba una lente de una cámara de vídeo Super 8 y solamente era capaz de grabar imágenes en blanco y negro. Era portátil, con un peso de 3,6 kilogramos, y utilizaba 16 baterías de nickel y cadmio, donde la única forma de ver las imágenes contenidas era en un televisor.



Figura 1.3. Primera cámara digital.
(Fuente: García, 2016)

El objetivo fundamental de la cámara era el registro de imágenes sin la necesidad de la utilización de películas fotográficas, donde al cabo de una demostración se tomó una fotografía y tras un minuto de espera esta se mostró en un televisor, la espera se debió al tiempo de proceso que llevaba copiar la foto al CCD de la memoria RAM hasta copiarla a

la cinta. Es así que los directivos de la empresa Kodak permitieron que Sasson siga con su investigación y Kodak patentaba la idea de la cámara fotográfica digital, comercializando su primera cámara digital en 1989. (García, 2016).

1.1.3. Defectología

El estudio de la defectología como aplicación de la radiografía industrial de soldadura es muy importante en el ámbito ingenieril, debido a que busca el aseguramiento de la vida útil de componentes mecánicos, durante la fabricación y su posterior vida de servicio, mediante el estudio de los diferentes tipos de defectos en uniones soldadas, además de la interpretación de discontinuidades en placas radiográficas y conocimiento de sus límites de aceptabilidad.

Definiciones elementales:

- *Indicación*: es cualquier evidencia que se detecta en un ensayo no destructivo.
- *Discontinuidad*: se refiere a una *indicación* que compromete la homogeneidad de la soldadura.
- *Defecto*: es una discontinuidad que por sus dimensiones excede los límites de admisibilidad estipuladas en normas ASME, AWS, API, etc.

Discontinuidades durante la vida de un elemento mecánico

Debido que una discontinuidad está presente durante toda la vida de vida de un elemento mecánico existe la siguiente clasificación:

- *Discontinuidad inherente*: se produce durante la producción inicial desde el estado de fusión.
- *Discontinuidad en proceso*: se crea durante procesos posteriores de fabricación o terminado.
- *Discontinuidad de servicio*: se produce durante el uso del producto debido a condiciones ambientales, de carga o ambas. (Carmona, 2013).

Tipos de discontinuidades comunes en radiografías industriales:

- Grietas (C): es una discontinuidad visible como una línea quebradiza causada por la rotura del material y este en su mayoría es inaceptable bajo cualquier norma. Ver figura 1.4.

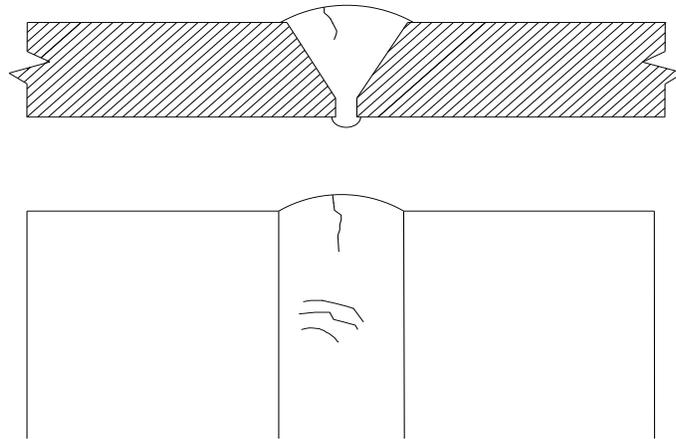


Figura 1.4. Esquema de discontinuidades de grietas.
(Fuente: Autores)

- Penetración incompleta sin Alto/Bajo (IP): es un tipo de penetración incompleta en la cual no existe desalineación de parte de las juntas y existe además un relleno incompleto en el pase raíz de soldadura. Ver figura 1.5.

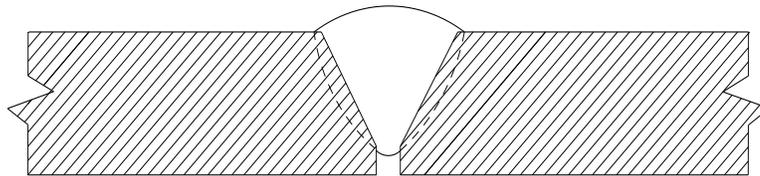


Figura 1.5. Esquema de penetración incompleta.
(Fuente: Autores)

- Penetración incompleta con desalineamiento (IPD): este tipo de falta de penetración existe cuando uno de los bordes de la raíz no está alineada con su opuesto y queda expuesto.
- Falta de penetración entre pases (ICP): esta discontinuidad interna se da entre el pase raíz o pase interno y un primer pase externo, comúnmente causado por la inadecuada penetración en el sentido vertical de los bordes.
- Fusión incompleta expuesta a la superficie (IF): es una *indicación* superficial entre el material base y el cordón de soldadura. Ver figura 1.6.



Figura 1.6. Esquema de fusión incompleta.
(Fuente: Autores)

- Fusión incompleta por junta fría (IFD): es una imperfección producida entre el metal base y un pase o entre dos cordones (pases adyacentes) siempre y cuando no sean perceptibles o abiertas a la superficie.
- Concavidad interna (IC): es una discontinuidad que se observa como una cavidad, apreciable en el pase raíz del cordón de soldadura que hace que la parte central del cordón presente un nivel inferior al de la superficie del material base.
- Quemón (BT): es una discontinuidad presente en una parte del pase de raíz en donde la excesiva penetración ha causado un desprendimiento de la pileta fundida hacia fuera del material base que se muestra en la figura 1.7. De esta manera el BT (quemón) quedaría como una concavidad interna pero concentrada en un punto. (American Petroleum Institute, 1999)

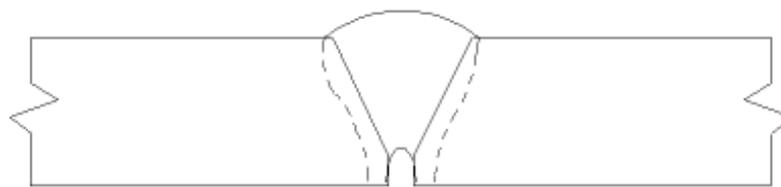


Figura 1.7. Esquema de quemón.
(Fuente: Autores)

- Inclusiones de escoria: se presenta cuando un sólido no metálico queda atrapado entre los pases del cordón de soldadura o entre el cordón y el material base. Si forman escorias alargadas se denominan inclusiones ESI usualmente observadas como escorias continuas a lo largo de una trayectoria y si son aisladas con forma irregular son inclusiones ISI las cuales se pueden encontrar en cualquier parte de un cordón de soldadura. Ver figura 1.8.

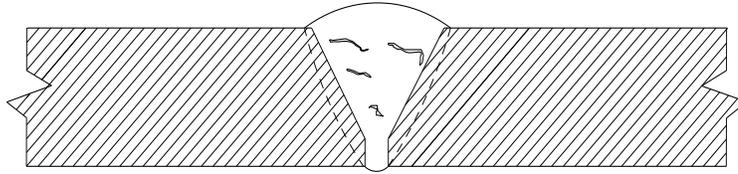


Figura 1.8. Esquema de inclusiones de escoria.
(Fuente: Autores)

- Porosidades (P): son gasificaciones o gas atrapado del metal de soldadura que no consiguieron salir a la superficie del relleno. Esta puede ser esférica cuando es puntual o alargada si existe una hilera de poros y estos se juntan como en la figura 1.9. Si la gasificación se presenta por enfriamientos bruscos y en el pase raíz se denominan poros túnel (HB).

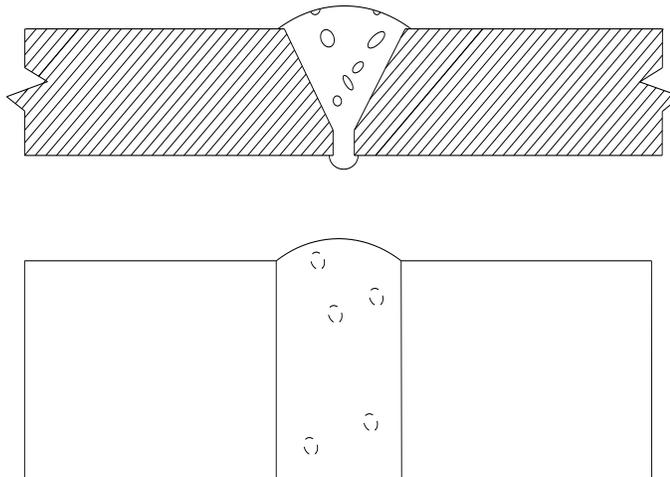


Figura 1.9. Esquema de porosidades.
(Fuente: Autores)

- Mordedura: se presenta como una ranura en el límite entre el material base y el pase de raíz. Estos pueden clasificarse de dos maneras, si la socavación o ranura es adyacente a el último pase o pase en la superficie (EU), ver figura 1.10, o si se presenta entre el pase raíz y el material base y está expuesta a la superficie (IU).

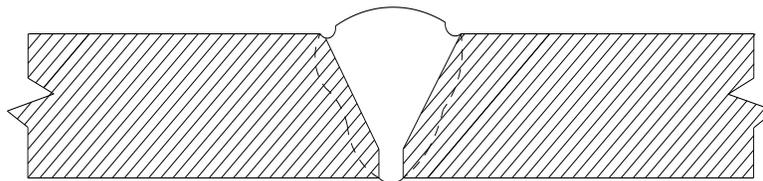


Figura 1.10. Esquema de mordeduras.
(Fuente: Autores)

1.1.4. Herramienta computacional afín a la inspección de soldadura digital

El software ISee Profesional es innovador para la inspección de rayos X y sistemas de inspección por ensayos no destructivos, especializado en radiología digital. Posee ciertas características que lo hacen interesante y práctico como:

- Soportes para los detectores digitales en la digitalización de película.
- Herramientas de visualización, medición y lectores, que cumplen estándares rígidos para la inspección.
- Algoritmos avanzados para procesar imágenes, con soportes de normas de ensayos no destructivos, que incluyen ASTM E2339-11 / E2699-11 / E2738-11 (DICONDE).
- Asistentes para generar informes de inspección en diferentes formatos.
- Posee lectores CR, detectores DDA y digitalizadores de película.

Utiliza un sistema de escaneado digital y película digital (CR). Este sistema emplea soportes flexibles capaces de capturar una imagen digital y se emplean de manera similar a la película convencional. Estos soportes flexibles son procesados en un escáner digital que muestra la imagen radiográfica en la pantalla de un ordenador. (SCI, 2018).

El software además posee instrumentos que ayudan a las tareas de inspección de costuras de soldadura según ISO 17636-2, prueba de intercambiador de calor, inspección de corrosión y erosión (medición de espesor de pared), etc. Proporciona la cantidad adecuada de filtros útiles para mejorar las imágenes radiográficas.

Sistema de Inspección de soldadura digital

El software de VISION IN X presenta sistemas fundamentados en DDA (adaptadores basados en datos) en la inspección de soldadura. Presenta detectores digitales dependiendo de la aplicación en particular. El usuario podrá obtener una plataforma fácil e interactiva para ejecutar los procesos de inspección y aplicación de filtros, donde los pasos a seguir van desde el control de la fuente de radiación, la adquisición y análisis de imágenes radiográficas, hasta la generación de informes. Uno de los filtros “extraer detalles” se muestran en la figura 1.11.

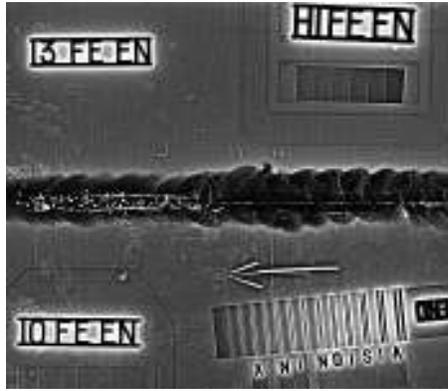


Figura 1.11. Filtro de VISION IN X aplicado a una radiografía.
(Fuente: VISION IN X, 2018)

Evaluación de corrosión y medición del espesor de la pared

Una de las herramientas que posee el software es la evaluación de corrosión y espesores de pared, útiles en la inspección de tuberías que se encuentran aisladas y de difícil acceso. Posee dos métodos: mediciones tangenciales observados en la figura 1.12 y mediciones mediante el método densitométrico, el cual consiste en la atenuación de ondas al ingresar en el espesor de una tubería.

Muchos factores dependen de la exactitud de los resultados como la precisión y fiabilidad de las mediciones, las diferentes condiciones físicas de la tubería como grosor y diámetros de tuberías.

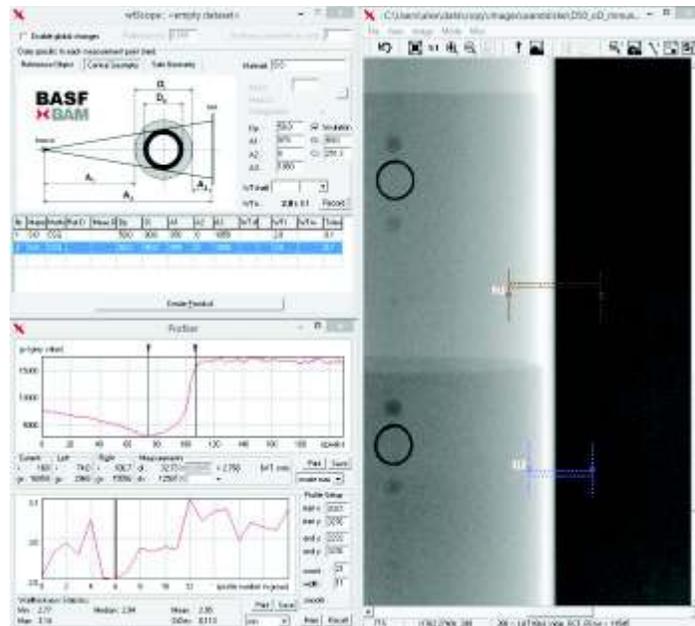


Figura 1.12. Medición tangencial del grosor de una tubería.
(Fuente: VISION IN X, 2018)

1.2. Área de estudio (Radiografía Industrial)

1.2.1. Introducción a la radiografía

Conjuntamente con el avance de la tecnología, la exigencia de ofrecer productos de calidad y asegurar la vida útil de los mismos, obligan no solo al mejoramiento de procesos de producción y fabricación de productos metalúrgicos. Las fábricas acorde a las necesidades de competir en el mercado cada vez más exigente necesitan implementar políticas de calidad, control de costos y aseguramiento en su vida de servicio.

Dentro del ámbito de uso de los ensayos no destructivos que ayudan a determinar las propiedades de los materiales en una aplicación ingenieril como la verificación de la calidad, la construcción de estructuras metálicas, uso de maquinaria industrial. La radiografía industrial es un tema importante y que permite la detección de discontinuidades superficiales, sub superficiales y volumétricas a lo largo de todo el espesor del material.

El uso de radiografía industrial como método de inspección, realizadas en varias piezas en cualquier etapa de su vida de fabricación y servicio, es cada vez más frecuente, dando lugar al establecimiento de laboratorios de ensayos no destructivos dentro del cual se realizan ensayos de rayos X o gammagrafía.

La investigación y desarrollo de la radiografía industrial permite la producción de nuevas fuentes de energía como el generador de neutrones e isótopos radioactivos, mejoramiento en reducción, optimización de equipos, tanto en potencia como portabilidad; investigación en nuevos materiales para películas radiográficas así como procesadores automáticos de películas, técnicas de toma y revelado de películas.

1.2.2. El proceso de la radiografía

En general la radiografía industrial es un método de ensayo e inspección de materiales, fundamentado en la absorción de radiación electromagnética de onda corta lo que lo hace altamente penetrante en ciertos materiales. Debido a que cada material posee características diferentes (densidad, composición, espesor, número atómico, etc.) tendrán mayor capacidad de absorción de radiación penetrante de acuerdo a su longitud de onda, sea esta rayos gama o X, ver figura 1.13.

Los términos radiografía y gammagrafía, pertenecen a esta familia de ensayos no destructivos debido a que los objetos ensayados no son dañados, ni compromete sus propiedades y pueden ser puestos en servicio incluso después de haber sido ensayados. La radiografía utiliza este método que al hacer pasar radiación a través de los materiales, una parte de esta energía es absorbida o transformada.

Una variación de la intensidad del haz de la onda de radiación sobre el material, produce imágenes visuales permanentes registradas en películas o papeles radiográficos o puede estar representado mediante radiografía en tiempo real mostrando imágenes de dos dimensiones proyectadas en un monitor.

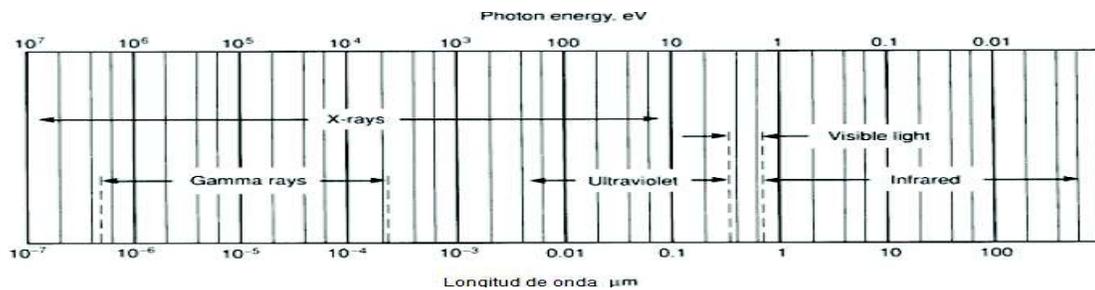


Figura 1.13. Esquema de la porción del espectro electromagnético y sus longitudes de onda. (Fuente: ASM International, 1989)

Existen tres elementos básicos que intervienen en el proceso radiográfico y estos son:

- Una fuente de radiación: en la mayoría de ensayos se utilizan dos tipos de radiación X o Gamma. Los rayos X y Gamma son una forma de radiación electromagnética diferenciándose de otros tipos de radiación electromagnética (como microondas, ondas de radio y visible) por su naturaleza de longitud de onda corta que les permite penetrar en los materiales que comúnmente absorben o reflejan la luz ordinaria.
- La muestra a ser ensayada: la muestras a radiografiar pueden variar desde piezas electrónicas hasta partes de maquinaria industrial, y de igual manera un sin número de materiales.
- La película para rayos X, rayos Gamma y otras películas fotográficas son sensibles a la acción directa de la radiación X y Gamma. Para la radiografía de materiales se han diseñado diferentes tipos de películas, algunos de estos proporcionan mejores resultados con pantallas intensificadoras o sin pantallas. Las zonas expuestas de esta manera se vuelven oscuras cuando se somete la película a un proceso de revelado y fijado, dependiendo el grado de ennegrecimiento de la cantidad de exposición. Este grado de ennegrecimiento es llamado Densidad Radiográfica. Este

parámetro radiográfico es diferente de la densidad de la masa de los objetos. (Torres, Torres , & Montanez , 1988).

La figura 1.14 se muestra el esquema de disposición de los elementos básicos en una toma radiográfica.

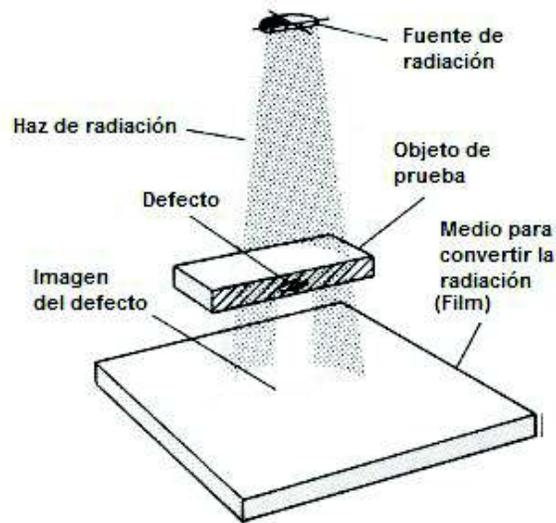


Figura 1.14. Esquema de los elementos básicos en una toma radiográfica. (Fuente: ASM International, 1989)

1.2.3. La radiografía

En términos sencillos una radiografía es un registro permanente fotográfico, producto de la exposición a rayos X o gamma de un film o película, este último llamado gammagrafía.

La densidad de un área de la imagen radiográfica depende principalmente de la energía de radiación aplicada en función de la emulsión presente en la película. Es así que la diferencia de densidades presentes en una zona adyacente se conoce como contraste. Y el detalle de agudeza o acabado en los contornos de la imagen se conoce como definición.

La degradación gradual en el oscurecimiento sobre la superficie de la película sin un contraste claro y definido, presenta bajas condiciones de detalle dificultando la detección de *indicaciones*. Al incidir la energía radiación sobre el film, solamente una porción de esta energía es absorbida, produciendo el ennegrecimiento típico de las películas el resto de la energía se pierde, es así que se utilizan pantallas intensificadoras para disminuir la pérdida.

Una de las afectaciones más comunes en la radiografía convencional es la reducción del contraste causado por la radiación dispersa de los materiales que rodean al film. Esta

radiación dispersa nubla la imagen en una película radiográfica, para evitar este fenómeno de utilizan pantallas de plomo o filtros.

1.2.4. Generación de rayos X.

La producción de radiación electromagnética penetrante se da por el bombardeo de electrones de alta velocidad a un blanco metálico, generalmente de wolframio. La generación de rayos X generalmente se producen por dos métodos:

- Emisión por el método Bremsstrahlung, se produce la radiación (espectro continuo de rayos X) debido al cambio de la velocidad de los electrones emitidos o frenado de electrones.
- Emisión por celda K, se produce la radiación (espectro discontinuo de rayos X) durante el choque de electrones incidentes y el traspaso o recaptura de electrones orbitales expulsados. La energía perdida por los electrones al ser expulsados de su estado energético son conocidos como emisión de fotones de rayos X. Este fenómeno produce mayor intensidad de rayos X que el método Bremsstrahlung.

1.2.4.1. Tubos de rayos X

Los tubos de rayos X son dispositivos de conversión de energía eléctrica en rayos X, y está constituida por una estructura de cátodo (electrodo negativo) y ánodo (electrodo positivo) que se encuentran dentro de una cámara cerrada al vacío generalmente de vidrio. Ver figura 1.15.

El cátodo contiene un filamento que se encarga de suministrar una nube de electrones al verse calentado por la circulación corriente mediante el suministro de un transformador de bajo voltaje, generalmente controlado por un reóstato. Los electrones emitidos están dirigidos hacia el ánodo mediante un sistema de enfoque, que se encargan de concentrar el haz de electrones en una zona del blanco denominada punto focal.

El ánodo generalmente es un bloque de cobre, donde uno de sus extremos presenta un bisel a 70° respecto al eje de la cámara y se encuentra una lámina, el cual es el blanco, generalmente de tungsteno. Los electrones se aceleran en dirección cátodo-ánodo gracias al alto voltaje aplicado entre los electrodos.

