

Desarrollo de una Metodología para la Obtención de Diagramas de Exposición Radiográfica para Probetas de Acero y Aluminio Mediante el Uso de un Equipo Generador de Rayos X

Cely, Mauricio¹; Jami, Bolívar²; Sotomayor, Verónica²

¹Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador

Resumen: Para un operador de un equipo generador de rayos X es importante conocer la mejor técnica que le brinde eficiencia en el ensayo y ahorro de tiempo en una inspección radiográfica para poder obtener mejores resultados y brindar un mejor servicio por ensayo no destructivo. En el presente artículo se desea obtener nuevos diagramas de exposición para probetas de acero estructural ASTM A-36 y aluminio común, de acuerdo al estado actual del equipo y en base al análisis de las densidades obtenidas en radiografías de cuñas escalonadas expuestas a diferentes tiempos y energías de exposición, con el propósito de lograr una eficiencia en el proceso y reducir los tiempos empleados en este tipo de Ensayo No Destructivo. Dado que solo se cuenta con diagrama de exposición para el acero estructural A-36, en este artículo se obtuvo también un diagrama de exposición para poder realizar evaluaciones en aluminio común, extendiendo así el campo de conocimiento y aplicación de la Radiografía Industrial. Al final se realizaron ensayos en probetas de acero soldadas con el uso del nuevo diagrama de exposición y también una comparación de la calidad radiográfica y sensibilidad entre el método de multiplicación por factores y con el nuevo diagrama de exposición, donde se obtuvieron resultados favorables ya que se optimizaron tiempos de cálculos que ayudarán a mejorar los procesos de ensayos en radiografía industrial como ensayo no destructivo, además, que se tiene la posibilidad de aplicación de un programa para calcular los tiempos de exposición que es didáctico y adecuado para la enseñanza.

Palabras clave: diagrama de exposición, cuña escalonada, película radiográfica, rayos x, radiografía industrial.

Development of a Methodology for Obtaining Radiographic Exposure Charts for Steel and Aluminum Specimens by Using an X-Ray Equipment Generator

Abstract: For an operator of an X-ray generator equipment is important to know the best technique that will provide efficiency in the test and time saving in a radiographic inspection in order to obtain better results and provide a better service for non-destructive testing. In the present project will want to obtain new exposure charts to test pieces of Structural Steel A-36 and common aluminum, in accordance with the current state of the equipment and on the basis of the analysis of the densities obtained in X-rays of stepwedges exposed to different times and energies of exposure with the purpose to achieve an efficiency in the process and reduce the time spent on this type of non-destructive Testing. Given that only account with a diagram of exposure for the Structural steel ASTM A-36, this project was also obtained an exposure chart in order to carry out evaluations in common aluminum, thus extending the field of knowledge and the application of industrial radiography. At the end tests were conducted in test plates welded steel with the use of the new exposure chart and also a comparison of the radiographic quality and sensitivity between the method of multiplication by factors and with the new diagram of exposure, where favorable results were obtained since calculation times were optimized that will help to improve the processes of tests in industrial radiography as a non-destructive test, in addition, that it is possible to apply a program to calculate exposure times that is didactic and suitable for teaching.

Keywords: exposure chart, stepwedge, radiographic film, x-rays, industrial radiography.

1. INTRODUCCIÓN

Un diagrama de exposición es aquel que muestra la relación existente entre el espesor del material, la energía y tiempo de exposición. Estos diagramas de exposición sirven para determinar el tiempo de exposición a la radiación de un objeto y generalmente están disponibles y dados por los fabricantes de los equipos de Rayos X.

Normalmente, los diagramas de exposición vienen elaborados en referencia al acero, lo que dificulta en cierto modo la aplicación para otros tipos de materiales como el aluminio. En este trabajo se pretende elaborar un diagrama de exposición para el acero y aluminio, en base a los parámetros y variables utilizados durante el ensayo; con el propósito de evitar el uso de factores de corrección para obtener los tiempos de exposición.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Radiografía industrial X

La radiación utilizada en Radiografía Industrial son ondas electromagnéticas con la misma naturaleza de la luz, a diferencia que la energía de esta radiación es mayor a la energía de la luz normal; con longitudes de onda pequeñas y cumplen con todas las propiedades de la luz.

a) Equipo de rayos X

El equipo de rayos X consta generalmente de cuatro partes fundamentales:

- Tubo de rayos X
- Consola de control
- Generador de alta tensión
- Sistema de enfriamiento

b) Factores que rigen la exposición

A manera general, la densidad de una imagen radiográfica depende de la cantidad de radiación absorbida debido a la emulsión sensible de la película. Esta cantidad de radiación depende de varios factores como: cantidad de radiación emitida, cantidad de radiación que llega al objeto, proporción de radiación que atraviesa el objeto y la acción de pantallas de intensificación si se utilizan.