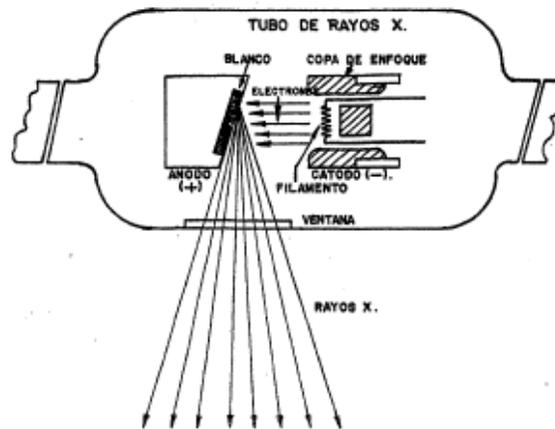


Figura 1.15. Esquema de la producción de rayos X.
(Fuente: Torres, Torres , & Montanez , 1988)

Dependiendo del tamaño del punto focal, se puede clasificar a los tubos de rayos X en los siguientes grupos:

- Convencionales: con tamaños de punto focal que oscilan entre 2 por 2 mm (0,08 por 0,08 pulg.) y 5 por 5 mm (0,2 por 0,2 pulg.)
- Minifocus: con tamaños del punto focal en el rango de 0.2 mm (0.008 pulg.) y 0,8 mm (0,03 pulg.)
- Microfocus: con tamaños del punto focal en el rango de 0,005 mm (0,0002 pulg.) y 0,05 mm (0,002 pulg.) (ASM International, 1989).

La energía aplicada al tubo mayoritariamente se convierte en calor al impactar el haz de electrones en el punto focal y tal solo el 1% de esta energía se transforma en energía útil (rayos X).

La energía de radiación que emite un tubo de rayos X depende de factores como la intensidad de la corriente y voltaje que pasa por el tubo medidas en miliamperios y kilovoltios, respectivamente, además del tiempo de duración de servicio del tubo. La variación de estas variables influye directamente en la intensidad de la radiación emitida, en la figura 1.16. (a) se observa la relación de dos intensidades de corriente distintas para un tubo de rayos X representadas en curvas de emisión espectral, mientras que la figura 1.16. (b) muestra el comportamiento de las curvas de emisión espectral en función de la variación del kilovoltaje, manteniendo constante el miliamperaje.

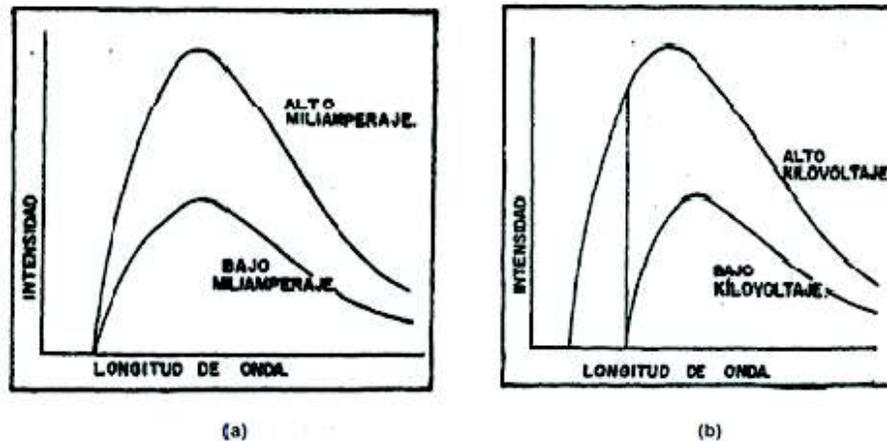


Figura 1.16. Curvas que ilustran el efecto de la variación del miliamperaje y kilovoltaje, respectivamente sobre la intensidad de un rayo de haz de rayos X.
(Fuente: Torres, Torres , & Montanez , 1988)

Es así que para un determinado kilovoltaje y miliamperaje la energía de radiación emitida por los rayos x es directamente proporcional al tiempo que dura activado el tubo. Donde la potencia de rayos X se puede expresar mediante la ecuación 1.1.

$$E = Mt$$

(Ec. 1.1)

La cantidad de radiación se mantendrá constante si la exposición se mantiene constante, sin importar la forma en que se varíen los factores individuales de la Intensidad de corriente del tubo y el tiempo de exposición. Esto permite especificar las exposiciones de rayos X en miliamperios-minutos o en miliamperios-segundos, sin indicar los valores individuales específicos de la intensidad de corriente del tubo y el tiempo. El kilovoltaje aplicado al tubo de rayos X afecta no solamente a la calidad, sino también a la intensidad del haz. A medida que se incrementa el kilovoltaje, se producen rayos X de longitud de onda menor y, por tanto, con mayor poder de penetración. (Torres, Torres , & Montanez , 1988).

1.2.5. Práctica radiográfica

1.2.5.1. Películas radiográficas

Una película radiográfica nos permite obtener un registro permanente dado por la radiación al penetrar en el material y plasmarse en la película. La figura 1.17 muestra una película estándar, que se forma de dos emulsiones una en cada extremo y una película protectora que envuelve la emulsión hecha de celulosa, triacetato o acetato de celulosa. La emulsión

contiene cristales de haluro de plata dispersos en gelatina, en esta emulsión se produce el proceso químico al exponerse a la radiación o la luz, esta emulsión en ambos lados de la película aumenta significativamente la velocidad de exposición del film ante la radiación penetrante.

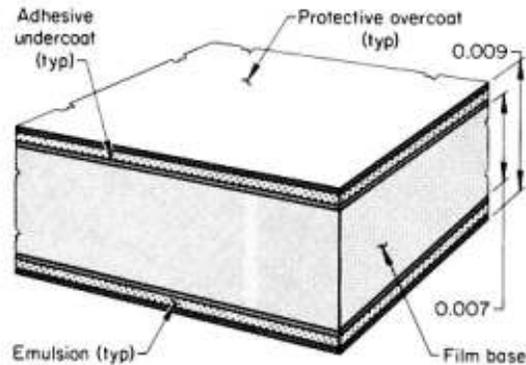


Figura 1.17. Esquema de la sección transversal de una película de rayos x.
(Fuente: ASM International, 1989)

Al utilizar películas con dos emulsiones, en esta se producen dos imágenes, una en la parte delantera (tapa) y una en la base. Al observar estas imágenes sin mayor detenimiento no causa ningún problema, debido que las imágenes están separadas centésimas de milímetro de la base de la película. Sin embargo, si se utiliza una ampliación se observa que las dos imágenes se ven ligeramente separadas, dificultando la interpretación.

Para revelar una película esta se procede a desarrollarla, exponiéndola químicamente, haciendo que los granos de haluro de plata se conviertan en plata metálica negra. Esta plata metálica latente se mantiene suspendida en el gel y se encarga del ennegrecimiento u oscurecimiento en la imagen en desarrollo. Después del desarrollo, la película se trata con una sustancia química llamada un fijador, que convierte los granos de haluro de plata no expuesto en un compuesto soluble en agua. Los productos de reacción de desarrollo y la fijación se lavan y la película se seca. (ASM International, 1989).

Existen generalmente cuatro clasificaciones de película radiográfica industrial que se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Clasificación de la película radiográfica.

Denominación	Característica	Aplicabilidad
Clase I	De grano extra fino, de contraste muy alto y baja velocidad de exposición.	Esta película se utiliza para materiales de baja densidad, con alta energía de radiación y se utiliza con/sin pantallas de plomo o intensificadoras.
Clase II	De grano fino, de contraste alto y velocidad media, mejor velocidad en comparación con la de clase I, además proporciona una excelente definición.	Aplicable a materiales de densidad menor y pequeños espesores. Con energía de radiación alta/media, se utiliza con/sin pantallas de plomo o intensificadoras.
Clase III	Tiempos de exposición cortos, de alta velocidad y alta energía, es una película de contraste medio y alta granularidad.	Aplicable para procesos de radiografía con rayos x y gamma, se utiliza con/sin pantallas de plomo o intensificadoras.
Clase especial	Posee películas de alta definición, alta velocidad, alto contraste y de grano fino.	Se puede aplicar con/sin ayuda de pantallas intensificadoras fluorescentes, se usa en materiales como acero, latón, etc.

(Fuente: Autores)

1.2.5.2. Curvas características

Una curva característica en radiografía se refiere a la relación entre la exposición de una película y la densidad radiográfica obtenida, denominada como curva sensitométrica y fue aplicada inicialmente por Hurter y Driffled en 1890, por lo que se la llama también curva HD. Las curvas características se generan determinando relaciones entre las densidades producidas por exposiciones relativas logarítmicas. La figura 1.18 muestra las curvas características de tres películas comerciales expuestas a la radiación X entre pantallas de plomo.

Se utilizan unidades relativas debido a las condiciones de dispersión y debido a que no hay unidades compatibles con kilovoltajes. De igual manera el uso de logaritmos no ayuda solamente en la escala, además en relaciones de intensidades o exposiciones. La aplicación de las curvas características ayuda a determinar el gradiente de película y la velocidad.

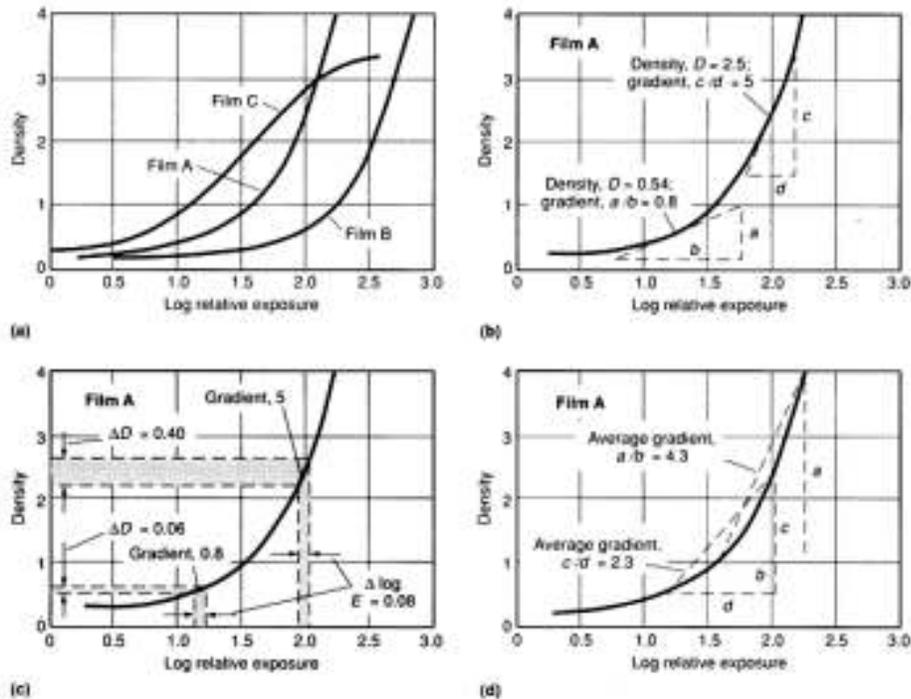


Figura 1.18. Curvas características de una película radiográfica que determinan el tipo de película y el gradiente de película, velocidad, y densidad. (a) las curvas típicas para tres películas de rayos X industriales expuestas a la radiación entre pantallas de plomo. (b) evaluación de los gradientes en dos puntos en la curva para la película A en (a). (c) la diferencia de densidades (d) promedio de gradientes para película A determinaron durante dos intervalos de densidad.
(Fuente: ASM International, 1989)

1.2.5.2.1. Contraste

El contraste se puede definir como la inclinación, o pendiente de la curva característica de una película para rayos X o gammagrafía que varía continuamente a lo largo de su longitud. Cuanto más inclinada es la pendiente de la curva en esta zona mayor es la diferencia de densidades y, por tanto, mayor es el contraste y visibilidad del detalle.

La inclinación de una curva en cualquier punto determinado puede expresarse como la inclinación de una línea recta trazada como tangente a la curva en ese punto. La pendiente de dicha línea recta se denomina el gradiente del material a la densidad en cuestión.

Si en las curvas características la pendiente de la curva es mayor de 1, las relaciones de intensidades o contrastes del objeto radiografiado de la radiación que emerge del objeto resultan exageradas en la reproducción radiográfica, y cuanto mayor es el gradiente, mayor es el grado de relación intensidad/contraste. De lo anterior, a densidades para las cuales el gradiente es mayor de 1, la película actúa como un amplificador de contrastes; si el gradiente es menor de 1, los contrastes del objeto radiografiado disminuyen en la

reproducción radiográfica. La densidad útil mínima es aquella a la que se obtiene el gradiente útil mínimo y en general, siempre que sea posible deberán evitarse gradientes inferiores a 2. La capacidad de la película para ampliar el contraste del objeto radiografiado es especialmente importante en radiografía con radiaciones muy penetrantes que producen un bajo contraste del objeto radiográfico. Las buenas radiografías dependen del incremento del contraste del objeto radiografiado por parte de la película. (Torres, Torres , & Montanez , 1988).

1.2.5.2.2. Sensibilidad

Es un valor relevante obtenido de la curva característica que está relacionada inversamente con el tiempo requerido para producir una densidad particular de una intensidad de radiación dada, cuan menor sea el tiempo de exposición, más rápida será la película.

En unidades absolutas, velocidad de la película es inversamente proporcional a la energía total (roentgen) de un espectro de radiación en particular (distribución de longitud de onda en una kilovoltaje dado) que produce una densidad dada en la película. Para aplicaciones más prácticas, es conveniente y eficaz para hacer frente a las velocidades relativas. En el uso de velocidades relativas, velocidades de película se expresan en términos de la velocidad de una película en particular cuya velocidad relativa se le asigna arbitrariamente un valor. Otra ventaja de usar grupos de curvas características es que la evaluación visual de velocidades relativas se puede hacer fácilmente. (ASM International, 1989).

1.2.5.3. Pantallas intensificadoras en la exposición radiográfica

Como ayuda en los parámetros de exposición radiográfica, más aun en mejorar (disminuir) el tiempo de exposición en los ensayos de radiografía industrial, se utilizan láminas como intensificadores de la radiación emitida por la fuente de compuestos como sales (CaWO_4) o metal extremadamente finas (mayoritariamente plomo). El grado de intensificación está dado por:

- La naturaleza de radiación de la fuente emisora.
- El material y espesor de la pantalla.
- El material y espesor de la probeta a ensayar.
- El tipo de película y procesamiento.

1.2.5.3.1. Pantallas de plomo

Las pantallas de plomo son las más comunes y utilizadas en la industria de radiografía de soldaduras, utiliza la propiedad de absorción del plomo ante la penetración de la radiación (energía de los fotones) y gracias a la naturaleza de longitud de onda corta de la radiación penetra fácilmente en el plomo ante otra de baja energía o energía remanente que la absorbe la pantalla.

La energía dispersa o remanente que un objeto de prueba se considera como de baja energía, comparándola con el haz que incide al realizar el ensayo al objeto, es así que la pantalla de plomo absorberá este porcentaje bajo de energía de radiación sin comprometer la radiación formadora de la imagen en la película, este efecto es conocido como filtración de radiación secundaria.

La energía de radiación secundaria proviene de la energía que la pieza no absorbe o dispersa y de la refracción de los objetos alrededor de la película, pantalla o detector (retrodispersión).

De manera práctica se utilizan dos pantallas de plomo, una sobre la película radiográfica (pantalla frontal) y otra debajo la película (pantalla posterior). La pantalla frontal suele ser más delgada, aproximadamente mide entre 0,13 o 0,25 mm (0,005 a 0,010 pulgadas). El contraste se ve afectado por la filtración excesiva, reduciendo la sensibilidad, por lo que se debe considerar un adecuado espesor de pantalla dependiendo del material que se va a ensayar, de su densidad y espesor.

En gammagrafía son muy utilizadas las pantallas de plomo y estas vienen en pares como:

- Co-60 y Cs-137 anterior 0,10 mm, posterior 0,20 mm.
- Ir-192 anterior 0,05 mm, posterior 0,10 mm.
- Tm-170 anterior 0,02 mm, posterior 0,05 mm.

Cuando una pantalla de plomo se ve excitada por rayos X o gamma, estos producen electrones por efecto fotoeléctrico y compton, el número de electrones emitidos es directamente proporcional a la energía de los fotones que pasan a través de la pieza de prueba y llega a las pantallas.

En la radiografía, los electrones emitidos exponen cristales de haluro de plata adicionales en la emulsión de la película. Después del desarrollo, la densidad de la película es mayor de lo que hubieran sido sin la acción de la intensificación por la pantalla. La intensificación no sólo aumenta la densidad fotográfica en general, por lo que requiere tiempos de

exposición más cortos para producir una densidad dada, sino que también mejora el contraste radiográfico, mejorando así la capacidad de resolver pequeños defectos. (ASM International, 1989).

1.2.5.3.2. Pantallas intensificadoras fluorescentes

Otro tipo de pantallas intensificadoras son pantallas que emiten radiación ultravioleta, azul o verde dentro del espectro electromagnético que incrementa la eficiencia de la película. Las pantallas producen luz cuando se exponen por rayos X o rayos gamma. Ciertos compuestos, como tungstato de calcio o sulfato de plomo y bario, suelen contener elementos de algún otro producto químico o de fósforo que tienen la característica de emitir luz inmediatamente después de exponerse a radiación de onda corta. Los cristales de estos productos químicos son finamente pulverizados, mezclados con un aglutinante, y revestidos en un poco de apoyo ligeramente flexible, tal como cartón o plástico para hacer una pantalla fluorescente.

Las pantallas intensificadoras fluorescentes, se utilizan comúnmente en radiografía médica, están disponibles en una variedad de velocidades. La más común son pantallas azules emisoras, que pueden caracterizarse en velocidad como muy lenta, lenta, media, media alta, alta, y súper alta. En la radiografía industrial, la pantalla más utilizada es la de velocidad media. Para un mayor efecto radiográfico, las pantallas fluorescentes se deben utilizar con una película sensible a longitudes de onda particulares de la luz emitida por la pantalla. (ASM International, 1989)

1.2.5.4. Indicadores de calidad de imagen

El objetivo de toda radiografía o gammagrafía industrial es asegurar la calidad de la imagen del material a ser radiografiado.

La sensibilidad o calidad de imagen radiográfica es un término general y cualitativo que hace referencia al tamaño del detalle más pequeño que puede verse en una radiografía o a la facilidad con que pueden detectarse las imágenes de pequeños detalles. Dicho de otra forma, es una referencia a la calidad de información contenida en la radiografía. Al considerar los problemas de la sensibilidad radiográfica, es necesario tener presente que el contraste de la película depende de la densidad, dando una mayor o menor definición de los detalles. (Torres, Torres, & Montanez, 1988).

Para asegurar la calidad técnica del proceso radiográfico industrial se realiza una comparación por diferencia de densidades provocadas por la imagen de un “indicador de calidad de imagen” (ICI), ver la figura 1.19, también referido como un penetrámetro, en la radiografía completado. Existen varios tipos principales de ICI, de composición idéntica a la del material ensayado. El de tipo alambre, el de tipo “cuña” o agujero que contiene tres agujeros de diferentes diámetros e identificados con números de plomo en sus extremo. El espesor del penetrámetro común es de 2% del espesor del material que está siendo ensayado y sus dimensiones además de otras características se basan en diferentes normas técnicas vigentes: AFNOR, ASTM, DIN, BWRA, ASME, API, etc.

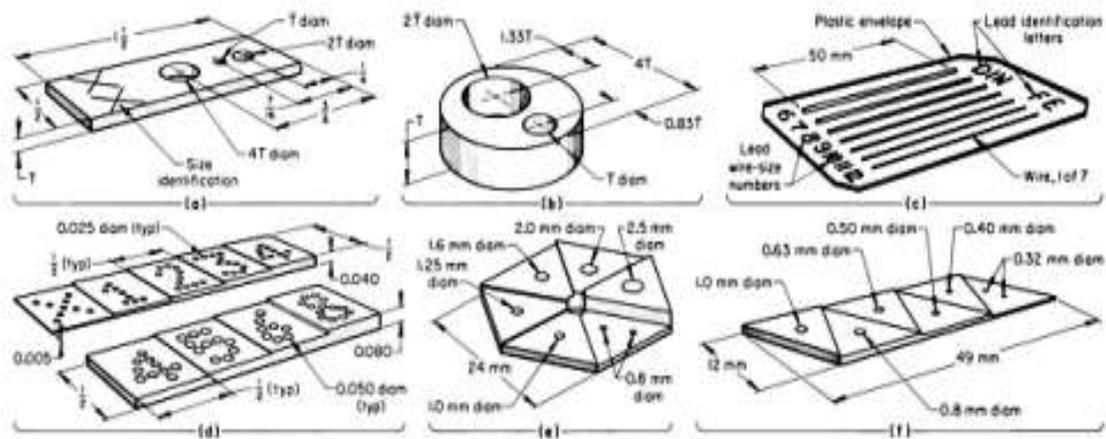


Figura 1.19. Diseños de varios penetrámetros (indicadores de calidad de imagen). (a) rectangular de tipo placa penetrámetro (estándar ASTM-ASME) para espesores de placa de 0,13 a 1,3 mm (0,005 a 0,050 pulgadas.). (b) circular de tipo placa penetrámetro (estándar ASTM-ASME) para espesores de placa de 4,6 mm (0,180 pulg.) O más. (c) de tipo alambre típico penetrámetro (norma DIN 54109). (d) paso-cuadrado, penetrámetros paso cuña utilizado por la Asociación de Investigación de soldadura británico (estándar BWRA). (e) hexagonal y (f) penetrámetros paso de cuña triangular, pasos lineales utilizados por el (norma AFNOR) Marina francesa. Dimensiones dadas en pulgadas.
(Fuente: ASM International, 1989)

1.2.5.5. Principios geométricos de formación de imagen y ensombrecimiento.

La formación de imágenes en el proceso radiográfico de un objeto opaco se observa como una sombra proyectada sobre la película al contraponerlo a un haz de luz, es así que en el proceso se utilizan rayos X y gamma que se rigen a este principio. Las relaciones geométricas (tamaño de fuente de radiación y posición del objeto entre la fuente y pantalla) influyen directamente en tres características primordiales de la sombra: el grado de ampliación, la distorsión y grado de nitidez. Como se muestra en la figura 1.20.

La imagen formada en la pantalla presenta cierta ampliación, ya que el objeto ensayado no está en contacto con la película. El grado de ampliación variará según las distancias relativas del objeto con respecto a la película y a la fuente emisora de radiación. El grado de ampliación nos indica que la relación entre el diámetro del objeto y el diámetro de la imagen posee la misma proporción que entre la distancia que separa el objeto de la fuente y la distancia que separa a la película de la fuente. (Torres, Torres , & Montanez , 1988).

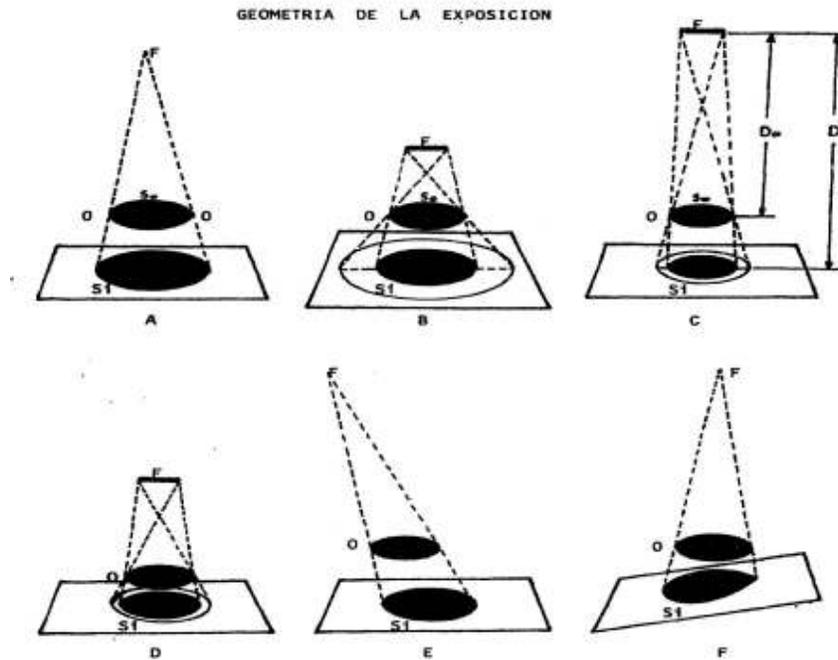


Figura 1.20. Esquema del efecto de las relaciones geométricas. (A) fuente de radiación puntual y aumento de superficie. (B, C y D) fuente de radiación finita. (E y F) variación en el ángulo provocando distorsión en la imagen. (Fuente: Torres, Torres , & Montanez , 1988)

Las dimensiones de la sombra son siempre mayores que las dimensiones correspondientes del objeto. El término matemático que determina el grado de ampliación de la imagen se expresa mediante la ecuación 1.2.

$$\frac{S_o}{S_i} = \frac{D_o}{D_i}$$

(Ec. 1.2)

1.2.5.6. Distancia fuente – película

La influencia de la distancia fuente-película es relevante en el proceso radiográfico debido a que influye en la calidad de imagen y la calidad de la radiación incidente. Al aumentar o

disminuir esta distancia afecta considerablemente la definición de las pequeñas discontinuidades, si se aumenta la distancia a la película, los detalles de la imagen se presentarían más nítidos pero el tiempo de exposición radiográfica aumentará con el cuadrado de la distancia. Expresado matemáticamente en la ecuación 1.3.

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

(Ec. 1.3)

Además se presenta la ecuación 1.4 análoga en función del tiempo.

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2}$$

(Ec. 1.4)

La distancia óptima fuente-película para irradiación de pequeñas películas está dada por la ecuación 1.5.

$$d_{op} = e\left(\frac{F}{P_{\min}} + 1\right)$$

(Ec. 1.5)

Para películas de gran dimensión y placas planas, la distancia fuente-película es:

$$d \geq 1.5 \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

(Ec. 1.6)

1.2.5.7. Procesamiento digital de imágenes

La visión o captura de imágenes tanto para un hombre como para un computador mantienen una base fundamental la cual consiste en captar la imagen e interpretarla. A pesar que el ojo humano presenta cierto grado de complejidad se podría considerar al ojo humano como una cámara de video y su retina como un sensor que es sensible a los factores que podrían interrumpir una captura. (EDMANS, 2006).

El término procesamiento digital de imágenes se reduce al almacenamiento, transmisión y representación de información, de imágenes digitales por medio de una computadora. Otro término fundamental en el estudio de este campo es el de imagen la cual se considera como una función bidimensional de intensidad de luz $f(x, y)$ donde x e y denotan

coordenadas espaciales, y el valor de f en cualquier punto (x, y) es proporcional a la intensidad de la imagen en ese punto. Una imagen digital se describe como una matriz cuyos índices de fila y columna identifican un punto en la imagen y cuyo valor coincide con el nivel de intensidad de luz en ese punto. Cada elemento de la matriz (fila, columna) se compone con un elemento en la imagen y se denomina pixel. (Laorden, 2012).

Así que el procesamiento digital de imágenes busca distinguir y mejorar los objetos de la escena fotográfica para extraer información e interpretar y tratar los datos particulares para ayudar con la percepción del usuario y satisfacer necesidades.

Ya que el campo de aplicación del procesamiento de imágenes es amplio, este suele cruzarse con áreas comunes como visión artificial o análisis de imágenes por computador. Es así que el procesado de imágenes al realizar su análisis y operaciones se obtiene como resultado otra imagen, que como consecuencia mejora los detalles. Mientras que en el análisis de imágenes por computador es un proceso en el que se obtiene detalles cuantitativos (tabla de datos, gráficas, representaciones generales de datos numéricos). La visión artificial en cambio es una pequeña rama de la inteligencia artificial donde pretende que el ordenador mediante cámaras, lentes y sensores conjuntamente con programación específica analice y entienda las variables de imágenes y objetos.

1.2.5.8. Proceso de formación de imágenes y representación

El término de imagen, se puede considerar como una representación visual en función de la intensidad de luz de un objeto, debido a una fuente de energía o foco. En el proceso de formación intervienen cuatro elementos, como se muestra en la figura 1.21:

Fuentes de energía: pueden ser de ondas electromagnéticas, haces de partículas atómicas o subatómicas, de naturaleza de onda corta, ultrasónicas, acústica, etc.

- El objetivo u objeto a ser capturado.
- El sistema óptico de captura (cámara).
- El resultado de la transformación de señales (imagen).

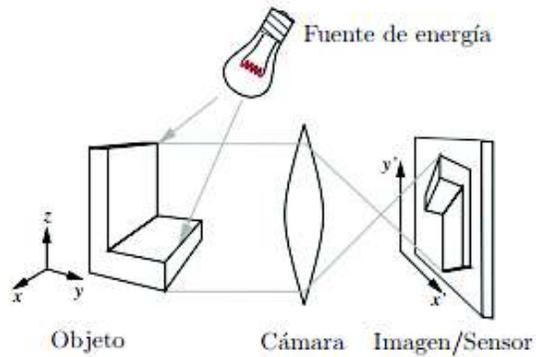


Figura 1.21. Formación de imágenes.
(Fuente: Alvarado, 2012)

La naturaleza básica de una imagen está dada por $f(x,y)^2$, y esta se forma de dos componentes: la cantidad de luz incidente que procede de la fuente de la escena contemplada; y la cantidad de luz reflejada por los objetos de la escena. Dichas componentes reciben el nombre de iluminación y reflectancia, notándose $i(x,y)$ y $r(x,y)$ respectivamente. La imagen digital puede ser representada por una matriz f de dimensiones $N \times M$ dada en la ecuación 1.7:

$$f = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \dots & f(1,M) \\ f(2,1) & f(2,2) & \dots & f(2,M) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f(N,1) & f(N,2) & \dots & f(N,M) \end{bmatrix}$$

(Ec. 1.7)

Donde cada elemento de la matriz representa un pixel y este a su vez da la intensidad de la imagen en ese punto. (EDMANS, 2006)

1.2.5.9. La cuantificación y el efecto del muestreo

La pérdida de información presente en una imagen cuando se digitaliza por cualquier sistema depende de la capacidad de relacionar la naturaleza discreta de los pixeles y que el rango de valores de intensidad luminosa se ven limitados.

1.2.5.9.1. Efecto del muestreo

Muestreo es la conversión de una señal en una secuencia numérica. El teorema de muestreo señala que la reconstrucción (aproximadamente) exacta de una señal continua

en el tiempo en banda base a partir de sus muestras, es posible si la señal es limitada en banda y la frecuencia de muestreo es mayor que dos veces el ancho de banda de la señal. El teorema de muestreo es comúnmente llamado teorema de muestreo de Shannon y también conocido como teorema de muestreo de Nyquist-Shannon-Kotelnikov, Whittaker-Shannon-Kotelnikov, Whittaker-Nyquist, Kotelnikov-Shannon, WKS, etc. (Escalante, 2006)

En otras palabras es una subdivisión de una imagen analógica en porciones de patrones (triángulos, cuadrados, rectángulos), una fotografía al realizar el muestreo se reduce su resolución espacial donde la pérdida de información viene acompañada con la pérdida de resolución, presente en forma de ruido y visualizada en la imagen como pequeños patrones rectangulares.

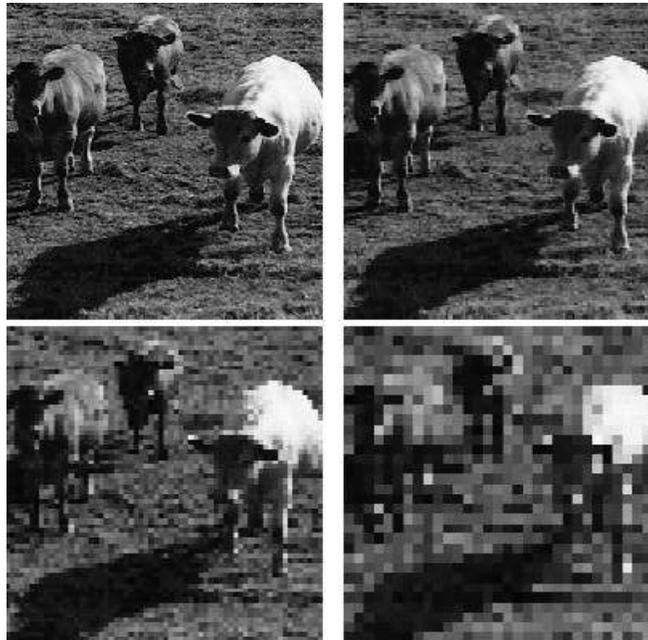


Figura 1.22. Muestreo de imágenes a 256x256, 128x128, 64x64 y 32x32.
(Fuente: EDMANS, 2006)

Entonces se observa que la calidad de la imagen depende tanto del número de muestras como de la discretización por niveles de gris utilizados en el muestreo, observando una densidad de píxeles inadecuada como se indica en la figura 1.22.

Frecuentemente las imágenes en escala de grises se representan como matrices de números reales representando las intensidades relativas de los píxeles (elementos de la imagen) localizados en las intersecciones de filas y columnas. Las imágenes a color consisten de una composición de tres imágenes separadas en escala de grises, cada una representa los tres colores primarios; rojo, verde y azul; comúnmente conocido como RGB.

Otros espacios de color que usan 3 vectores para colores son HSV, LAB, XYZ. Algunos espacios de color como el CMYK (cyan, magenta, yellow, black) son usados para procesos de impresión. (Escalante, 2006).

Cualquier imagen puede ser continua tanto en amplitud como a un sistema de coordenadas (x, y), es así que la cuantización es el proceso de digitalizar las amplitudes de una imagen, diferenciándolo del proceso de muestreo que se centra en la digitalización de las coordenadas (x, y).

1.2.5.9.2. Efecto de la cuantificación

Es un efecto de discretización de color y se presenta debido a la imposibilidad de definir un rango de valores en la medida de intensidad y brillo de pixeles, que muchas veces se desearía infinito. Actualmente se llega a 10 bits de información en el muestreo, así 8 bits equivale a 256 niveles discretos de gris para así dar valor a esta medida de luminiscencia. Ver figura 1.23.



Figura 1.23. Efecto de la cuantificación. De izquierda a derecha: 8 y 1 bit.
(Fuente: EDMANS, 2006)

1.2.5.10. Resolución de una imagen

Es el término que define el grado de calidad o detalle de una imagen digital, así al considerar y mantener el tamaño del sensor de la cámara o al tamaño de una fotografía (cantidad de información) se mantendrá de igual manera la calidad de imagen al modificar su tamaño.

El término de resolución está ligado a la cantidad de píxeles que existen en una determinada porción de imagen, a mayor cantidad de píxeles, mayor densidad y mayor resolución, definiendo así al píxel como la unidad más pequeña de la imagen de mapa de bits y su tono característico está dado por la combinación en porciones de los tres colores básicos RGB (Green, Red, Blue). Otra característica común del píxel es su forma cuadrada y su profundidad de color.

La resolución se mide en pixel per inch (ppi) o píxeles por pulgada (ppp) por sus siglas en inglés y español respectivamente; como claros ejemplos de esta medida se tiene los siguientes ejemplos:

- Pantalla del ordenador: 72 ppp.
- Prensa en papel: 90-360 ppp.
- Impresoras: 300-600 ppp.

Resolución por tamaño: en esta medida se consideran los píxeles por alto y ancho, donde una medida habitual es con la que trabajan los monitores de tamaño medio (15 a 17 pulgadas) que es 800x600 píxeles.

Resolución por densidad: se expresa en ppp o dpp (puntos por pulgada cuadrada), considerando cuantos píxeles contiene una pulgada cuadrada. Un ejemplo claro es la resolución de una cámara fotográfica que equivale a mayor de 800 dpp (800x800 píxeles en una pulgada cuadrada).

1.2.6. Escala RGB

Existen dos tipos de imágenes claramente diferenciables, el mapa de bits que como su nombre lo indica es un conjunto de píxeles donde cada uno de ellos posee características únicas como color y textura, viene representada por una coordenada (x, y) dentro de una matriz de bits y el conjunto de estos píxeles crea una imagen, su resolución viene dada por el número de píxeles del que se conforma, estas se pueden obtener a través de cámaras digitales, escáneres, cámaras de video, etc.

El otro tipo se denomina imágenes vectoriales, diferenciado del primero por su composición ya que este se conforma de vectores (líneas, curvas y elementos geométricos planos) construyendo imágenes complejas, una ventaja clara es que estos vectores se pueden seleccionar y modificar su tamaño individualmente sin provocar la pérdida de calidad;

debido a que si se mueve o modifica se lo hará respecto a su antigua referencia manteniendo el vector en sí.

De igual manera el tamaño de las imágenes del mapa de bits es mayor que de los gráficos vectoriales. El mapa de bits, al componerse de puntos, precisa de una información y características de color (tono, brillo, saturación, luminosidad, et.) en función de las dimensiones y resolución de la imagen, ese tamaño variará y crecerá si aumentan dichas referencias. Por el contrario una imagen vectorial solo precisa de la información relativa a cada uno de los vectores u objetos que la forman. Esos objetos presentan identidad independiente, se definen de forma matemática y contienen información de su color, forma, contorno y tamaño. A pesar de esas propiedades, su configuración matemática hace que el tamaño final sea notablemente menor al de mapa de bits. (VÉRTICE, 2008)

1.2.6.1. Modelos de Color

Los modelos de color son útiles para caracterizar una imagen, y estos al igual que las imágenes de escala de grises también se rigen ante los términos de muestreo y cuantificación. Un modelo se considera como el detalle del sistema coordinado, donde cada punto es un color diferente; los modelos de color pueden ser los siguientes:

- **Modelo mapa de bits o monocromática:** se representa por dos tonos puros (blanco y negro). Presenta 1 BIT por cada pixel obteniendo tan solo dos colores.
- **Modelo color indexado:** presenta un total de 8 bits por pixel, la cual es su máxima profundidad de color. El máximo número de colores es $2^8 = 256$.
- **Modelo escala de grises:** como su nombre indica ofrece colores monocromáticos y a diferencia del mapa de bits, este ofrece tonos entre el blanco y el negro que en su totalidad son 256.
- **Modelo de color CMYK:** presenta una imagen cuatricromática formada por 4 colores para impresión primarios: Cyan, Magenta, Amarillo y negro. Cada canal necesita 8 bits, con lo que una imagen constara de 32 bits de profundidad de color. Este modelo se utiliza únicamente en sistemas de impresión industrial y en publicaciones de alta calidad, el resto de digitalizadores comerciales trabajan con modelos RGB.
- **Modelo de color LAB:** presenta tres canales de color, uno de Luminosidad (L) y dos canales cromáticos, A (que oscila entre verde y rojo) y B (que oscila entre azul y amarillo). Cada uno de los tres canales contiene hasta 256 tonalidades diferentes. El modelo LAB es independiente del dispositivo, es decir, crea colores coherentes

con independencia de los dispositivos conectados, como monitores, impresoras u ordenadores utilizados para crear o reproducir una imagen. (VÉRTICE, 2008).

- **Modelo de color YIQ:** este modelo presenta tres canales, uno de luminancia (Y) que mide la energía luminosa que un tercero observa de una fuente, en televisiones a blanco y negro este canal proveía toda la información de color y dos canales de información de color (I, Q). cabe recalcar que este modelo se usaba en televisiones comerciales.
- **Modelo de color HSI:** presenta tres canales, un canal de tono-color (H), de intensidad (I), y de saturación (S) que ayuda a mejora el procesamiento de imágenes de color y es más eficiente que modelos RGB debido a que no presenta perdidas de información entre canales de color.

1.2.6.2. Modelo RGB

Este modelo o código RGB (rojo, verde, azul) fue desarrollado por el CIE, Commission Internationale de l'Eclairage (Comisión Internacional de Iluminación).

Este modelo presenta una codificación de un byte por cada componente de color, con una intensidad de rojo de 256 que corresponde a (2^8), y de igual manera para las intensidades de verde y azul (como se indica en la figura 1.24). Es así que el modelo tendría 16777216 posibilidades de colores teóricos distintos uno de otros, muchos más que los que el ojo humano puede distinguir (un aproximado 2 millones). Esta posibilidad es teórica debido a que el valor se ve afectado dependiendo del dispositivo con el que se realice la visualización.

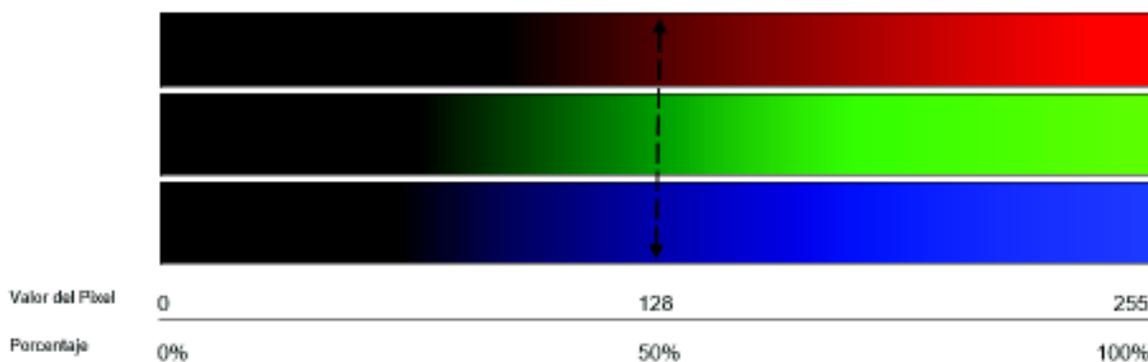


Figura 1.24. Variación de cada uno de los componentes de la escala RGB.
(Fuente: Autores)

De igual manera se puede representar de forma hexadecimal, con un rango que va desde 00 a FF.

Expresando el código de la siguiente manera: **#RRGGBB**, y cada elemento del valor de 2 cifras pertenece al rango de cada uno de los 3 canales de color, obteniendo al final el valor que representa a cada combinación de color. Expresando a continuación algunas de las representaciones de color:

- Negro (ausencia de color) se representa: #000000.
- Blanco (mezcla de todos los colores) se representa: #FFFFFF.
- Rojo (en su totalidad un tono) se representa: #FF0000.
- Verde se representa: #00FF00.
- Azul se representa: #0000FF.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan las estrategias de programación que han permitido el desarrollo del software, así como la interpretación de cada función que se desarrolló dentro del marco de la programación.

2.1. Herramientas de programación para creación del software

Para el desarrollo del software se considera cada una de las ventajas de programación como son modificabilidad, fiabilidad, desarrollo efectivo con una inversión de tiempo eficiente, mantenibilidad del programa, así como la creación de una interfaz gráfica con la ayuda de la programación orientada a objetos.

Para el caso de este proyecto, se presenta Visual Basic 6.0, el cual cumple con los requerimientos nombrados en el párrafo anterior. Además permite la creación de múltiples ventanas, lo cual es beneficioso para el desarrollo de varias funciones, incluyendo la realización del empaquetado del programa, el mismo que puede ser instalado en cualquier sistema operativo de Windows.

2.1.1. Desarrollo del software

2.1.1.1. Estructura del software

Generalmente el proceso de soldadura viene acompañado de varias variables que influyen en la calidad y el resultado final del cordón de soldadura, que debido a un mal manejo o variación de las mismas provoca la aparición de discontinuidades comunes a la soldadura, como pueden ser: porosidades, quemones, mordeduras, inclusiones de escoria, defectos de penetración y grietas.

Es por ello que el uso de los ensayos no destructivos; en específico, radiografía industrial requiere de un método adecuado para la interpretación de los defectos encontrados en cordones de soldadura, proponiendo así una metodología diferente a la convencional y que consta con la implementación de los siguientes niveles de análisis para defectos utilizados en el software.

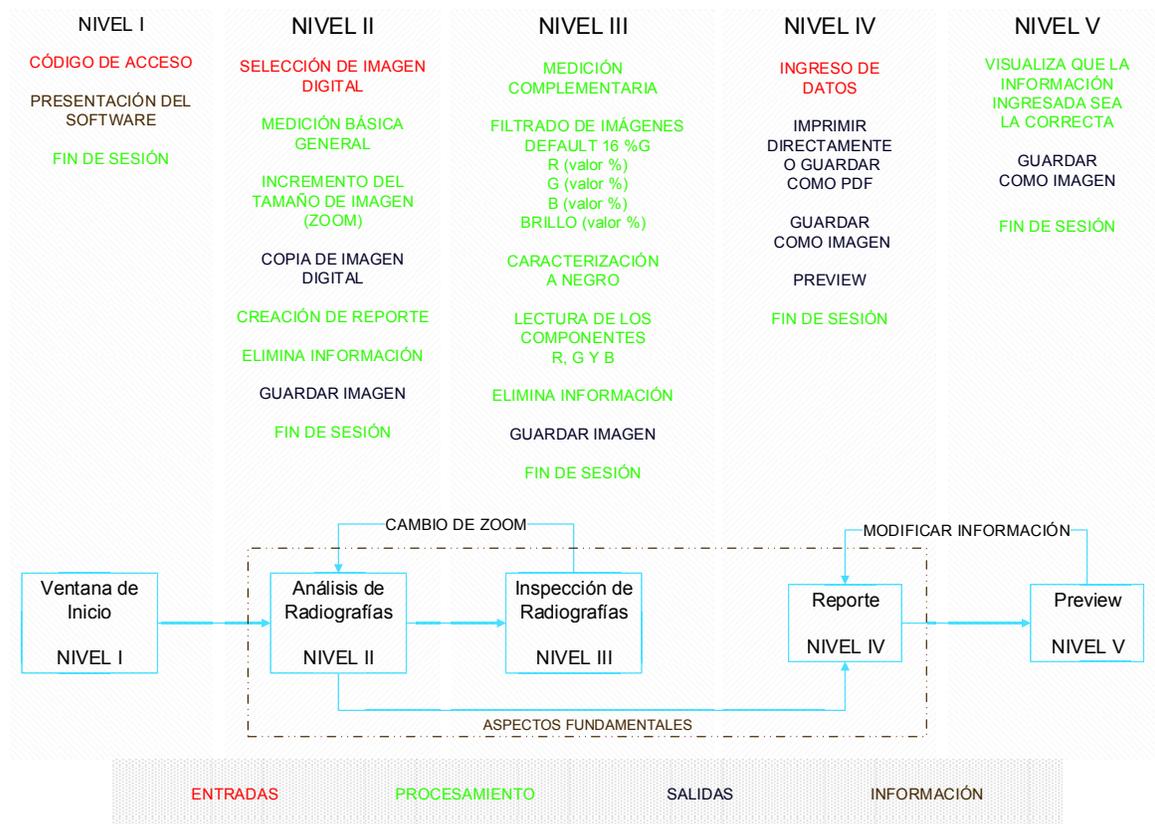


Figura 2.1. Estructura del software.
(Fuente: Autores)

El software presenta una estructura orientada a tres aspectos fundamentales: análisis, inspección y reporte como se muestra en la figura 2.1. Además de observar cinco niveles de uso que comienza con la “Ventana de inicio” seguido por la ventana de “Análisis de radiografías”, luego por “Inspección de radiografías”, continuando con la ventana de “Reporte” y finalmente una ventana de “Preview”.