Los factores que rigen la exposición son los siguientes:

- Radiación emitida por la fuente
- Distancia fuente-película
- Ley inversa del cuadrado de la distancia
- Selección de la energía de radiación

c) Cálculo del tiempo de exposición

Obtener el tiempo de exposición para rayos X presenta una cierta dificultad dada la complejidad de algunos equipos, los controles y los espectros de energía.

Es posible preparar curvas de exposición con condiciones determinadas como: tipo de película, distancia fuente-película, corriente y tiempos de exposición, teniendo en cuenta las variaciones para el kilovoltaje con el uso del equipo, siendo necesario hacer pruebas de exposición hasta obtener la densidad deseada. Los diagramas de exposición dados por el fabricante pueden usarse como guía para las pruebas, los resultados obtenidos sirven para corregir y adaptar dichas curvas a las condiciones de funcionamiento del equipo. Los factores de corrección para obtener tiempos de exposición son los siguientes:

- Factor de corrección por película
- Factor de corrección por densidad
- Factor de corrección de distancia
- Factor de corrección del material

2.2. Película Radiográfica

Las películas radiográficas utilizadas en los Ensayos No Destructivos, destinados a radiografía industrial, normalmente constan de una emulsión, una especie de gelatina que constituye un compuesto de haluro de plata sensible a la radiación, adherida a un soporte de nitrato de celulosa transparente, ligeramente flexible y azulada.

a) Características de las películas

Densidad. - La densidad o grado de ennegrecimiento depende de la intensidad de radiación absorbida por la emulsión.

Definición. - En una película radiográfica, la definición se denomina a la nitidez que presentan los contornos de la imagen. La falta de nitidez se puede corregir aumentando la distancia fuente-película y reduciendo la distancia objeto-película.

Contraste. - El contraste de una imagen radiográfica se define como la variación de brillo relativo entre una imagen y la imagen de fondo adyacente.

b) Densitómetro

Un densitómetro es utilizado para medir con precisión la densidad óptica en cualquier punto de una película radiográfica, con un área de medida aproximada de 1 mm^2 y un rango de medición desde 0 a 4.



Figura 1. Densitómetro de bolsillo (ESECO, 2016, pág. 1)

Es muy importante calibrar estos instrumentos, especialmente alrededor de los valores mínimos de densidad establecidos en códigos o normas para poder facilitar la interpretación radiográfica. Este instrumento de medición se muestra en la Figura 1.

c) Indicadores de calidad de imagen

El objetivo de un técnico radiólogo debe ser conseguir la mejora calidad de imagen posible para el objeto radiografiado, para lo cual se ha establecido una comparación en la imagen por medio de los llamados indicadores de calidad de imagen (ICI) o penetrámetros.

A manera general se tiene 2 tipos de ICI; los de tipo taladro y los de tipo hilo

2.3. Diagrama de exposición

Un diagrama de exposición se define como un gráfico que muestra la relación entre el espesor del material, kilovoltaje y tiempo de exposición y es similar al que se muestra en la Figura 2.

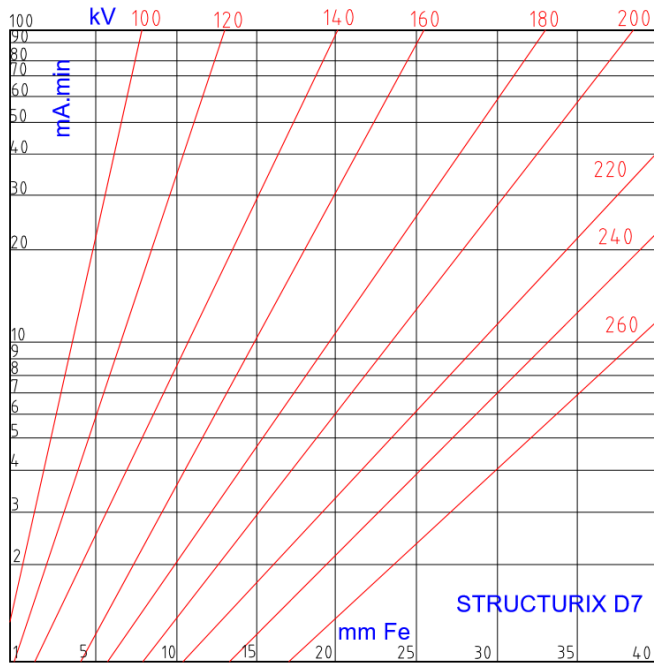


Figura 2. Diagrama de exposición (NDT Resource Center, 2016)