2.1.1.1.1. Ventana de inicio (Nivel I)

Esta es la ventana que inicia al arrancar el NIVEL I y que sirve de presentación, la cual es la responsable de permitir la apertura de la siguiente ventana, debido a que posee una clave de acceso que se genera aleatoriamente cada vez que se ejecuta, como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Ventana de inicio.
(Fuente: Autores)

Siendo así, que la mala interpretación de la clave de activación genera el bloqueo del programa hasta poder ingresar correctamente su contraseña.

Las zonas y ubicación de las características que poseen la ventana de inicio se detallan a continuación:

- Nombre de la institución y del programa.
- Logotipo de la institución y logotipo de la facultad.
- Porcentaje de carga la cual avanza desde cero hasta completar el 100% de carga.
- Botón “CONTINUAR”, el mismo que permite ingresar al NIVEL II una vez tipada correctamente la clave de acceso.
- Botón “SALIR”, el mismo que permite terminar la sesión.
- El “CÓDIGO DE ACCESO”, se genera aleatoriamente una vez ejecutado completamente el NIVEL I.

2.1.1.1.2. Análisis de radiografías (Nivel II)

La figura 2.3 muestra la ventana responsable de cargar la imagen a ser analizada y de ingresar las dimensiones de la película radiográfica. Además posee una serie de botones (comandos) y una opción de incremento del tamaño de imagen (zoom).

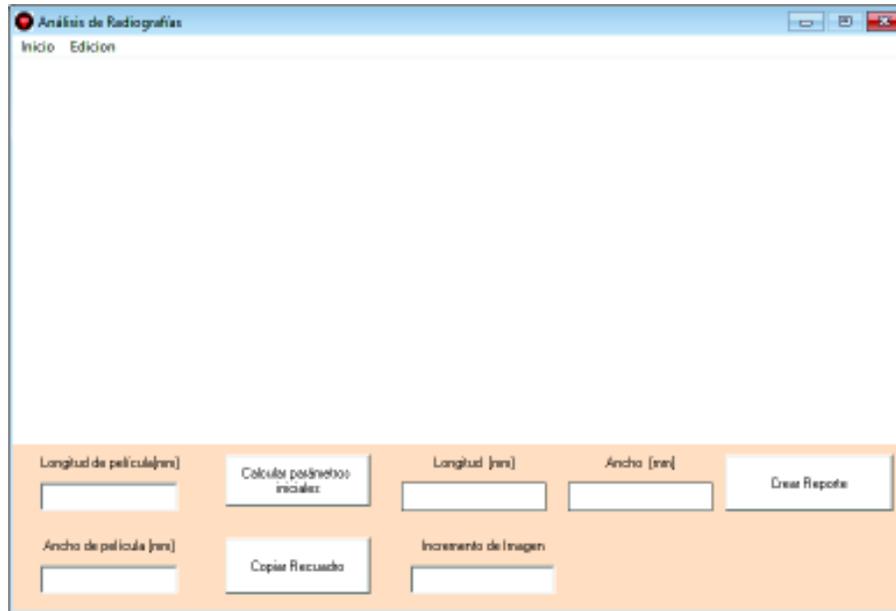


Figura 2.3. Ventana de análisis de radiografías.
(Fuente: Autores)

A continuación se detalla las funciones pertenecientes al Nivel II:

- **Calcular parámetros iniciales:** este botón permite el cálculo de las dimensiones de las *indicaciones* que se encuentren en la imagen, sin realizar ningún aumento sobre ella (zoom). Entregando resultados de longitud (X) y ancho (Y) de la *indicación*.
 - **Cálculo de la longitud (x):** básicamente realiza el conteo de cada uno de los pixeles de la imagen ingresada y los pixeles que se encuentran dentro del recuadro que enmarca a la *indicación*, donde posteriormente se realiza una relación entre ambos valores, para ser multiplicados por la longitud de la película radiográfica como lo indica la ecuación 2.1.

$$X = \frac{\sum_0^n Ph}{\sum_0^{n-1} Pth} \times Lp$$

(Ec. 2.1)

- **Cálculo del ancho (Y):** es cálculo sigue la misma lógica desarrollada en el cálculo de la longitud, como lo indica la ecuación 2.2.

$$Y = \frac{\sum_0^n P_v}{\sum_0^{n-1} P_{tv}} x W_p$$

(Ec. 2.2)

- **Copiar Recuadro:** este botón permite la apertura del NIVEL III (Inspección de radiografías, que se indica en la figura 2.4), el cual trabaja conjuntamente con el cuadro de “incremento de imagen”. Creando así, una copia de la sección enmarcada.
- **Crear Reporte:** permite la apertura del NIVEL IV, el cual establece la creación y desarrollo de un reporte sobre el análisis e inspección de la imagen radiográfica. Ver figura 2.5.

Además de los botones, el NIVEL II cuenta con una barra superior de herramientas que se describe a continuación:

- **Inicio**
 - **Insertar_Imagen:** es la conexión entre el programa y Windows, para buscar imágenes en formato jpg.
 - **Guardar:** permite guardar la imagen en dimensiones 770x335 pixeles.
 - **Salir:** es la opción para terminar la sesión del NIVEL II.
- **Edición**
 - **Limpiar:** elimina cada una de los datos que hayan sido ingresados en este nivel.
 - **Copiar_imagen:** permite el ingreso al NIVEL III del programa, realizando una copia completa de la imagen ingresada en el NIVEL II.

2.1.1.1.3. Inspección de radiografías (Nivel III)

Se define esta ventana como el punto central del software ya que permite realizar la inspección de la radiografía a un nivel más profundo.

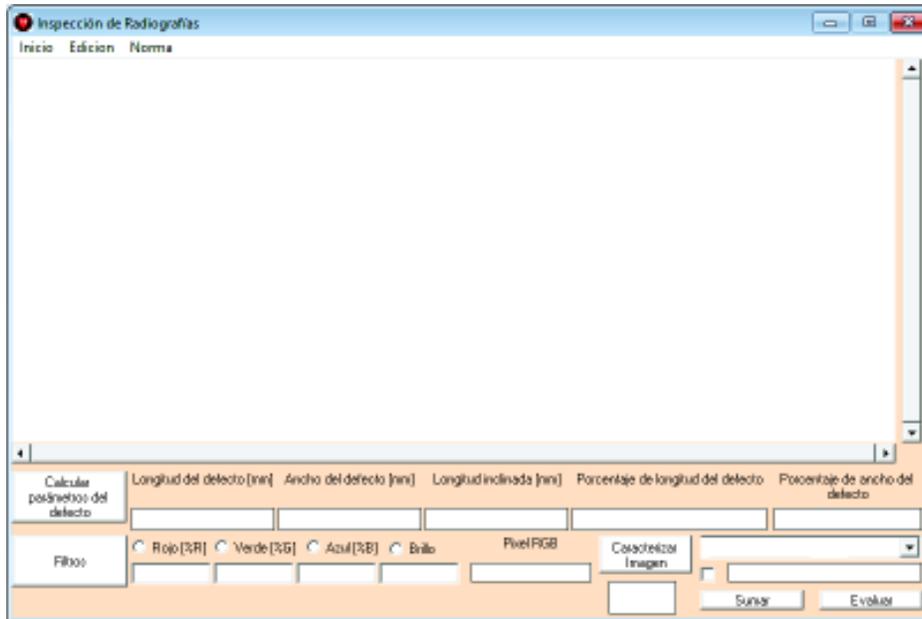


Figura 2.4. Ventana de inspección de radiografías.
(Fuente: Autores)

Además posee una gran variedad de comandos, los cuales ayudan a la interpretación y medición de las *indicaciones* (defectos o discontinuidades), los cuales se pueden observar en la figura 2.4 y descritas a continuación:

- **Calcular parámetros del defecto:** este botón permite el cálculo de las dimensiones de las *indicaciones* que se encuentren en la imagen o parte de ella, la misma que proviene del NIVEL II, sin o con incremento de imagen (zoom). Entregando así resultados de longitud, ancho, longitud inclinada, porcentaje de longitud y ancho del defecto.

- o **Cálculo de la longitud:** se rige por la ecuación 2.1.
- o **Cálculo del ancho:** se rige por la ecuación 2.2.
- o **Cálculo de la longitud inclinada:** este tipo de medida se plantea debido a que no todas las *indicaciones* (defectos o discontinuidades) son completamente rectas, lográndose apreciar en varios casos una forma inclinada.

Es por ello que su interpretación se describe en la ecuación 2.3.

$$Li = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

(Ec. 2.3)

- o **Porcentaje de longitud:** se rige esta medida de acuerdo a la ecuación 2.4.

$$Pl = \frac{X}{Lp} \times 100\%$$

(Ec. 2.4)

- **Porcentaje de ancho:** este tipo de medida se plantea como referencia de cálculos complementarios, cuyo resultado es descrito por la ecuación 2.5.

$$Pa = \frac{Y}{Wp} \times 100\%$$

(Ec. 2.5)

- **Filtros**

- **Rojo:** esta opción realiza un barrido de lectura sobre toda la imagen y extrae solamente el color rojo de cada pixel y lo imprime nuevamente creando una nueva imagen de diferentes tonalidades del color rojo en un rango de 0 a 255, además debajo de esta opción se encuentra un “textbox” el cual permite que el valor original del pixel rojo aumente su valor de luminosidad de manera porcentual desde el valor del pixel original en escala RGB (0%) hasta llegar al pixel de valor 255 (x%). Logrando así que las *indicaciones* en los defectos sean susceptibles para al ojo humano.
 - **Verde y Azul:** estas opciones realizan la misma operación que la del filtro rojo, para lo cual cada opción extrae su color respectivamente.
 - **Brillo:** aumenta porcentualmente el mismo valor para cada uno de los componentes de la escala RGB, logrando así que la imagen sea más clara.
- **Pixel RGB:** mediante la lectura del “Pixel, en escala RGB” permite conocer cuál es el valor de cada componente Rojo (R), Verde (G) y Azul (B) de una área en específico.
 - **Caracterizar Imagen:** permite conocer la caracterización a negro de la imagen en un rango de 0 a 127.
 - **Sumar:** permite la suma individual de la longitud (Y) de las *indicaciones* “Poros – Nidos (CP)” presentes en una radiografía.
 - **Evaluar:** permite la comparación automática de la *indicación* con la norma.

Como complemento, el NIVEL III cuenta con una barra superior de herramientas que se describe a continuación:

- **Inicio**
 - o **Guardar:** permite guardar la imagen en dimensiones 770x335 pixeles.
 - o **Salir:** es la opción para terminar la sesión del NIVEL III.

- **Edición**
 - o **Limpiar:** elimina cada una de los datos que hayan sido ingresados en este nivel.

- **Norma**
 - o **API 1104:** activa la opción de comparación de la *indicación* presente en la radiografía con lo establecido por la norma, entregando resultados de aprobación o rechazo.

2.1.1.1.4. Reporte (Nivel IV)

Esta ventana, ver la figura 2.5, permite crear un reporte del resultado obtenido luego de haber realizado el análisis e interpretación de la radiografía, logrando así evidenciar su aceptación o rechazo bajo alguna norma usada como referencia.



Figura 2.5. Ventana de reporte.
(Fuente: Autores)

Como complemento, el NIVEL IV cuenta con una barra superior de herramientas con diversas funciones que se describe a continuación:

- **Inicio**

- **Insertar_Imagen:** permite incluir la imagen analizada, con el fin de mejorar la presentación del reporte.
- **Imprimir_PDF:** permite imprimir o guardar el documento en formato pdf.
- **Guardar_como_Imagen:** permite guardar el documento en formato jpg.
- **Preview:** permite la apertura del último nivel (NIVEL V).
- **Salir:** es la opción para terminar la sesión del NIVEL IV.

2.1.1.1.5. Preview (Nivel V)

Esta es la ventana final, la cual genera una vista previa de toda la información recopilada durante el análisis e inspección que se realiza a la placa radiográfica. Ver figura 2.6.

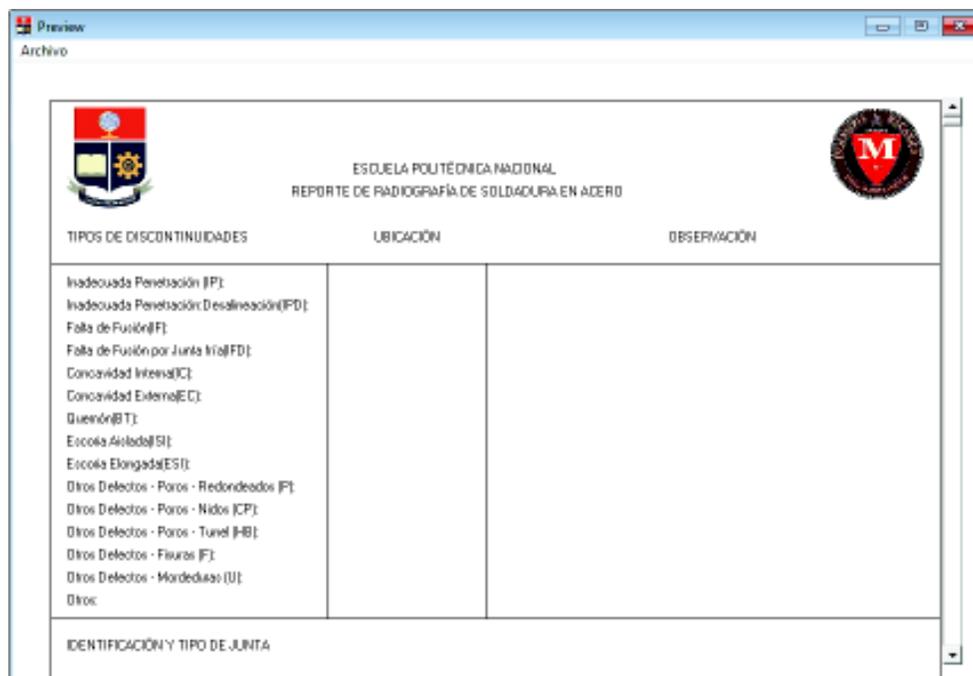


Figura 2.6. Ventana de preview.
(Fuente: Autores)

Como último complemento de la ventana del NIVEL V, presenta dos opciones que otorga facilidades al usuario, las mismas que se indican a continuación:

- **Inicio**
 - o **Guardar:** permite guardar el documento en formato jpg.
 - o **Salir:** es la opción para terminar la sesión del NIVEL V.

2.2. Análisis e inspección de imágenes radiográficas

2.2.1. Banco de placas radiográficas

Al realizar la toma de radiografías industriales nos aseguramos claramente de encontrar *indicaciones* no solo superficiales, sino también sub superficiales y volumétricas, teniendo una ventaja de crear un registro permanente, como los son las películas radiográficas, las cuales plasman las *indicaciones* encontradas. Pero el tiempo genera una desventaja importante sobre las películas radiográficas provocando el deterioro de las mismas.

Siendo así, una vez comprendido el problema, se genera una base digitalizada de placas radiográficas.

Para este caso de estudio la empresa ENDE Cía. Ltda., proporcionó un registro físico de películas radiográficas realizadas a tuberías para ser utilizadas en el presente proyecto. Las mismas que se digitalizaron en el laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional.

La base digitalizada de placas radiográficas se puede apreciar en el Anexo 1.

2.2.2. Ejecución del programa Watching Defects 1.0 (WD 1.0)

Para evaluar el correcto funcionamiento de los niveles del programa se plantea el análisis de dos imágenes radiográficas referenciales que cubren los posibles defectos más comunes.

2.2.2.1. Planteamiento del problema para validar el programa WD 1.0

Del ANEXO 1 se selecciona la Placa N° 6 y la Placa N° 8, las mismas que presentan *indicaciones* referenciales para el caso de estudio. Como se describe anteriormente en la estructura del programa.

Empezando con el análisis de la Placa N° 6 desde el NIVEL II, ya que en el NIVEL 1 se tipio correctamente el código de acceso.

2.2.2.2. Ejecución del Nivel II

Se empieza ingresando la imagen de la Placa N° 6 de dimensiones 190x80mm, como se muestra en la figura 2.7. Debido a que las placas radiográficas son provenientes de tuberías se procede a seleccionar la norma API 1104 para su respectivo análisis.

Una vez realizado el análisis de la figura 2.7 en base a la norma API 1104, se obtiene como resultado la *indicación* de POROSIDAD CLUSTER, cuya referencia a la norma API 1104 se encuentra en la figura 2.8. Además la figura 2.9 muestra el encuadre de las *indicaciones* encontradas.

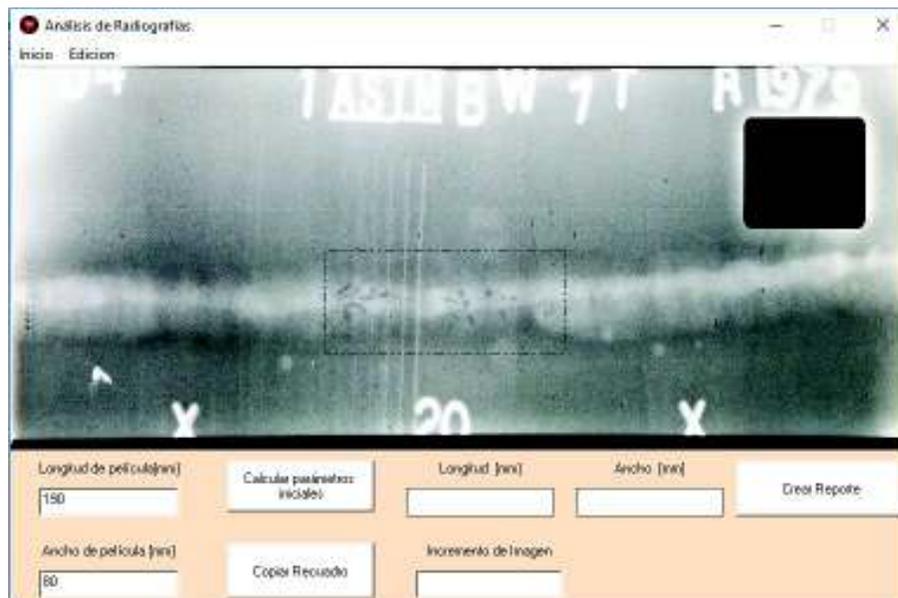


Figura 2.7. Análisis Nivel II de la Placa N° 6.
(Fuente: Autores)

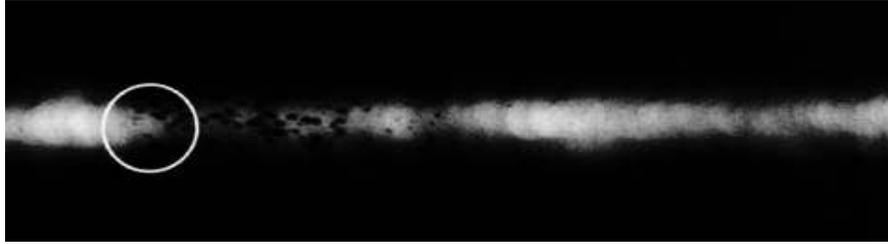


Figura 2.8. Porosidad clúster.
(Fuente: GE Inspection Technologies, 2006)

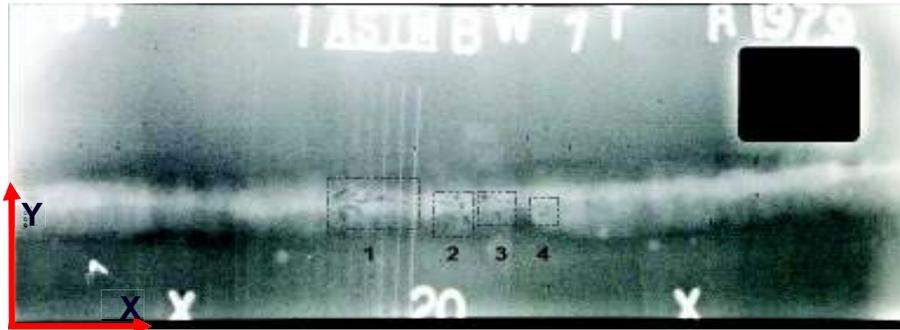


Figura 2.9. Inspección visual de la Placa N° 6.
(Fuente: Autores)

Ahora se procede a realizar la medición básica general del NIVEL II, referente a cada encuadre.

- **Encuadre 1:** X= 17,76; Y= 8,59
- **Encuadre 2:** X= 6,90; Y= 8,83
- **Encuadre 3:** X= 6,66; Y= 5,97
- **Encuadre 4:** X= 2,96; Y= 3,49

Donde la sumatoria de la longitud en X es 34,28.

El siguiente paso es analizar la imagen de la Placa N° 8 de dimensiones 170x80mm, como se muestra en la figura 2.10.

De igual manera por tratarse de una imagen radiográfica sobre tuberías se usa la norma API 1104.

Una vez realizado el análisis de la figura 2.10 se obtiene como resultado las siguientes *indicaciones*, cuya referencia se muestra en la figura 2.11:

- Encuadre 1, representa una falta de penetración.
- Encuadre 2, representa una fisura transversal.

La figura 2.12 muestra el encuadre de las *indicaciones* encontradas.

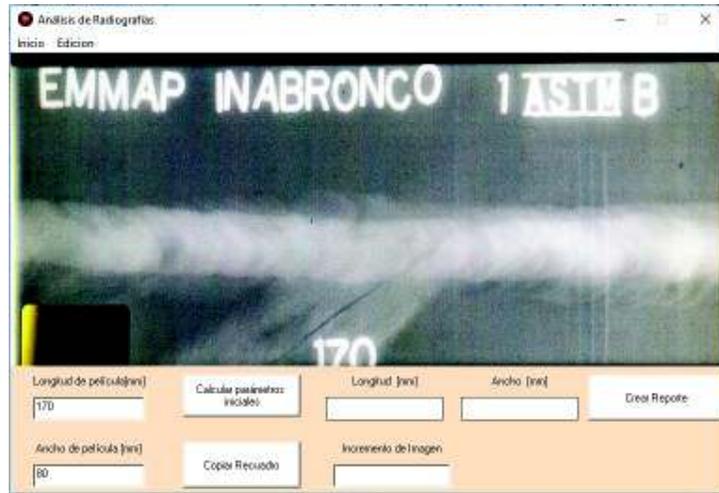


Figura 2.10. Análisis Nivel II de la Placa N° 8.
(Fuente: Autores)

(a)



(b)

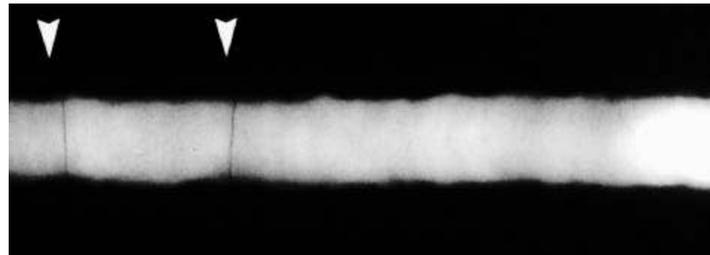


Figura 2.11. (a) Penetración inadecuada (b) Grieta transversal.
(Fuente: GE Inspection Technologies, 2006)



Figura 2.12. Inspección visual de la Placa N° 8.
(Fuente: Autores)

Nuevamente se procede a realizar la medición básica general del NIVEL II, referente a cada encuadre.

- **Encuadre 1:** $Li = 36,60$.
- **Encuadre 2:** se trata de una fisura transversal, no necesita medición de acuerdo a la norma de evaluación, por ello se filtra la imagen para tener una mejor apreciación de la *indicación*.

2.2.2.3. Ejecución del Nivel III

En este nivel de la estructura del software se presentan los principales manejos (modificaciones) que se pueden realizar a la imagen radiográfica, dentro de los cuales consta la medición complementaria, el filtrado de imágenes, aumento de brillo, caracterización a negro, entre otros, que permite mejorar súbitamente la apreciación y medición que el usuario tendrá de la imagen, en comparación con una realizada convencionalmente.

Desde este punto en adelante se recomienda observar las imágenes digitales del archivo, para obtener una mejor apreciación de la aplicación de filtros, aplicación del zoom, análisis e interpretación de imágenes radiográficas; debido que la mayoría de impresoras utilizan un tóner con una combinación del modelo de color CMYK y para el análisis radiográfico se aplicó a las imágenes filtros RGB, existiendo así presencia de opacidad y distorsión en los detalles obtenidos en la impresión de imágenes del trabajo realizado.

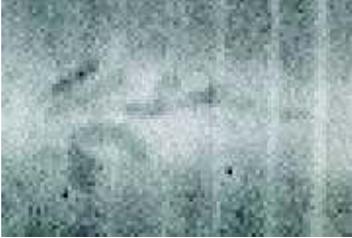
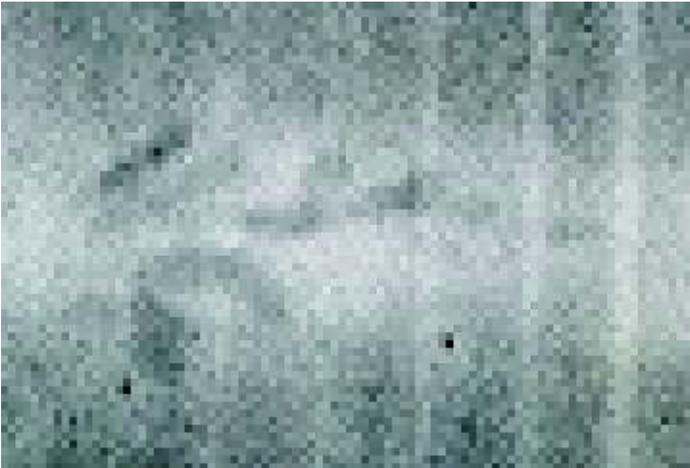
2.2.2.3.1. Manejo de la imagen radiográfica

El ojo es más sensible a las variaciones de tono en zonas iluminadas que en zonas oscuras, es decir, que cuanto más luminosas sean las zonas de la escala de color, más percepción del color tendrá el ojo. Es por ello que la impresión a blanco y negro se usa la escala a grises. (Cavegraf, 2015)

Para el presente proyecto se toma la descripción del párrafo anterior, considerando el 50 % de la escala RGB que pertenece al color gris y por ende a los colores rojo, verde y azul con la mayor luminosidad para una mejor percepción del ojo humano. Debido a que los valores se hallan en los límites y son muy saturados. Ver la figura 1.24

La primera parte involucra la inspección del encuadre uno de la Placa N° 6, descrito en la figura 2.9, para ello se estima el incremento de imagen idóneo, el mismo que no distorsione demasiado la calidad de la imagen y pueda notarse con mayor claridad la *indicación*, como lo muestra la tabla 2.1. El criterio de aceptación será únicamente la imagen que mejor se ajuste al evaluador, logrando así para nuestro caso la selección de la imagen ENCUADRE 1 – X3.

Tabla 2.1. Selección del incremento de tamaño de imagen del encuadre 1.

Incremento de imagen	Encuadre 1
X1	
X2	
X3	
X4	

(Fuente: Autores)

Como siguiente paso se tiene la selección del filtro idóneo, para ello se toma un punto específico, con la ayuda del lector RGB, dentro de la imagen donde se encuentre el defecto cuyo valor RGB sea mayor a 128 (50%). El criterio para usar este valor es debido a que el punto encontrado dentro del defecto no desaparezca ni se mezcle con el medio que lo rodea, ya que al aumentar el valor porcentual del filtro esté empezará a tomar valores muy altos que reflejen un color muy claro provocando que el defecto pierda calidad al momento de ser analizado. Este análisis se lo muestra con mayor profundidad en el Anexo 3.

La tabla 2.2 muestra la comparación de los componentes R, G y B de la escala en un punto fijo del encuadre 1, de la Placa N°6. Además al valor original en cada componente se le asocia el 0% de luminosidad, cuyo valor de luminosidad es incrementado porcentualmente hasta que cada componente alcance individualmente su máximo valor de la escala. Siendo este valor de 255.

Tabla 2.2. Lectura de un pixel de los tres valores RGB.

Placa N°6 - Rx3 Encuadre1		Placa N°6 - Gx3 Encuadre1		Placa N°6 - Bx3 Encuadre1	
% de luminosidad	Pixel R	% de luminosidad	Pixel G	% de luminosidad	Pixel B
0	168	0	169	0	171
5	180	5	181	5	183
10	193	10	194	10	196
15	206	15	207	15	209
20	219	20	220	20	222
30	244	30	245	30	247
35	255	34	255	33	255

(Fuente: Autores)

Para entendimiento de la función que desempeña la luminosidad dentro de una imagen se selecciona de la tabla 2.2 la “Placa N°6 - Gx3 – Encuadre 1” y la imagen “ENCUADRE 1 – X3” para mostrar en la figura 2.13. En un punto fijo “P” del encuadre 1, el cambio porcentual de luminosidad con el cambio del valor original de la componente G desde RGB (0,169,0) hasta que alcance el valor máximo de RGB (0,255,0).

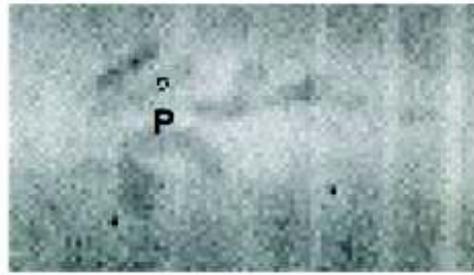


Imagen original
RGB (168,169,171)

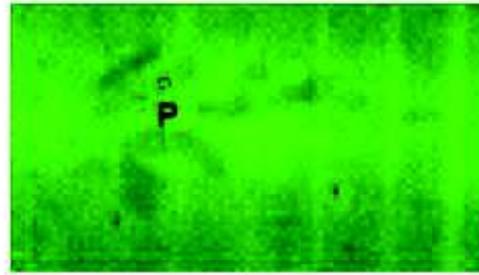


Imagen con luminosidad al 0%
RGB (0,169,0)

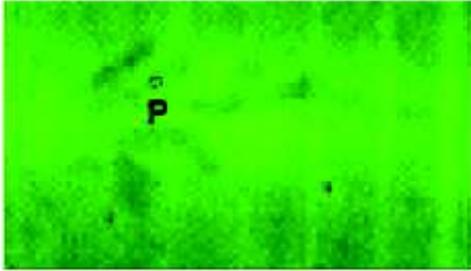


Imagen con luminosidad al 5%
RGB (0,181,0)

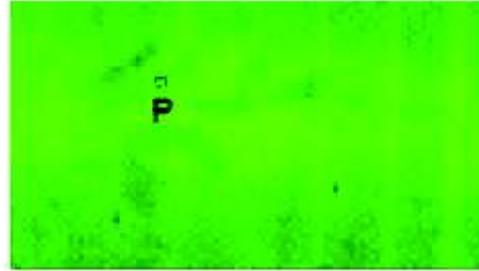


Imagen con luminosidad al 15%
RGB (0,207,0)

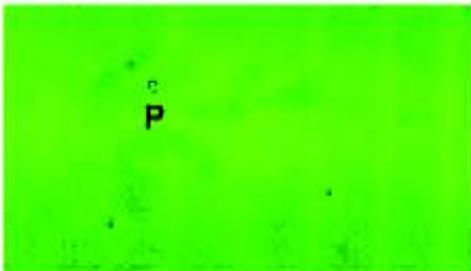


Imagen con luminosidad al 20%
RGB (0,220,0)

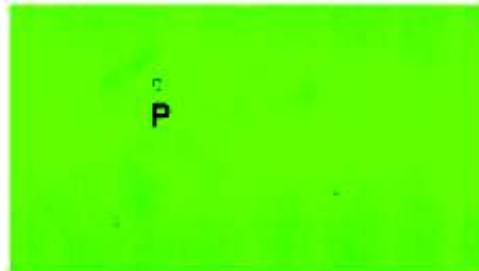


Imagen con luminosidad al 34%
RGB (0,255,0)

Figura 2.13. Cambios de luminosidad de la componente G en el encuadre 1.
(Fuente: Autores)

De igual forma la figura 2.14, 2.15 y 2.16 nos muestran la tendencia en aumento del valor de cada componente R, G y B de la escala en función del porcentaje de luminosidad.

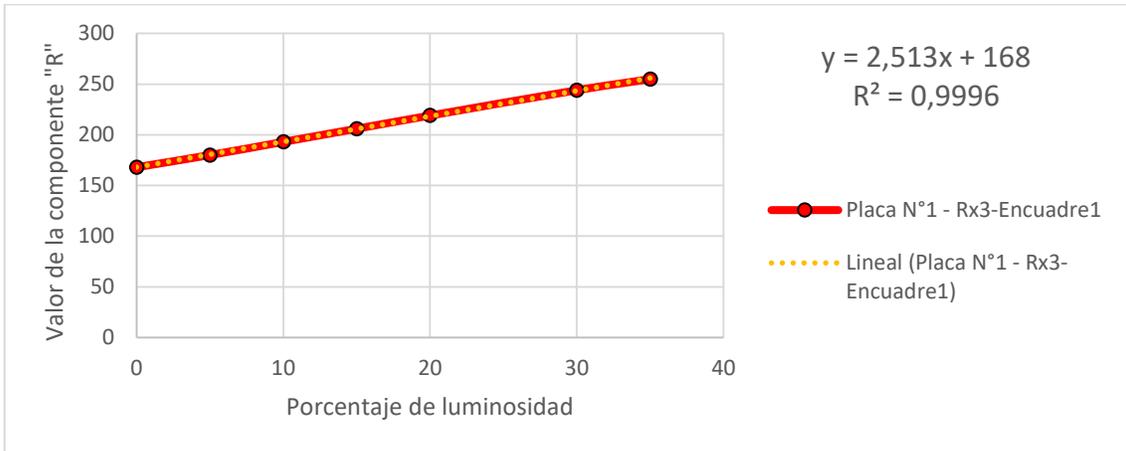


Figura 2.14. Análisis de la componente R.
(Fuente: Autores)

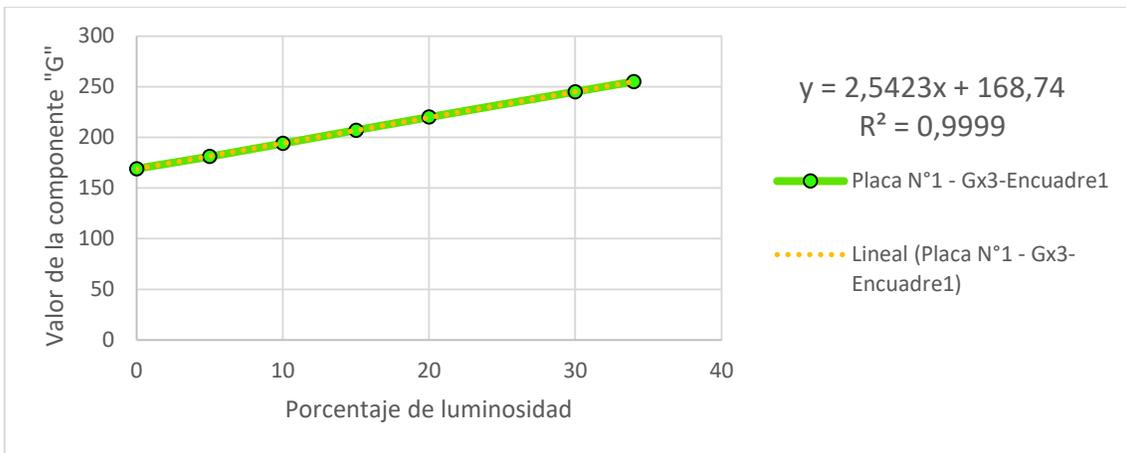


Figura 2.15. Análisis de la componente G.
(Fuente: Autores)

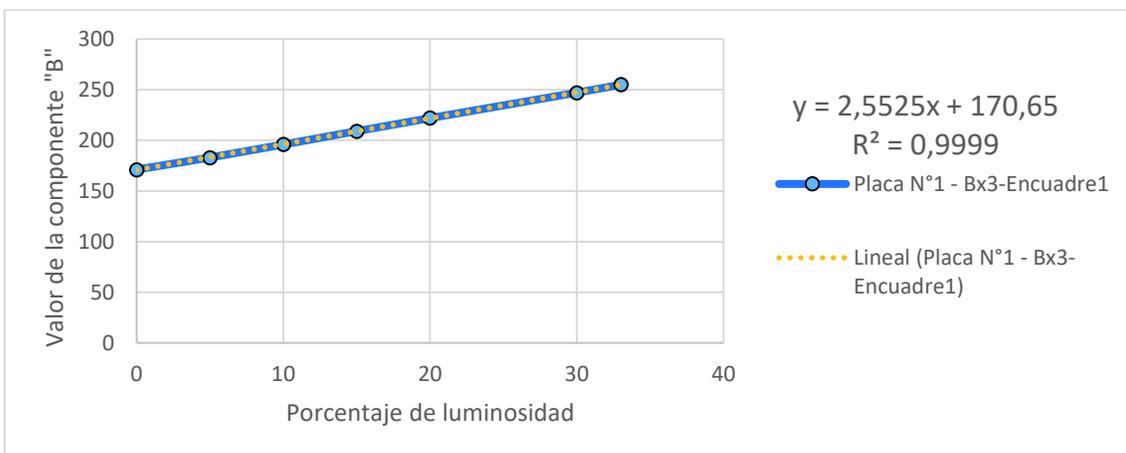


Figura 2.16. Análisis de la componente B.
(Fuente: Autores)

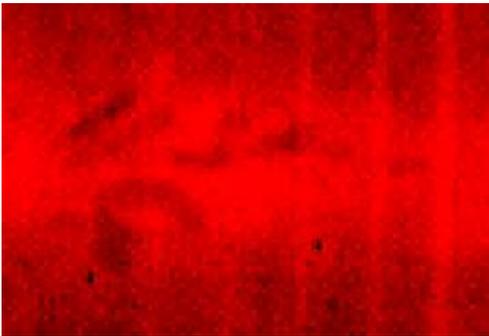
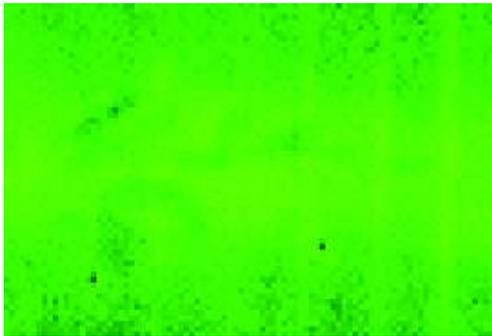
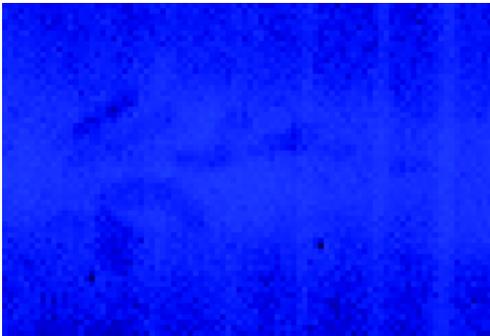
Analizando las figuras 2.14, 2.15 y 2.16 se concluye que la tendencia de aumento porcentual de luminosidad de cada filtro describe una trayectoria lineal. Además mediante el ajuste de curvas de Excel se obtiene la ecuación que define cada valor de la escala RGB con su respectivo R cuadrado cercano a 1, validando así su resultado.

Con la ayuda de la Tabla 2.2 y las ecuaciones obtenidas del análisis de cada componente R, G y B en las figuras 2.14, 2.15 y 2.16 se determinan el valor referente al 50% de luminosidad de cada filtro (ya que poseen la mayor luminosidad descrita por “Cevagraf”) y se adquiere los siguientes resultados:

- Filtro Rojo (%R) equivalente al 50% de luminosidad es 17,5%
- Filtro Verde (%G) equivalente al 50% de luminosidad es 17%
- Filtro Azul (%B) equivalente al 50% de luminosidad es 16,5%

Conocido el valor (parte entera) de los filtros al 50% de luminosidad se procede a realizar el filtrado del encuadre 1 en los componentes R, G y B. Cuyo resultado se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Filtrado de encuadre 1 en los componentes R, G y B al 50% de luminosidad.

	
Luminosidad al 17%	Luminosidad al 17%
	
Luminosidad al 16%	

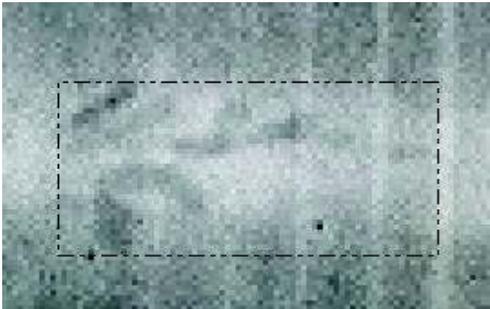
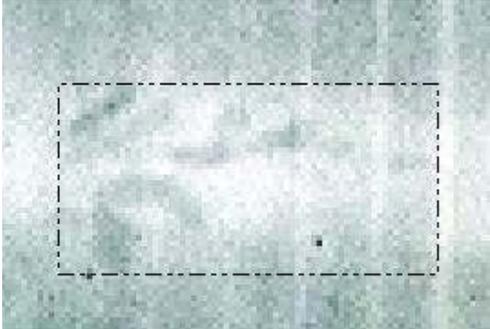
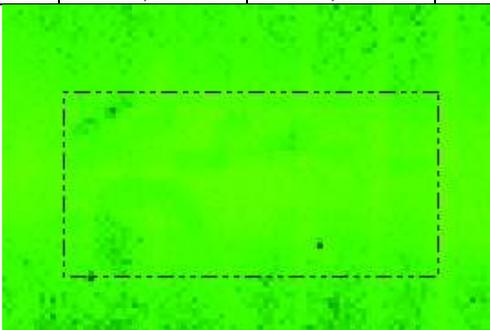
(Fuente: Autores)

Para seleccionar el porcentaje del filtro idóneo se sugiere seleccionar el que evite que la vista se fuerce al enfocarse en el estudio de las *indicaciones* y el valor de R^2 más cercano a 1.

Para nuestro caso de estudio se selecciona para el encuadre 1, con análisis de un punto fijo, el valor del filtro Verde al 17% (%G), además se establece un criterio adicional donde el valor porcentual del filtro brillo sea el mismo al valor del filtro seleccionado.

Concluyendo con el estudio del encuadre 1 se muestra la tabla 2.4 con el resultado final.

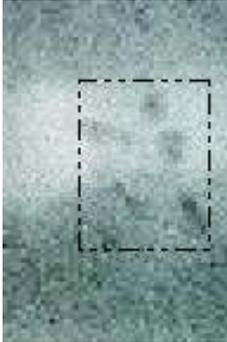
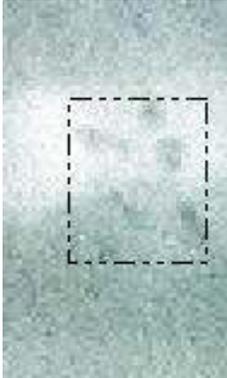
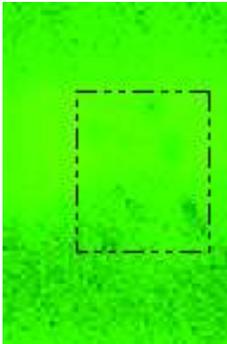
Tabla 2.4. Cuadro comparativo del encuadre 1 – Placa N° 6.

					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% Brillo
X3	17,02	7,87	8,96	9,84	0
					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% Brillo
X3	16,88	7,80	8,88	9,75	17
					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% G
X3	16,78	7,80	8,83	9,75	17

(Fuente: Autores)

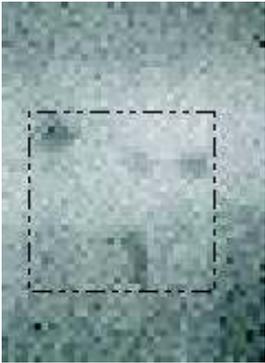
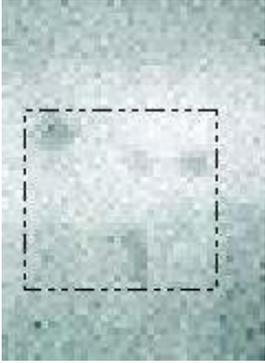
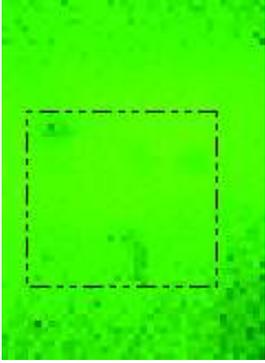
Para el proceso de inspección de los encuadres 2, 3 y 4 de la Placa N° 6 se realiza el mismo procedimiento que se efectuó en el encuadre 1. Logrando presentar a continuación los resultados finales de los mismos en la tabla 2.5, 2.6 y 2.7 respectivamente.

Tabla 2.5. Cuadro comparativo del encuadre 2 – Placa N° 6.

					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% Brillo
X2	6,78	7,51	3,56	9,38	0
					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% Brillo
X2	6,41	7,88	3,37	9,85	13
					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% G
X2	6,41	7,91	3,37	9,89	13

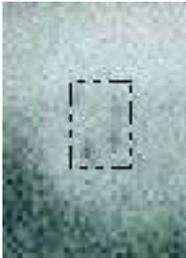
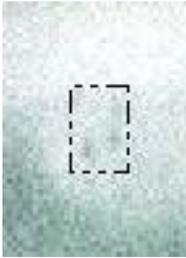
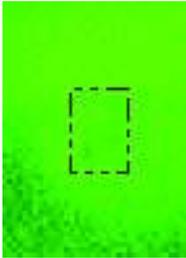
(Fuente: Autores)

Tabla 2.6. Cuadro comparativo del encuadre 3 – Placa N° 6.