Antes de obtener el diagrama de exposición final, es útil obtener en primer lugar el diagrama “Densidad vs Espesor” para un rango de voltaje específico en el equipo de rayos X y finalmente el diagrama “Tensión vs Espesor”. Las dos gráficas preliminares se generan en base a los siguientes parámetros:

- Equipo de rayos X
- Filtro
- Distancia fuente – película
- Material
- Pantalla intensificadora

- Tipo de película
- Densidad
- Proceso de revelado

a) Factor de equivalencia

Cuando se realiza el ensayo de Radiografía Industrial para un material diferente del acero, se recomienda el uso de un factor de equivalencia para el material, el cual es un factor por el cual el espesor de un material ensayado debe ser multiplicado para poder obtener un espesor “standard”, generalmente en base del acero.

b) Cuña escalonada

La obtención de un diagrama de exposición requiere el uso de una cuña escalonada, que es una cuña de pasos (o escalerilla) que cuenta con diferentes espesores del mismo material para el cual se diseña el diagrama de exposición.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la fabricación de las cuñas escalonadas se utiliza acero estructural ASTM A-36 y aluminio común importando, los cuales serán sometidos a mecanizado por CNC para obtener las escalerillas. Tanto para las escalerillas de acero y aluminio se utilizan las variables que se describen en la Tabla 1. Para efectos de este artículo se denominarán a los materiales utilizados en base a su proceso de mecanizado, para la probeta de acero se la denominará como cuña de acero mecanizado y para la de aluminio como cuña de aluminio mecanizada.

Tabla 1. Variables y parámetros de exposición

Equipo de rayos X	Baltographe 200-10
Filtro	No aplica
Distancia fuente-película	50 cm
Pantalla intensificadora	Láminas de plomo ≈ 0.027 mm
Tipo de película	D7
Densidad	2.0
Proceso de revelado	Manual de acuerdo a ASTM E94 a temperatura ambiente

Para la cuña de acero mecanizada se trabaja en un rango de tensión de 100 a 160 kV, con 5 mA y con tiempos de 1, 2 y 3 minutos de exposición. Para el caso de la cuña de aluminio mecanizada se trabaja en el rango de tensión de 50 a 120 kV, con 5 mA y con tiempos de 15, 30, 45 y segundos de exposición.

Se realiza la exposición de las probetas sobre las películas radiográficas, con los parámetros y variables fijados; luego de lo cual, estas películas serán sometidas al proceso de revelado manual para obtener la imagen radiográfica visible. De estas radiografías reveladas, se toma el valor de densidad de cada espesor de las escalerillas sometidas a diferentes tiempos de exposición, tanto para la cuña de acero mecanizada como para la cuña de aluminio mecanizada.

4. OBTENCIÓN DE DIAGRAMAS

4.1. Obtención de diagramas preliminares

Los valores de densidades obtenidos son graficados en función del espesor del material del que se obtuvieron los valores. Los puntos obtenidos se unen de acuerdo a un voltaje en particular y se obtiene una curva. El resultado de estos puntos es el diagrama “Densidad vs Espesor”, que como resultado de este artículo se muestran para la cuña de acero mecanizada a 300 mA.s, 600 mA.s y 900 mA.s como se muestran en las Figura 3 y 4 respectivamente.