					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% Brillo
X3	6,3	6,46	3,31	8,07	0
					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% Brillo
X3	6,52	6,46	3,43	8,07	15
					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% G
X3	6,45	6,30	3,39	7,87	15

(Fuente: Autores)

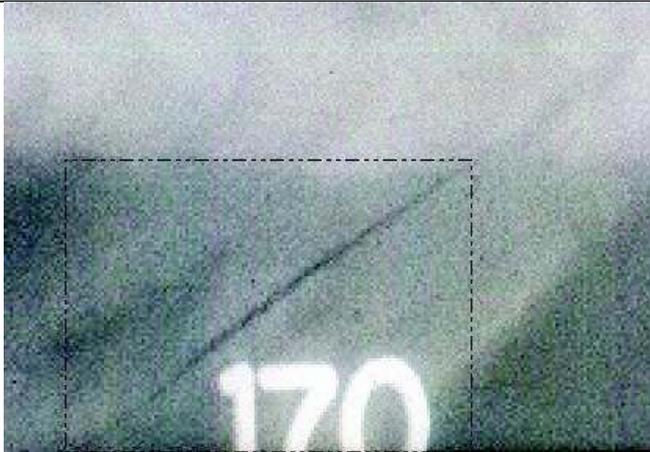
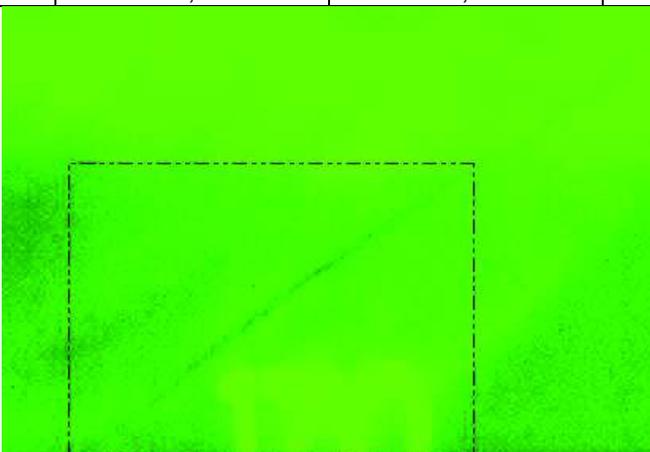
Tabla 2.7. Cuadro comparativo del encuadre 4 – Placa N° 6.

					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% Brillo
X2	2,55	3,70	1,34	4,63	0
					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% Brillo
X2	2,44	3,70	1,28	4,63	18
					
Zoom	X	Y	PI	Pa	% G
X2	2,44	3,59	1,28	4,48	18

(Fuente: Autores)

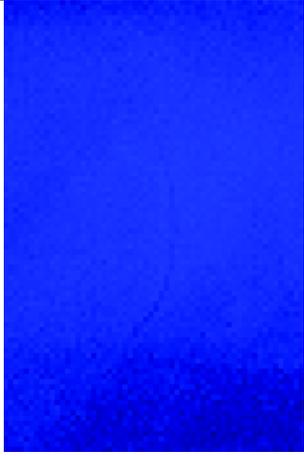
Como segunda parte se inspecciona el encuadre uno y dos de la Placa N° 8, descrito en la figura 2.12, para ello se continúa con los mismos criterios que se utilizaron en la primera parte (Placa N° 6) mostrando así los siguientes resultados:

Tabla 2.8. Cuadro comparativo del encuadre 1 – Placa N° 8.

			
Zoom	Li	% Longitud	% Brillo
X2	35,72	21,01	0
			
Zoom	Li	% Longitud	% Brillo
X2	35,56	20,91	23
			
Zoom	Li	% Longitud	% G
X2	35,54	20,90	23

(Fuente: Autores)

Tabla 2.9. Cuadro comparativo del encuadre 2 – Placa N° 8.

			
Zoom	% Brillo	Zoom	% Brillo
X3	0	X3	10
			
Zoom	% R	Zoom	% G
X3	10	X3	10
			
Zoom	% B		
X3	10		

(Fuente: Autores)

2.2.2.4. Ejecución del Nivel IV – V

Estos dos niveles se combinan para presentar los siguientes reportes.

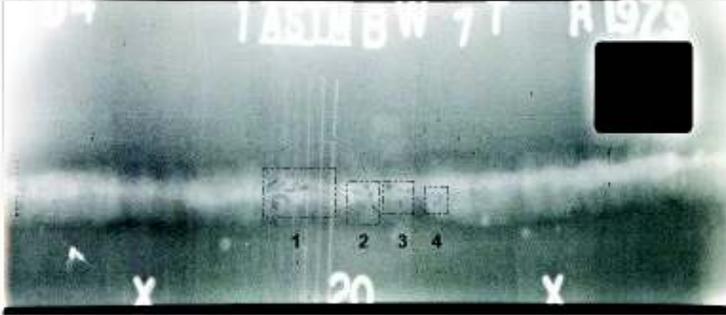
TIPOS DE DISCONTINUIDADES	UBICACIÓN	OBSERVACIÓN
Inadecuado Penetración (PI) Inadecuado Penetración/Desalineación (PD) Falta de Fusión (F) Falta de Fusión por Junta (Faj) Concavidad Interna (C) Concavidad Externa (EC) Quemadura (QT) Escoria Abierta (SA) Escoria Elongada (SE) Otros Defectos - Poros - Redondeados (P) Otros Defectos - Poros - Nidos (CP) Otros Defectos - Poros - Tunel (RP) Otros Defectos - Fisuras (F) Otros Defectos - Modeduras (M) Otros:	P (20)	X1=16.78 / Y2=6.41 / Y3=6.45 / Y4=2.44
IDENTIFICACIÓN Y TIPO DE JUNTA: Desconocido POSICIÓN DE SOLDADURA: Desconocido PROCESO DE SOLDADURA: Desconocido MATERIAL Y ESPESOR: Desconocido MÉTODO DE RADIOGRAFÍA: GAMAGRAFÍA Filtro ISO: N/A Coberto ED: N/A RAYOS X: KV: Desconocido NORMA: API 1104 PLACA N°: 7 SOLDADOR: Desconocido RESULTADO: No se ACEPTA la soldadura por que la suma de las longitudes es mayor a lo establecido por la norma (12mm) REVISADO POR: Ing. Horacio Barragan		
		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Otros Defectos-Poros-Nidos(CP) <input checked="" type="checkbox"/> RECHAZADO Sumar Evaluar </div>		

Figura 2.17. Preview del reporte de la Placa N° 6.
(Fuente: Autores)

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL REPORTE DE FAVORABLE DE SEGURIDAD VIAL		
TIPO DE DEFECHO/DAÑO	UBICACIÓN	ORGANISMO
Inadecuada Penetración (IP) Inadecuada Penetración Inadecuada (IPD) Faja de Pavimento (FPA) Faja de Pavimento en Curva (FPA-C) Comunalidad Intermédica (CI) Comunalidad Urbana (CU) Bordes (B) Escala Acabada (EA) Escala Cruda (ESC) Otros Defectos - Fisuras - Fisuras (F) Otros Defectos - Fisuras - Fisuras (F)	PUNTO	KM 1,38.88 (Elevación 2) presencia de una Balsa Troncal
IDENTIFICACIÓN Y TIPO DE DAÑO Descripción: POSICIÓN DE MARCADO: Descripción: PROCESO DE REALIZACIÓN: Descripción: MATERIAL EMPLEADO: Descripción: MATERIAL DE PARTICIPACIÓN: SANGRANTE: No. RE. MA: Datos de R. S: Años: N.º Documento: N.º Plan: 4011194 PLACA N.º: 8 DESCRIPCIÓN: Balsa Troncal RESULTADO: Se ACEPTA la solicitud con que se ingresó IP en razón de haberse por la fecha 25/04/2014, debido a la presencia de una balsa troncal RECHAZADO POR: Ing. Romeo Barrera		

<input type="checkbox"/> Inadecuada Penetración(IP)	<input type="checkbox"/> Otros Defectos-Fisuras(F)
<input checked="" type="checkbox"/> RECHAZADO	<input checked="" type="checkbox"/> RECHAZADO
<input type="button" value="Evaluar"/>	<input type="button" value="Evaluar"/>

Figura 2.18. Preview del reporte de la Placa N° 8.
(Fuente: Autores)

2.3. Validación del software WD 1.0

Se determina la validación del software Watching Defects 1.0 al comparar las medidas obtenidas por el mismo, con las dimensiones que se obtienen de una medición convencional.

Para el presente proyecto se define la medición convencional a la misma que se realiza a través del software AutoCAD 2016, versión estudiantil. Obteniendo los resultados que se pueden apreciar en la figura 2.19 y 2.20.

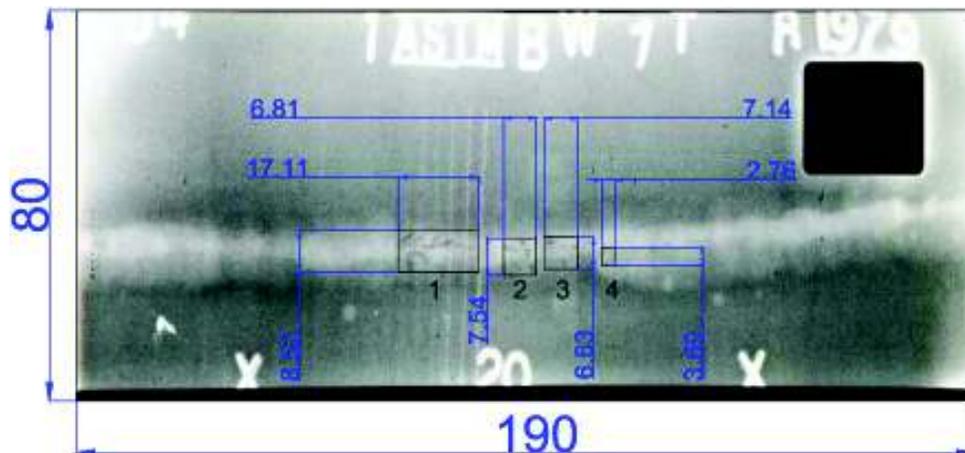


Figura 2.19. Medición convencional realizada en AutoCAD – Placa N° 6.
(Fuente: Autores)

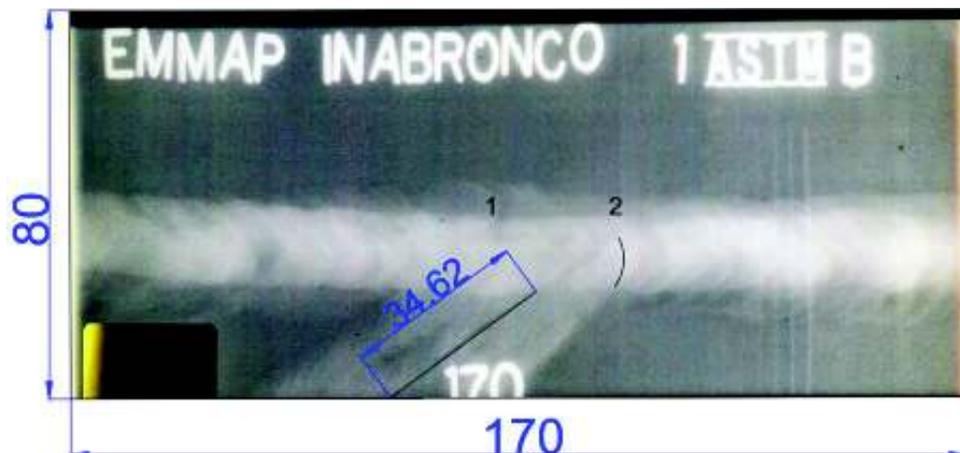


Figura 2.20. Medición convencional realizada en AutoCAD – Placa N° 8.
(Fuente: Autores)

Por ende, en relación a los datos obtenidos por medio del software Watching Defects 1.0 y la medición convencional, se presenta un cuadro comparativo de los mismos.

No se podrá definir cuál es nuestro valor referencial en base a los datos obtenidos, ya que estos resultados se basan de la apreciación y experiencia del evaluador, además de la probabilidad de aceptación al momento de realizar varias veces la medición de un defecto. Estos resultados comparativos se pueden visualizar a continuación.

Tabla 2.10. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 6 – Encuadre 1.

NIVEL II - Placa N° 6 - WATCHING DEFECTS 1.0		
MEDICIÓN BÁSICA	X = 17,76	PI = 9,34
	Y = 8,59	Pa = 10,73
NIVEL III - Placa N° 6 - WATCHING DEFECTS 1.0		
BRILLO AL 0%	X = 17,02	PI = 8,96
	Y = 7,87	Pa = 9,84
BRILLO AL 17%	X = 16,88	PI = 8,88
	Y = 7,80	Pa = 9,75
FILTRO VERDE (%G) AL 17%	X = 16,78	PI = 8,83
	Y = 7,80	Pa = 9,75
Placa N° 6 – MEDICIÓN CONVENCIONAL		
MEDICIÓN POR AutoCAD	X = 17,11	PI = 9,00
	Y = 8,52	Pa = 10,65

(Fuente: Autores)

Tabla 2.11. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 6 – Encuadre 2.

NIVEL II - Placa N° 6 - WATCHING DEFECTS 1.0		
MEDICIÓN BÁSICA	X = 6,90	PI = 3,63
	Y = 8,83	Pa = 11,03
NIVEL III - Placa N° 6 - WATCHING DEFECTS 1.0		
BRILLO AL 0%	X = 6,78	PI = 3,56
	Y = 7,51	Pa = 9,38
BRILLO AL 13%	X = 6,41	PI = 3,37
	Y = 7,88	Pa = 9,5
FILTRO VERDE (%G) AL 13%	X = 6,41	PI = 3,37
	Y = 7,91	Pa = 9,89
Placa N° 6 – MEDICIÓN CONVENCIONAL		
MEDICIÓN POR AutoCAD	X = 6,81	PI = 3,58
	Y = 7,54	Pa = 9,42

(Fuente: Autores)

Tabla 2.12. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 6 – Encuadre 3.

NIVEL II - Placa N° 6 - WATCHING DEFECTS 1.0		
MEDICIÓN BÁSICA	X = 6,66	PI = 3,50
	Y = 5,97	Pa = 7,46
NIVEL III - Placa N° 6 - WATCHING DEFECTS 1.0		
BRILLO AL 0%	X = 6,3	PI = 3,31
	Y = 6,46	Pa = 8,07
BRILLO AL 15%	X = 6,52	PI = 3,43
	Y = 6,46	Pa = 8,07
FILTRO VERDE (%G) AL 15%	X = 6,45	PI = 3,39
	Y = 6,30	Pa = 7,87
Placa N° 6 – MEDICIÓN CONVENCIONAL		
MEDICIÓN POR AutoCAD	X = 7,14	PI = 3,75
	Y = 6,63	Pa = 8,28

(Fuente: Autores)

Tabla 2.13. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 6 – Encuadre 4.

NIVEL II - Placa N° 6 - WATCHING DEFECTS 1.0		
MEDICIÓN BÁSICA	X = 2,96	PI = 1,55
	Y = 3,49	Pa = 6,86
NIVEL III - Placa N° 6 - WATCHING DEFECTS 1.0		
BRILLO AL 0%	X = 2,55	PI = 1,34
	Y = 3,70	Pa = 4,63
BRILLO AL 18%	X = 2,44	PI = 1,28
	Y = 3,70	Pa = 4,63
FILTRO VERDE (%G) AL 18%	X = 2,44	PI = 1,28
	Y = 3,59	Pa = 4,48
Placa N° 6 – MEDICIÓN CONVENCIONAL		
MEDICIÓN POR AutoCAD	X = 2,76	PI = 1,45
	Y = 3,69	Pa = 4,61

(Fuente: Autores)

Tabla 2.14. Resultados de la medición del software Watching Defects 1.0 vs medición convencional – Placa N° 8 – Encuadre 1.

NIVEL II - Placa N° 8 - WATCHING DEFECTS 1.0		
MEDICIÓN BÁSICA	Li = 36,60	PI = 19,48
NIVEL III - Placa N° 8 - WATCHING DEFECTS 1.0		
BRILLO AL 0%	Li = 35,72	PI = 21,01
BRILLO AL 23%	Li = 35,56	PI = 20,91
FILTRO VERDE (%G) AL 23%	Li = 35,64	PI = 20,90
Placa N° 8 – MEDICIÓN CONVENCIONAL		
MEDICIÓN POR AutoCAD	Li = 34,62	PI = 18,42

(Fuente: Autores)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta la interpretación de los datos experimentales obtenidos mediante el software WD 1.0.

Los resultados son mostrados de manera gráfica y tabulada, además de una ecuación obtenida mediante Excel por ajuste de curvas, que permite predecir el porcentaje de filtro a usarse en la imagen de acuerdo a la caracterización en negro de la misma.

3.1. Caracterización en negro de las placas radiográficas

Mediante un barrido de lectura de toda la imagen radiográfica se conoce el valor de cada uno de los componentes R, G y B de cada uno de los pixeles que forman la imagen. Estos valores se promedian para obtener un valor referencial menor a 128, los mismos que se suman para llegar a tener la caracterización de la imagen en negro.

Si el valor promediado es igual a 128 se descarta debido a que este es el valor de luminosidad óptimo para el ojo humano, y lo que se desea conocer es cuan oscura es una imagen radiográfica.

La figura 3.1 y la tabla 3.1, muestran los valores de la caracterización de todas las imágenes radiográficas que se encuentran en el ANEXO 1.

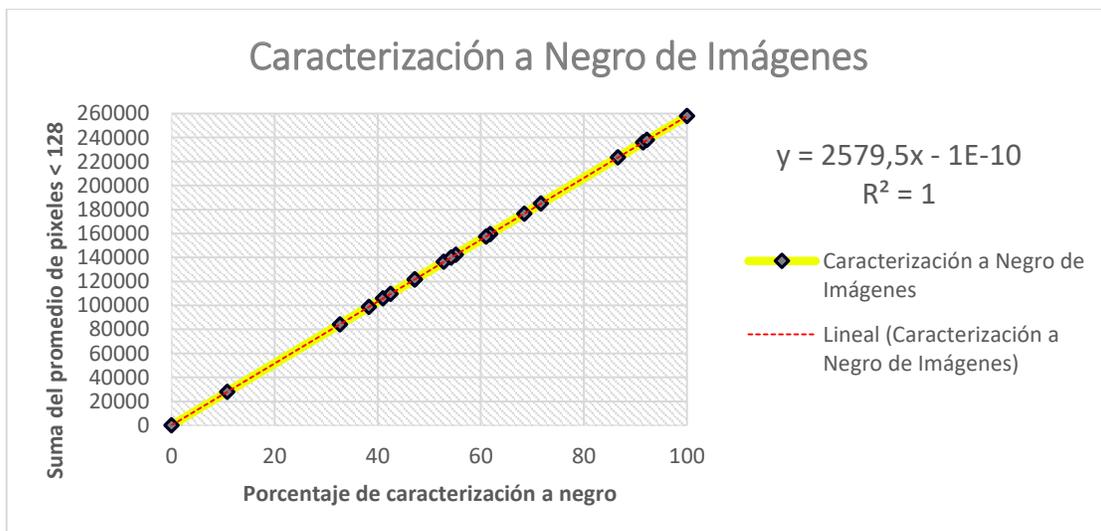


Figura 3.1. Curva de tendencia de la caracterización a negro.
(Fuente: Autores)

Tabla 3.1. Datos tabulados de la caracterización de las imágenes radiográficas.

Placa N°	Suma promedio de los componentes R, G y B menores a 128	%
RGB (0,0,0) – Negro	257950	100
1	121639	47
2	142220	55
3	223374	87
4	184838	72
5	235963	91
6	84202	33
7	139921	54
8	105765	41
9	237894	92
10	121778	47
11	176482	68
12	159546	62
13	109531	42
14	27803	11
15	157434	61
16	98817	38
RGB (255,255,255) – Blanco	0	0

(Fuente: Autores)

Los resultados de la caracterización muestran una ecuación lineal, la misma que nos permite predecir el valor porcentual de la caracterización a negro de la imagen en el rango promedio de 0 a 127.

Para la imagen de la Placa N° 6, se tiene los valores 13, 15, 17 y 18 de %G al 50% de luminosidad.

Mediante los datos obtenidos se selecciona un valor central con su respectivo rango, el mismo que cubra los valores adquiridos de la Placa N° 6. Dejando como resultado el %G en 16 ± 3 , como valor del filtro para la Placa N° 6.

De la misma manera se resuelve para la Placa N° 8 dejando como resultado el %G en 16 ± 6 .

Para ambos casos se puede apreciar que el valor del filtro al %G es de 16.

Como punto final se establece el aumento o disminución del rango del valor del %G de 16 en base a la extrapolación de los datos de rango obtenidos de la Placa N° 6 y 8, tomando el criterio de una ecuación con tendencia lineal, al igual que el resultado obtenido de la ecuación de caracterización a negro. Como lo muestra la ecuación 3.1

$$y = 0,3589x - 8,7148 (R^2 = 1)$$

(Ec. 3.1)

Con la ecuación establecida se tabula y grafica los valores para cada dato porcentual de la caracterización a negro de cada una de las placas radiográficas, que se obtuvieron en la tabla 3.1, obteniendo así el rango para el resto de las imágenes. Como lo muestra la tabla 3.2 y figura 3.2.

Tabla 3.2. Datos obtenidos de rango para cada valor porcentual.

Placa N°	%	Rango
Placa RGB (0,0,0)	100	27
1	47	8
2	55	11
3	87	22
4	72	17
5	91	24
6	33	3
7	54	11
8	41	6
9	92	24
10	47	8
11	68	16
12	62	13
13	42	7
14	11	-5
15	61	13
16	38	5
Placa RGB (255,255,255)	0	-9

(Fuente: Autores)

Analizando los datos tabulados se puede apreciar la existencia de valores de rango negativos, los mismos que argumentan el no uso del rango para sus valores porcentuales adyacentes, como se muestra en la figura 3.2.

Con el uso de la ecuación obtenida de la figura 3.2 se obtiene el valor al cual no se permite el uso del rango, siendo este de valor porcentual igual o menor a 24.

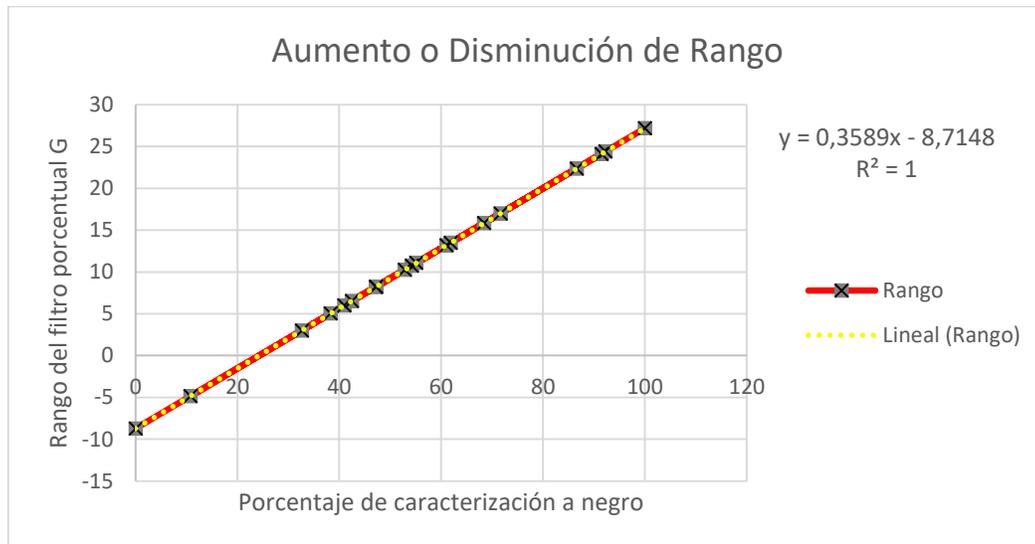
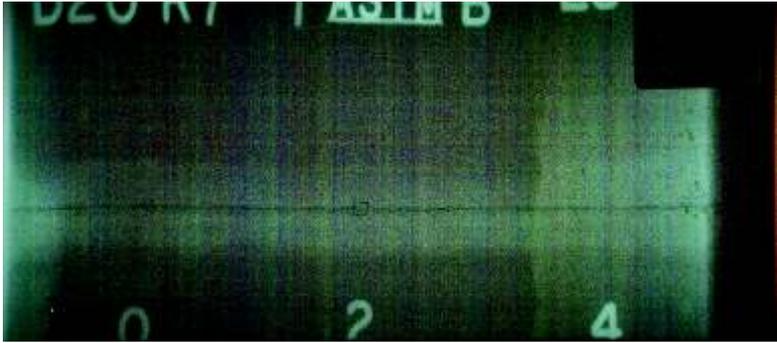
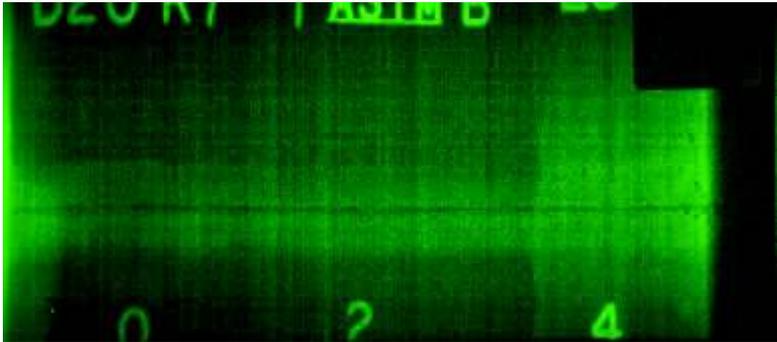
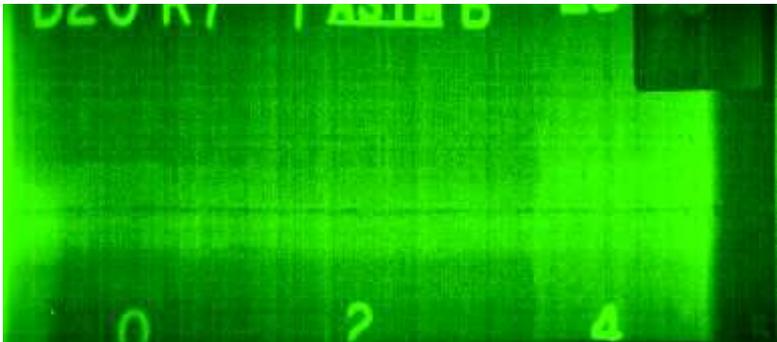


Figura 3.2. Curva de tendencia del rango.
(Fuente: Autores)

Para validar los datos de la tabla 3.2 se toma al azar una imagen radiográfica proveniente del Anexo 1, resultando electa la Placa N° 9. La misma que posee un valor del %G de 16 ± 24 . Como defecto de ello no se puede aceptar valores negativos para lo cual se considera un límite de cero en adelante al momento de efectuar el rango.

Como recomendación se sugiere el uso del valor al 16%G para empezar el análisis, en caso de necesitar mayor luminosidad se podrá usar el rango establecido por la tabla 3.2.

Tabla 3.3. Comprobación de la caracterización a negro en la placa N° 9.


Imagen original

0% G de brillantez

16% G de brillantez

40% G de brillantez

(Fuente: Autores)

3.2. Justificación del filtro seleccionado

Las pantallas LED utilizadas en dispositivos móviles, pantallas de ordenadores y televisores son utilizadas a diario por la mayoría de personas en el ámbito laboral, estudiantil y de entretenimiento. Es así que gracias a investigaciones realizadas por científicos de la UCM (Universidad Complutense de Madrid) advierten que la luz emitida por las pantallas digitales ocasiona problemas de salud, dañando de forma permanente a los ojos, desde cansancio, fatiga visual, daños en la retina y pérdida de visión. Dicha investigación fue publicada en la revista *Photochemistry and Photobiology*. (Reticare, 2017)

La investigación liderada por la Dra. Celia Sánchez-Ramos comenzó con experimentación animal en ratas, exponiéndolos a luz blanca, luz azul y luz blanca exenta de azul; el cual duró un año demostrando así que los especímenes tratados con una exposición lumínica sin protección presentaban daño retinal a una radiación de 450 nm, experimentando una mayor muerte en las células oculares. En los posteriores años se realizaron estudios clínicos en humanos exponiéndolos a luz ambiente-natural y artificial de pantallas, se utilizaron de igual manera filtros que ayudaron a reducir las consecuencias, sin embargo, se observó la reducción del espesor macular en el ojo sin filtro protector y por ende menor reducción del espesor en el ojo con filtro.

A continuación se realizó experimentación in vitro con células de retina humana de personas donantes, realizando una exposición lumínica a LEDs de colores con longitud de onda corta (azules), longitud de onda media (verdes), longitud de onda larga (rojos) y blancos, en el tiempo de tres días y a ciclos de luz/oscuridad de 12h/12h. Los resultados fueron que existe una mayor cantidad de muerte celular, cerca del 90%, en la exposición lumínica a LEDs sin filtro y blanco. Sin embargo la tasa de supervivencia celular aumento un 83% con la utilización de filtros azules, rojos y verdes.



Figura 3.3. Dispositivos LEDs utilizados en el estudio.
(Fuente: Reticare, 2017)

Efecto del filtro en el análisis de las placas radiográficas

Una vez realizado el análisis e inspección de las Placas Radiográficas N° 6 y 8 se obtuvo en ambos casos la selección del filtro Verde al 16 %G.

En base a este resultado del valor %G se desarrolló la ecuación de predicción de la caracterización a negro en valores porcentuales y usando este resultado se estable el rango de aumento o disminución para los diferentes tipos de caracterización a negro, como se indica en la tabla 3.2.

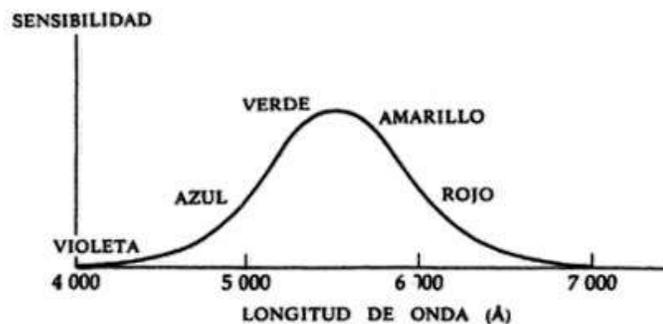


Figura 3.4. Sensibilidad del ojo a los distintos Colores.
(Fuente: Bueche, 2004)

Además se justifica el filtro Verde en base al espectro de luz visible, siendo así que en relación a la figura 3.4, se conoce que el ojo humano posee más sensibilidad a los colores que se encuentren en la longitud de onda Verde – Amarillo, punto pico, logrando así que el filtro seleccionado se encuentre dentro de la más grande sensibilidad del ojo humano. (F. Bueche, 1988).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El desarrollo del software de asistencia para el análisis e inspección de placas radiográficas de soldadura WD1.0 (Watching Defects 1.0), objetivo general del proyecto, se logró de una manera satisfactoria permitiendo realizar pruebas con las placas radiográficas proporcionadas por la empresa ENDE Cía. Ltda.
- Con el proyecto aquí presente, se consigue un aporte que beneficia a la interpretación e inspección de imágenes radiográficas, favoreciendo al entendimiento de las discontinuidades presentes en el ensayo de radiografía industrial. Así mismo, se dota a la industria ecuatoriana o laboratorios de Ensayos No Destructivos con una herramienta que perfecciona los criterios de los inspectores o el personal afín al campo de la soldadura y Ensayos No Destructivos.
- El Software permite el acople de los ensayos no destructivos por medio de la radiografía industrial, con ayuda de herramientas de procesamiento y medición de *indicaciones*. Del análisis e interpretación del filtrado en escala RGB se extrapola un método conocido como la caracterización a negro, que sintetiza el procesamiento de las imágenes radiográficas a un valor estándar.
- Mediante la creación del software de asistencia, el usuario (inspectores o personal afín a la inspección de placas radiográficas) puede observar e interpretar las *indicaciones* presentes en las placas radiográficas de una manera más meticulosa, lo que permite dar un mejor criterio de análisis y evaluación.
- Con la creación de un banco digitalizado de imágenes de placas radiográficas, se evita el deterioro que sufren las placas debido a su manipulación, las condiciones con que son guardadas (humedad, ubicación, materiales) y el desgaste natural debido al paso del tiempo en general.
- Debido a que la imagen radiográfica está sujeta a la presencia de sombras o ennegrecimientos, debido a un mal manejo de variables de exposición radiográficas o inclusive a un mal procedimiento de digitalización de la imagen radiográfica, se realizó la discretización por punto de la *indicación* encontrada, separando la escala RGB de la sombra y de la propia *indicación* y

contrastándolas para apreciar un mejor resultado, y así obtener un mejor resultado en la selección y medición entre la interfaz de la sombra de la *indicación* y la propia *indicación* presente en la imagen.

- Realizado el análisis e inspección de las placas radiográficas, conjuntamente con la caracterización a negro la cual consiste en la suma de los valores promedio de los componentes R, G y B menores a 128, se concluye que en la mayoría de los casos de estudio de nuestra base digitalizada de placas radiográficas, el 16% G (porcentaje de filtro verde) es el punto óptimo y además sirve de guía para el análisis e inspección de las placas radiográficas.
- Realizado el análisis e inspección de nuestra base digitalizada de placas radiográficas, conjuntamente con la caracterización a negro la cual consiste en la suma de los valores promedio de los componentes R, G y B menores a 128, se concluye que el 16% G (porcentaje de filtro verde) es el punto óptimo común y además sirve de guía para el análisis e inspección de las placas radiográficas en general.

4.2. Recomendaciones

- Para un apropiado manejo de la interfaz del software, se recomienda leer el manual del usuario adjunto, para que el programa sea aprovechado al 100% de su potencial.
- Se recomienda la utilización de un filtro verde para contrastar de mejor manera las *indicaciones* y se puedan apreciar de mejor manera, reduciendo así la diferencia entre las interfaces erróneas de la sombra de la *indicación* y la propia *indicación*, presentes en la imagen radiográfica.
- Para obtener una mejor digitalización de las placas radiográficas se recomienda utilizar fuentes de luz blanca debido a que se evita la formación de ensombrecimientos y opacidad en zonas periféricas o centrales en la placa a ser digitalizada.
- Para trabajos a futuro se recomienda usar un filtrado en escala CMYK, debido a que las máquinas impresoras utilizan este modelo de color, motivo por el cual, al usar la escala RGB en imágenes de manera digital y al ser estas plasmadas en una impresión provoque la disminución de la calidad.

Referencias Bibliográficas

- ACHISOL. (2012). *Historia de la Soldadura*. Chile.
- Alvarado, J. P. (2012). *Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales*. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- American Petroleum Institute. (1999). *Norma API 1104-Soldadura de Cañerías y Facilidades Relacionadas*. Washington, D.C.
- American Welding Society. (2010). *AWS D1.1- Structural Welding Code, Steel*. Miami.
- ASM International. (1989). *ASM HandBook Volume 17 - Nondestructive Evaluation and quality control*. ASM HandBook.
- ASME. (1998). *Código ASME Sección IX-Soldadura: Desarrollo y calificación de Procedimientos y Soldadores*.
- ASME. (1998). *Código ASME Sección VIII-Diseño, Construcción e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión*.
- ASME. (2015). *Código ASME Sección V-Ensayos No Destructivos*.
- Bueche, F. (2004). *Ciencias Físicas*. España: REVERTÉ, S.A.
- Carmona, C. (2013). *La Radiografía como método de control de soldaduras*. Santiago-Chile: Universidad Andres Bello.
- Cavegraf. (14 de Marzo de 2015). *La Teoría del Color: Mezcla Aditiva y Mezcla Sustractiva*. Obtenido de <http://www.cevagraf.coop/posts/introduccion-a-la-teoria-del-color/>
- CCM Benchmark. (2018). *Código RGB*. Obtenido de <http://es.ccm.net/contents/733-codigo-rgb>
- EDMANS. (2006). *Técnicas y Algoritmos básicos de visión artificial*. España: Universidad de La Rioja.
- Escalante, B. (2006). *Procesamiento Digital de Imágenes*. Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- García, D. (2016). *David García Pérez-Fotografía*. Obtenido de <http://dgpfotografia.com/2016/06/07/la-historia-de-la-primera-camara-digital/>
- GE Inspection Technologies. (2006). *Industrial Radiography*. Obtenido de <https://www.gemeasurement.com/>
- Guerrero, A. (2012). *Diseño e implementación de una herramienta didáctica de software para el procesamiento digital básico de imágenes para los estudiantes de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10715/1/l.pdf>
- Hellier, C. (2003). *Handbook of Nondestructive evaluation*. McGraw-Hill.
- Laorden, E. (2012). *Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox de procesado digital de imágenes de MATLAB*. Madrid: Escuela

Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación-Universidad Politécnica de Madrid.

Loriente, Ó. (2011). *Ensayos no Destructivos*. España: Educalía.

Reticare. (2017). *Reticare*. Obtenido de <https://www.reticare.com/spain/la-ciencia-detras-reticare/>

SCI. (2018). Obtenido de SCI Control & Inspección: <https://www.scichile.cl/ensayos-no-destructivos/ensayos-por-radiografia-industrial/>

Torres, N., Torres, M., & Montanez, J. (1988). *Radiografía Industrial X y Gamma*. Bogotá: Instituto de asuntos nucleares.

Trecco, A. (2013). *Tecnología de los Materiales-Ensayo de Materiales*. Argentina .

TWI. (2004). *Radiographic Interpretation-Radiographs of welds*. Obtenido de <https://kishorekaruppaswamy.files.wordpress.com/2011/10/radiographic-interpretation.pdf>

Universidad de Sevilla. (2016). *INTRODUCCIÓN A LAS IMÁGENES DIGITALES*. Obtenido de <http://asignatura.us.es/imagendigital/Tema1.pdf>

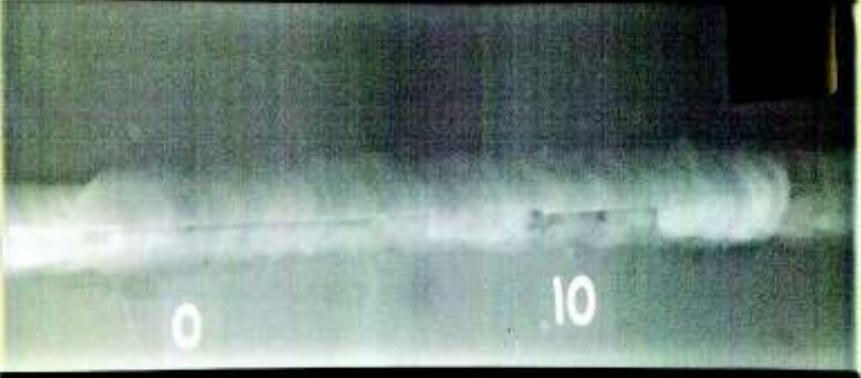
VÉRTICE. (2008). *Tratamiento de la Fotografía Digital*. VÉRTICE S.L.

VISION IN X. (2018). *VISION IN X Industrial Imaging GMBH*. Obtenido de <http://vision-in-x.com/en/home.html>

Anexos

Anexo 1. Banco digitalizado de placas radiográficas

Fuente: Autores

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 1	Dimensiones [mm]: 205x80

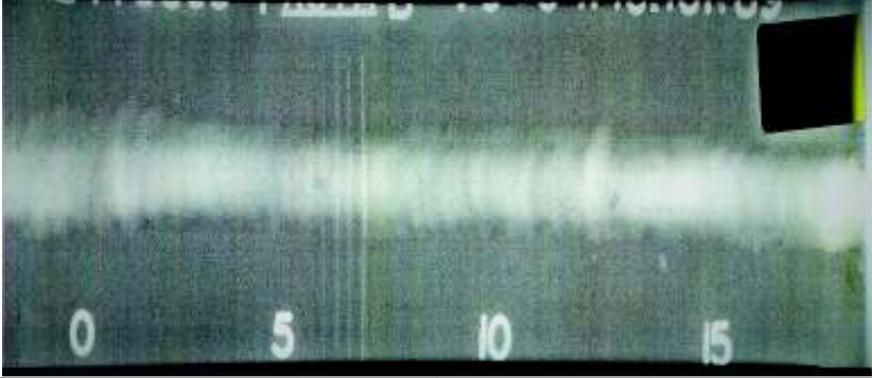
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 2	Dimensiones [mm]: 200x80

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 3	Dimensiones [mm]: 180x80

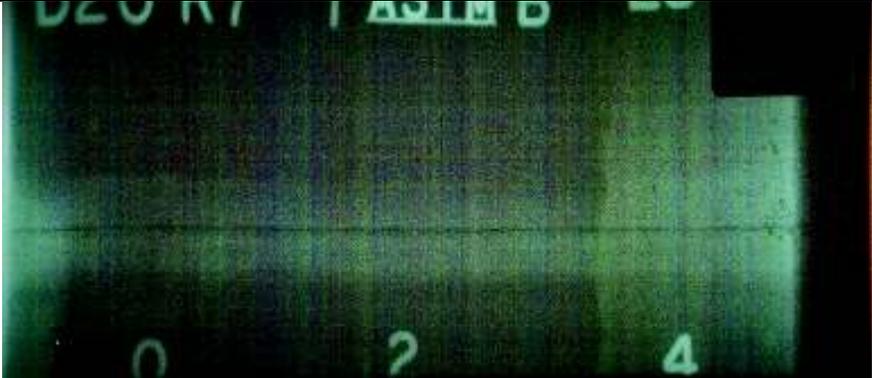
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 4	Dimensiones [mm]: 145x80

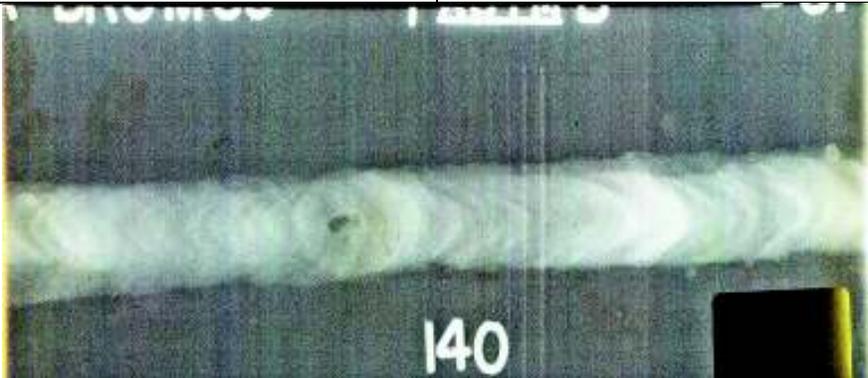
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 5	Dimensiones [mm]: 155x80

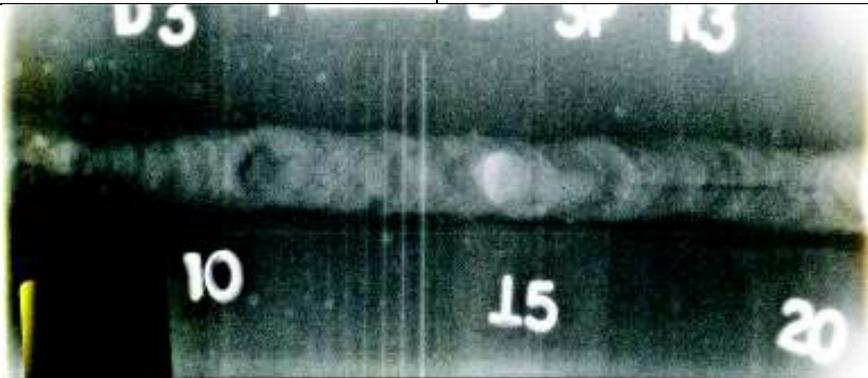
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 6	Dimensiones [mm]: 190x80

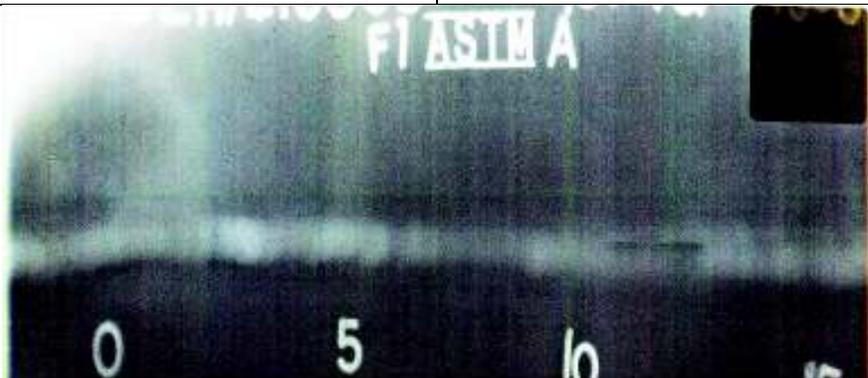
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 7	Dimensiones [mm]: 215x80

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 8	Dimensiones [mm]: 170x80

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 9	Dimensiones [mm]: 155x80

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 10	Dimensiones [mm]: 163x80

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 11	Dimensiones [mm]: 150x80

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
	
Nombre: Placa N° 12	Dimensiones [mm]: 190x80

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
Nombre: Placa N° 13	Dimensiones [mm]: 250x80

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA. /Tuberías	Fecha: 15/01/2018
Nombre: Placa N° 14	Dimensiones [mm]: 250x70

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
Fuente: ENDE Cía. LTDA.	Fecha: 15/01/2018
Nombre: Placa N° 15	Dimensiones [mm]: 190x70

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Fuente: ENDE Cía. LTDA.