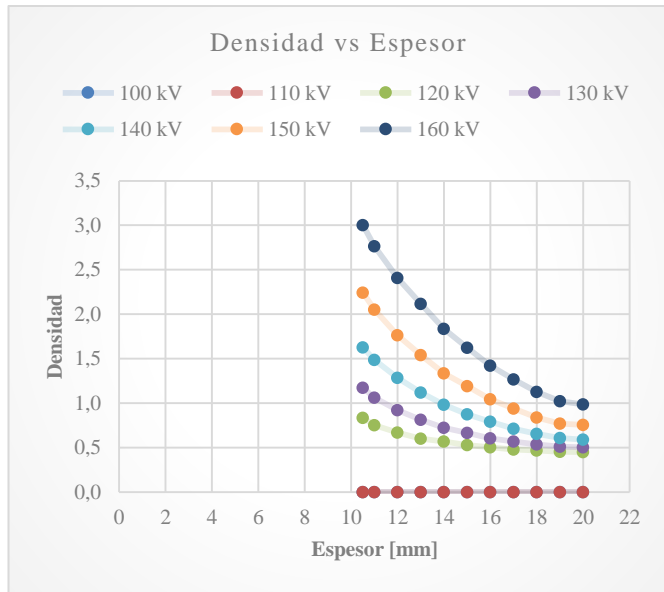


Figura 3. Diagrama “Densidad vs Espesor” a 300 mA.s

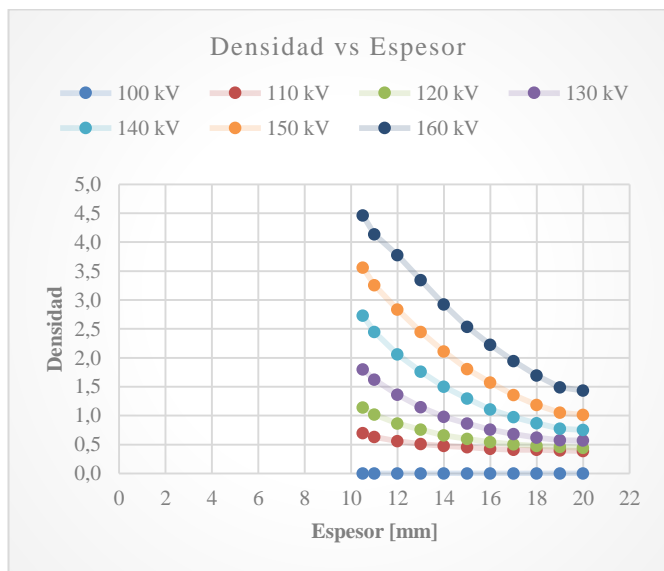


Figura 4. Diagrama “Densidad vs Espesor” a 600 mA.s

La grafica “Densidad vs Espesor” proporciona datos necesarios para el diagrama de exposición final, y con el propósito de evitar inexactitudes se eliminan curvas con datos fuera de lo común o del rango de medición del densitómetro y se prepara un nuevo diagrama para un valor de densidad de 2.0.

Esta nueva gráfica es la “Tensión vs Espesor”, en donde se obtienen puntos relativos a la misma serie de exposiciones los cuales se unen y se obtienen curvas para 300 mA.s, 600 mA.s y 900 mA.s que se muestran en la Figura 5.

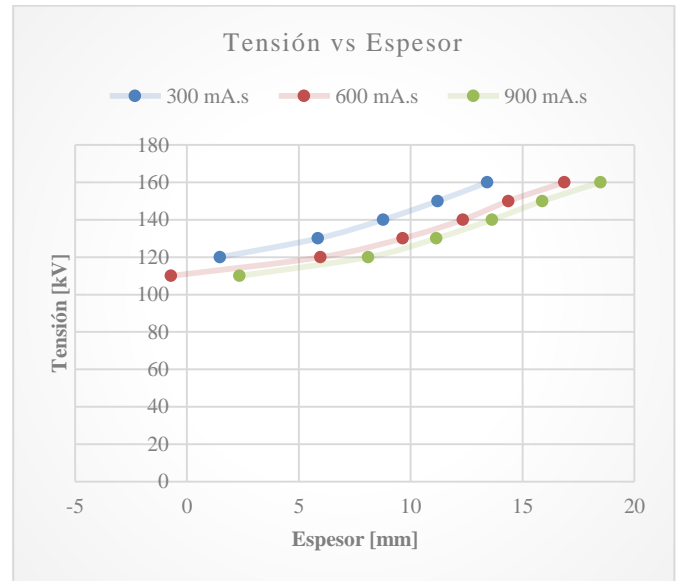


Figura 5. Diagrama “Tensión vs Espesor” para el acero

4.2. Diagrama de exposición

El diagrama de exposición se realiza sobre papel semilogarítmico. El espesor (en mm) en el eje horizontal y el valor de exposición (mA.s) en el eje vertical. Para un kilovoltaje dado (por ejemplo 140 kV), usando la tabla de kV en función del espesor (ver Figura 5) se determina que para una dosis de exposición de 300 mA.s a una densidad de 2 se tiene un espesor de 8.78 mm, para una dosis de exposición de 600 mA.s se tiene un espesor de 12.28 mm y para una dosis de exposición de 900 mA.s se tiene un espesor de 13.80 mm.

Se unen estos puntos experimentales ensayados y se obtiene la exposición para 140 kV. Los resultados se muestran en la Figura 6.

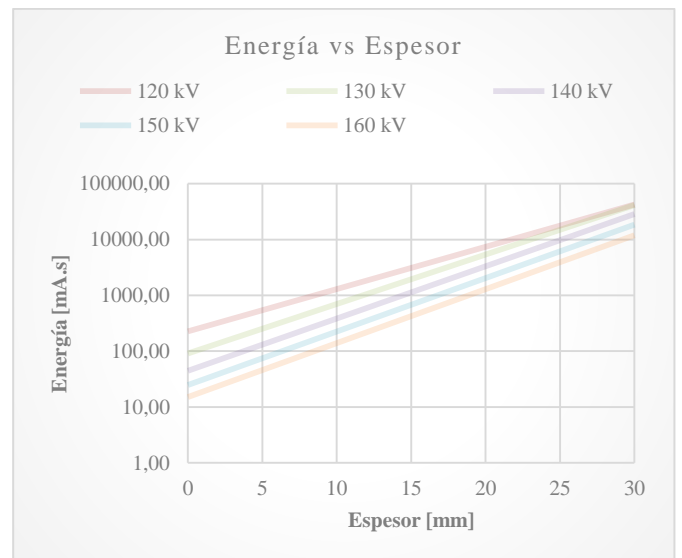


Figura 6. Diagrama de exposición para el acero

Para el caso de la cuña de aluminio mecanizada se sigue el mismo procedimiento descrito para el acero, utilizando líneas de tendencia en las curvas para poder obtener los puntos de intersección exactos. El diagrama de exposición para la cuña de aluminio mecanizada se muestra en la Figura 7.

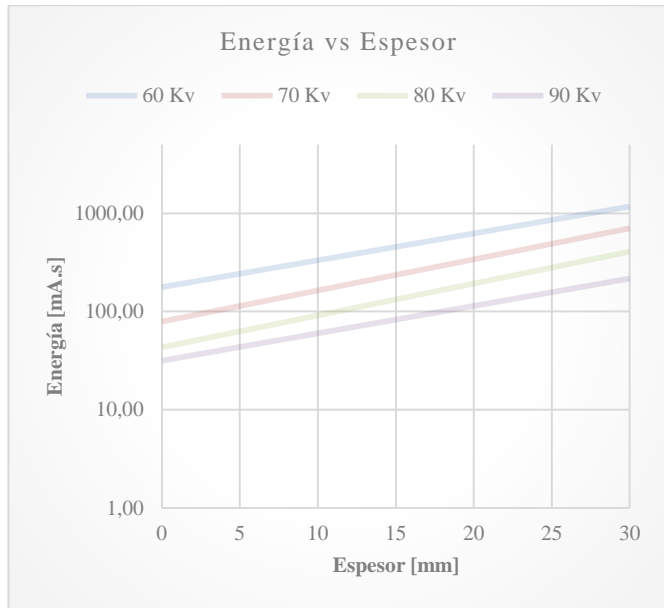


Figura 7. Diagrama de exposición para el aluminio

5. ANÁLISIS

El análisis se realiza en base a pruebas sobre placas soldadas de acero estructura ASTM A-36, en las cuales se comparará de manera cualitativa, en base a normas y códigos estructurales internacionales como la AWS D1.1, API 1104 y ASME V, la calidad de imagen radiográfica y el grado de sensibilidad entre el método de multiplicación de factores y el nuevo diagrama de exposición obtenido.

5.1. Multiplicación de factores

Los factores de corrección por densidad y película son dados por el fabricante de película radiográfica, la marca asociada a al tipo de película empleada es una STRUCTURIX D7 y el valor del factor de distancia es dado por el manual del equipo generador de rayos X. Estos valores son los siguientes:

$$f_n = 2.2; f_p = 2.2; f_D = 2.2$$

Ubicando el espesor y obteniendo el tiempo de exposición del diagrama dado por el fabricante, se obtiene la ecuación siguiente:

$$t_{exp} = t_c f_n f_p f_D f_v \quad (1)$$

Donde:

t_{exp} : Es el tiempo de exposición radiográfico.

t_c : Es el tiempo obtenido del diagrama del equipo generador de rayos X para el espesor requerido.

f_n : Es el factor de densidad de película, dato que es dado por el fabricante de película radiográfica. También es un dato sugerido por el equipo generador de

rayos X según los valores de Kv seleccionados y el tipo de gráfica de exposición requerido.

f_p : Es el factor de película radiográfica, dato que es dado por el fabricante de película radiográfica.

f_D : Es el valor del factor de distancia, dato que es sugerido por el manual del equipo generador de rayos X para tomas radiográficas.

f_v : Es el factor que corresponde a varios, este dato se lo toma como 1, ya que se tiene la operación con un equipo generador de rayos X con su calibración anual requerida y que cumple con las exigencias de la SCAN (Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares).