Fecha: 15/01/2018



Nombre: Placa N° 16

Dimensiones [mm]: 235x70

Anexo 2. Manual del Usuario de software Watching Defects 1.0

Fuente: Autores

MANUAL DEL USUARIO DE SOFTWARE DE ASISTENCIA PARA EL ANÁLISIS E INSPECCIÓN DE PLACAS RADIOGRÁFICAS DE SOLDADURA

1.1 INTRODUCCIÓN

El software de asistencia para análisis e inspección de placas radiográficas de soldadura ha sido creado para mejorar la evaluación de las *indicaciones* presentes dentro de una imagen radiográfica, abarca desde el uso de diferentes filtros hasta la medición de las *indicaciones* presentes mediante la caracterización de las imágenes a negro.

Cada una de las ventanas ejecuta diferentes funciones, desde el acceso al software hasta la creación de un reporte de inspección.

El paquete de programación empleado para este proyecto es Visual Basic 6.0 el mismo que ha sido usado por la facilidad de creación de interfaces gráficas, debido a su estilo de programación orientada a objetos.

1.2 REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN Y USO

El programa de instalación necesita los siguientes requisitos:

- Procesador: Intel Core i3 o superior
- Velocidad del Procesador: 1.70GHz o superior
- Espacio Mínimo del Disco: 200MB
- Sistema Operativo: Windows XP o superior

Procedimiento de instalación:

- Inserte el CD de instalación.
- Haga doble clic en Setup (instalador).
- Siga las instrucciones indicadas por el instalador.

1.3 INICIO DEL PROGRAMA

Antes de iniciar la ejecución del programa se recomienda ejecutar las siguientes instrucciones:

- Cerrar todas las aplicaciones ajenas al programa, de esta manera se evita un posible conflicto con las mismas y reducción de la velocidad del sistema.
- En la pantalla de inicio de Windows hacer clic derecho y nuevamente clic en la opción Actualizar.
- Se recomienda tener una calidad de pantalla de 32 bits y resolución del monitor superior a 900 x 600.
- Hacer clic en el icono del programa.

1.4 USO DEL PROGRAMA

Una vez iniciado el programa se tendrá la ventana de inicio, figura 1. La cual sirve de presentación y acceso al programa.



Figura 1. Ventana de inicio.
(Fuente: Autores)

En código de acceso consta de 5 números que se obtiene al leer todos los valores que se encuentren en la primera fila impar en la parte superior e inferior menos un puesto, en la segunda fila impar el valor que se encuentra sobre el cero, y la última fila impar los valores que se encuentren en la parte superior e inferior menos un puesto. El código numérico se halla ubicado en la parte central izquierda de la ventana.

Al hacer clic en el botón “Continuar” se accede a la ventana de análisis de radiografías, como se muestra en la figura 2.

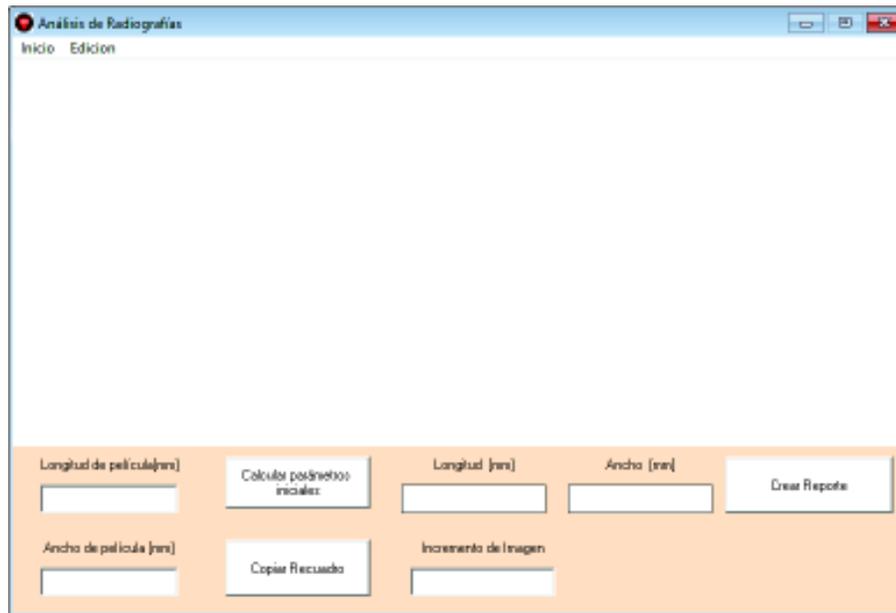


Figura 2. Ventana de análisis radiográfico.
(Fuente: Autores)

Aquí se procede a la medición básica del tamaño de las *indicaciones* presentes en la imagen radiográfica, mediante un encuadre el cual se accede al hacer clic izquierdo sostenido en la sección a ser analizada.

Terminado el encuadre se procede hacer clic en el botón “Calcular parámetros iniciales” para conocer la longitud y ancho de la *indicación*, cuyos valores son importantes de acuerdo a las diferentes normas de evaluación.

Además de los botones, la ventana cuenta con una barra superior de herramientas que se describe a continuación:

- **Inicio**

- **Insertar_Imagen:** es la conexión entre el programa y Windows para buscar imágenes en formato jpg.
- **Guardar:** permite guardar la imagen en dimensiones 770x335 pixeles.
- **Salir:** es la opción para terminar la sesión.

- **Edición**

- **Limpiar:** elimina cada una de los datos que hayan sido ingresados en este nivel.

- **Copiar_imagen:** permite el ingreso a la tercera ventana, realizando una copia completa de la imagen ingresada en el NIVEL II.

INSPECCIÓN DE IMÁGENES RADIOGRÁFICAS

Desde este punto se tiene acceso a la tercera ventana, ver la figura 3, del programa haciendo clic en el botón “Copiar Recuadro” de la figura 2, sin olvidar colocar el valor de “Incremento de Imagen”, el mismo que por predeterminado posee el valor de 1.

La función que realiza cada uno de los botones dentro de la figura 3, es descrita a continuación:

- **Calcular parámetros del defecto:** este botón permite el cálculo de las *indicaciones* que se encuentren en la imagen o parte de ella, la misma que proviene de la segunda ventana, sin o con incremento de imagen (zoom). Entregando así, resultados de longitud, ancho, longitud inclinada, porcentaje de longitud y ancho de la *indicación*.

Nota: Antes de presionar el botón “Calcular parámetros del defecto”, se recomienda calibrar el programa haciendo clic en el botón “Calcular parámetros iniciales” de la segunda ventana.

- **Filtros**
 - **Rojo:** esta opción realiza un barrido de lectura sobre toda la imagen y extrae solamente el color rojo de cada pixel y lo imprime nuevamente creando una nueva imagen de diferentes tonalidades del color rojo en un rango de 0 a 255, además debajo de esta opción se encuentra un “textbox” el cual permite que cada pixel rojo se incremente en un porcentaje de 0 a 100. Logrando así, que la imagen mejore su brillo para entregar una mejor tonalidad al momento de realizar la inspección.
 - **Verde y Azul:** estas opciones realizan la misma operación que la del filtro ROJO, para lo cual cada opción extrae su color respectivamente.
 - **Brillo:** a diferencia del filtro rojo, verde y azul, esta opción aumenta o mantiene el brillo de la imagen radiográfica en un rango de 0 a 100%.
- **Pixel RGB:** mediante la lectura del “Pixel, en escala RGB” permite conocer cuál es el valor de cada componente Rojo (R), Verde (G) y Azul (B) de una área en específico. Para así, tener el valor máximo y mínimo de cada componente referente a un pixel.

- **Caracterizar Imagen:** permite conocer la caracterización a negro de la imagen en un rango de 0 a 128.
- **Sumar:** permite la suma individual de la longitud (Y) de las *indicaciones* “Poros – Nidos (CP)” presentes en una radiografía.
- **Evaluar:** permite la comparación automática de la *indicación* con la norma.

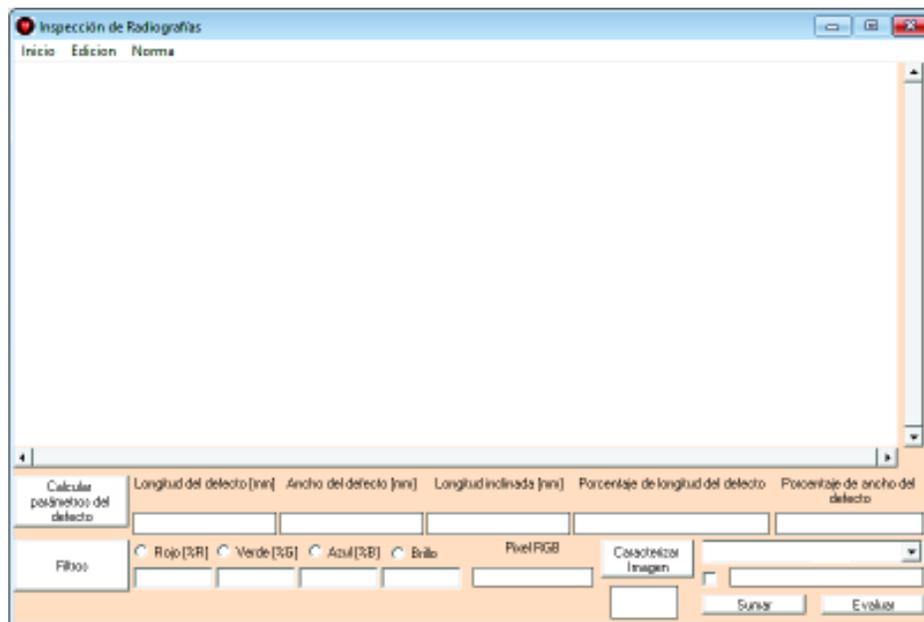


Figura 3. Ventana de análisis radiográfico.
(Fuente: Autores)

Recomendación: antes de iniciar la inspección se debe empezar con la caracterización a negro de la imagen la misma que empieza haciendo clic en el botón “Caracteriza Imagen” y en base a ese resultado se relaciona con la tabla 1 y 2 para seleccionar el valor del filtro idóneo para la imagen a ser inspeccionada.

En caso de no seguir la recomendación el evaluador deberá seleccionar a criterio propio el filtro y su valor porcentual seleccionado. (Ver Metodología)

Como complemento la ventana cuenta con una barra superior de herramientas que se describe a continuación:

- **Inicio**
 - o **Guardar:** permite guardar la imagen en dimensiones 770x335 pixeles.
 - o **Salir:** es la opción para terminar la sesión.

- **Edición**
 - o **Limpiar:** elimina cada una de los datos que hayan sido ingresados en este nivel.

- **Norma**
 - o **API 1104:** activa la opción de comparación de la *indicación* presente en la radiografía con lo establecido por la norma, entregando resultados de aprobación o rechazo.

REPORTE

Concluido el análisis e inspección se emite un reporte final en el cual resume toda la información adquirida, la cual es ingresada dentro de la cuarta ventana. Como se muestra en la figura 4.

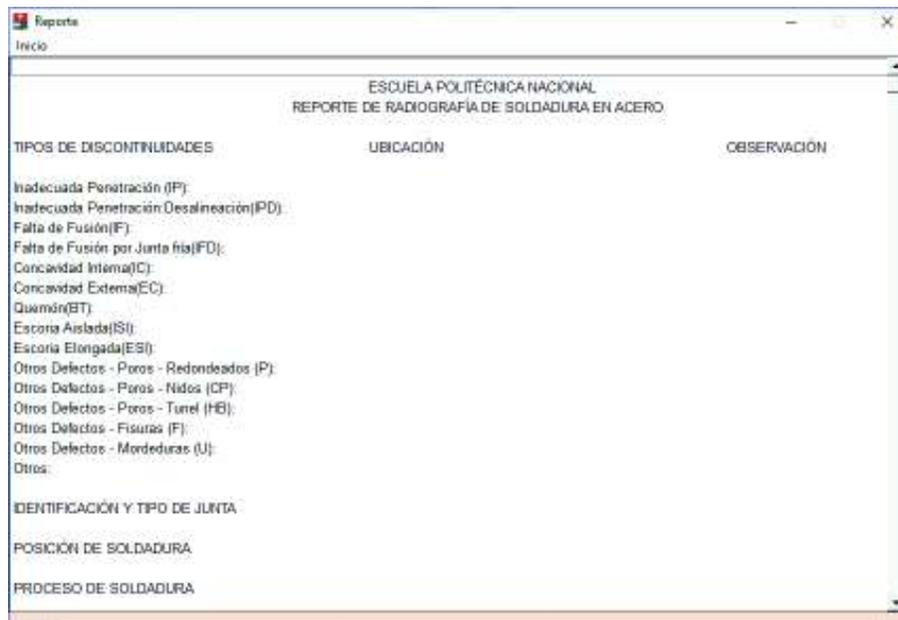


Figura 4. Ventana de reporte.
(Fuente: Autores)

Para ingresar todos los datos se debe hacer uso de la barra de desplazamiento vertical.

Como complemento la cuarta ventana cuenta con una barra superior de herramientas con diversas funciones que se describe a continuación:

- **Inicio**

- **Insertar_Imagen:** permite incluir la imagen analizada (guardada de la tercera ventana), con el fin de mejorar la presentación del reporte.
- **Imprimir_PDF:** permite guardar el documento en formato pdf o imprimir directamente el reporte.
- **Guardar_como_Imagen:** permite guardar el documento en formato jpg.
- **Preview:** permite la apertura de la última ventana, figura 5.
- **Salir:** es la opción para terminar la sesión.

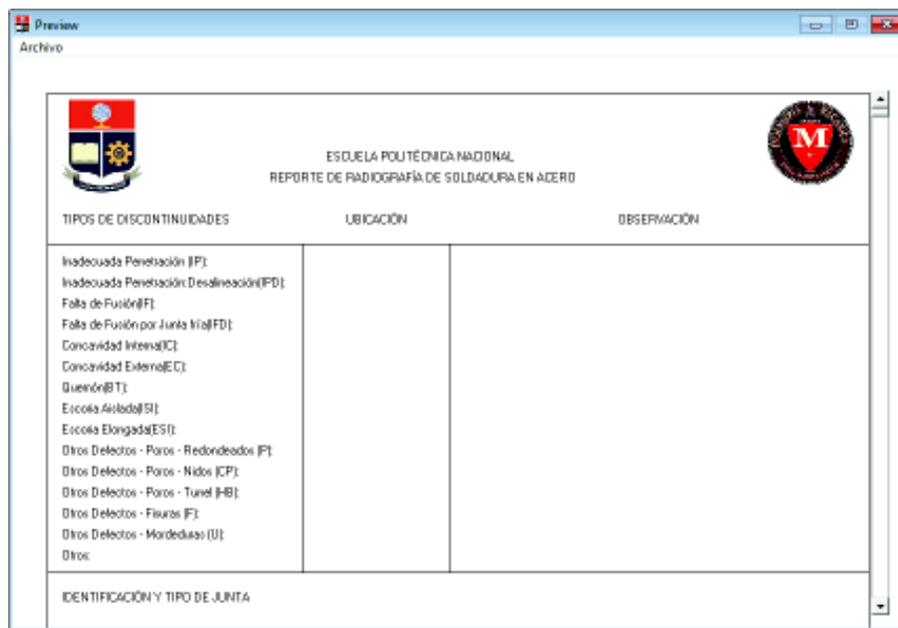


Figura 5. Ventana de preview.
(Fuente: Autores)

Concluido el ingreso de todos los datos que deben ingresarse en el reporte finalmente se realiza una revisión de los mismos con el botón “Preview” de la figura 4.

Como último complemento de la cuarta ventana, se presenta dos opciones que otorga facilidades al usuario, las mismas que se indican a continuación:

- **Inicio**

- **Guardar:** permite guardar el documento en formato jpg.
- **Salir:** es la opción para terminar la sesión.

Anexo 3. Análisis del contorno de una *indicación*

Fuente: Autores

Al realizar la medición de una *indicación* siempre existirá la incertidumbre de los datos adquiridos de las dimensiones del mismo. Para ello siempre se recomienda realizar varias mediciones y tomar como dato la media.

Una *indicación* siempre tendrá un contorno más claro que el propio defecto para que pueda ser visible a simple vista. El mismo que tiene mejor apreciación con el incremento de imagen hasta poder pixelar la misma y distinguir el contorno de una *indicación* con mayor precisión.

Para efecto del proyecto se usa la *indicación* presente en la Placa N° 11 (Anexo 1), en la cual se muestra cómo influye el valor promedio cada uno de los componentes R, G y B del contorno con la *indicación*, logrando mezclarse ambos al tener valor muy cercanos a 255. Debido a que existen diferentes tonalidades de blanco que son muy difíciles de apreciar por el ojo humano, teniendo en cuenta la brillantez que estos provocan descrita por Cevagraf.

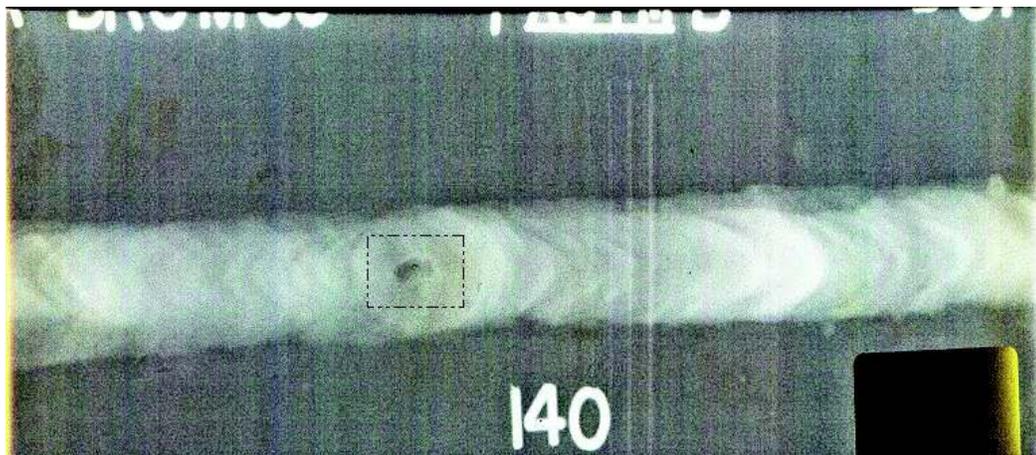


Figura 1. Placa N° 11.
(Fuente: Autores)

En la figura 1 se indica la región a ser analizada, por ello la figura 2 nos muestra dos píxeles enmarcados como A y B, los mismos que son analizados para conocer como es el cambio del promedio de los componentes R, G y B de la escala, hasta llegar a 255.

El pixel A es aquel que representa un punto del contorno de la *indicación*, mientras que el pixel B representa un punto dentro de la *indicación* que posee un valor promedio de los tres componentes (RGB) más cercano a 255.

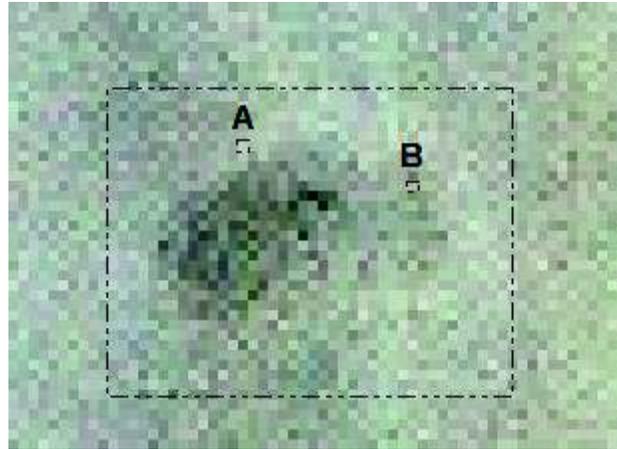


Figura 2. Muestra de los puntos a ser analizados.
(Fuente: Autores)

Mediante la ayuda de Macros – Excel se puede obtener el valor incremental de los pixeles A y B hasta su límite, como se muestra en la figura 3.

Para comprensión de las figura 3, se establece que el valor inicial promedio de cada uno de los puntos se le asocia el 0% de luminosidad, para así conocer porcentualmente el incremento de sus promedios hasta tomar el valor de 255 (x%).

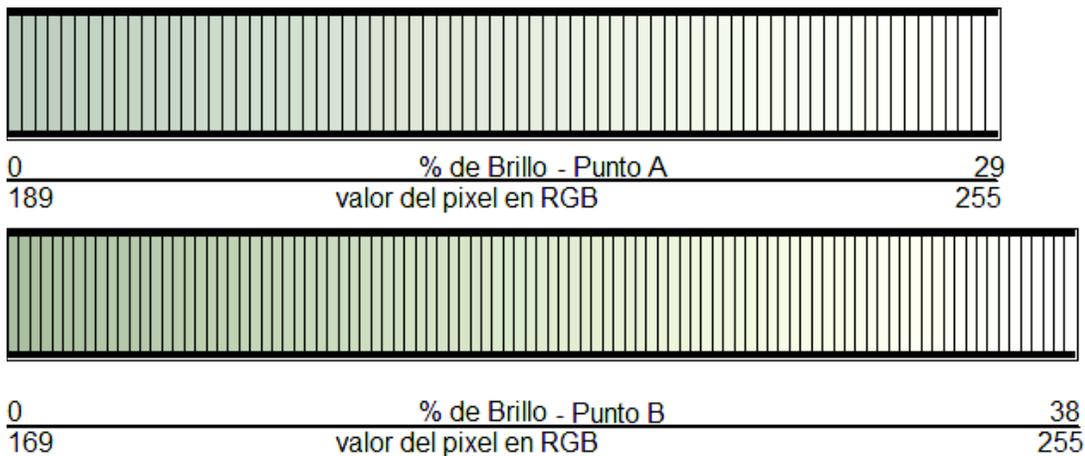


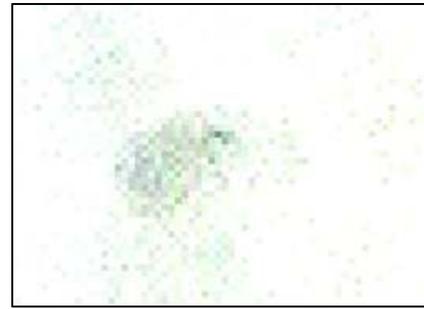
Figura 3. Relación de luminosidad entre el punto A y B.
(Fuente: Autores)

Resultando así que:

- El 38% de brillantez analizado del punto B, la *indicación* ya se mezcla con el contorno.
- El 29% de brillantez analizado del punto A, se mezcla a un nivel inferior que el análisis del punto. Como se aprecia en la figura 4.



29% de brillo



38% de brillo

Figura 4. Porcentaje máximo de luminosidad entre el punto A y B.
(Fuente: Autores)

Por ende para tener una mejor apreciación a la sensibilidad del ojo se toma el 50% de brillantez obtenida para uno de los puntos A y B. Logrando tener el 19% para el punto B y el 14% para el punto A, mostrando estos resultados en la figura 5.



14% de brillo



19% de brillo

Figura 5. Porcentaje máximo de luminosidad entre el punto A y B.
(Fuente: Autores)

Como conclusión se usa el análisis de un punto dentro de la *indicación* encontrada debido a que ésta logra que el contorno resalte y la *indicación* se aprecie de mejor manera.