La Tabla 2 muestra un resumen con los datos más relevantes y resultados de tiempos de exposición para las probetas ensayadas

Tabla 2. Resumen de tiempos de exposición por multiplicación de factores

Probeta	Espesor [mm]	Tensión [kV]	Distancia fuente-película [cm]	Tiempo de exposición
A	11,5	140	50	2 min 02 s
B	12,8	160	50	1 min 18 s
C	8,3	140	50	0 min 54 s
D	19,85	160	30	1 min 51 s
E	19,4	160	30	1 min 47 s
F	11,25	140	50	1 min 54 s
G	8,8	140	50	0 min 59 s
H	21,1	160	30	2 min 42 s
I	13,75	160	50	1 min 34 s
J	14,2	160	50	1 min 43 s

5.2. Diagrama de exposición obtenido

Con el empleo de las ecuaciones de tendencia obtenidas de los diagramas de exposición, y con el uso de un programa realizado en Matlab, se obtienen los tiempos de exposición que se muestran en la Tabla 3

Tabla 3. Resumen de tiempos de exposición del diagrama obtenido

Probeta	Espesor [mm]	Tensión [kV]	Distancia fuente-película [cm]	Tiempo de exposición
A	11,5	140	50	1 min 46 s
B	12,8	160	50	0 min 52 s
C	8,3	140	50	0 min 53 s
D	19,85	160	30	1 min 30 s
E	19,4	160	30	1 min 21 s
F	11,25	140	50	1 min 41 s
G	8,8	140	50	0 min 59 s
H	21,1	160	30	1 min 59 s
I	13,75	160	50	1 min 04 s
J	14,2	160	50	1 min 11 s

5.3. Revelado

Como siguiente punto se realiza el proceso del revelado de las películas radiográficas, las cuales fueron procesadas en el cuarto oscuro con tiempos recomendados por el fabricante, como se muestra a continuación:









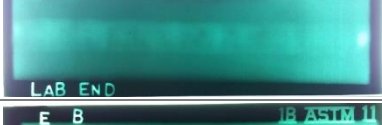

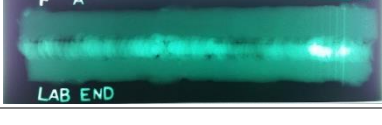
- Revelado : 5 min






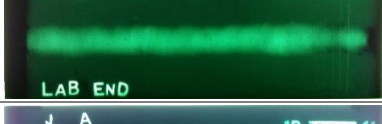

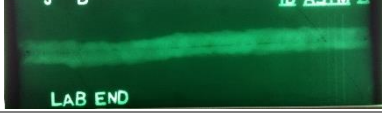
- Enjuague : 2 min
- Fijación : 10 min
- Lavado : 5 min
- Secado : 3 – 4 horas

5.4. Visualización

Una vez que las radiografías están totalmente secas, con el uso del negatoscopio se procede a observar y analizar de manera cualitativa las mismas. Las radiografías ensayadas por el método de la multiplicación de factores tienen la designación A y las ensayadas en el diagrama de exposición obtenido se designan por la letra B. Las radiografías obtenidas se muestran en la Tabla 4

Tabla 4. Radiografía de probetas ensayadas

Probeta	Método	Radiografía
A	A	
	B	
B	A	
	B	
C	A	
	B	
D	A	
	B	
E	A	
	B	
F	A	

G	B	
	A	
H	B	
	A	
I	B	
	A	
J	B	
	A	

A continuación, se realizará el cálculo para obtener el porcentaje de diferencia entre los valores del tiempo de exposición por el método de multiplicación de factores con el método del diagrama de exposición obtenido. Estos resultados se muestran en la Tabla 5 para 160 kV y Tabla 6 para 140 kV.

Tabla 5. Diferencia en porcentajes para 160 kV.

Probeta	Tensión [kV]	Diagrama de Exposición	Tiempo de Exposición [s]	Diferencia [%]
B	160	A	78	33,33
		B	52	
D	160	A	111	18,92
		B	90	
E	160	A	107	24,30
		B	81	
H	160	A	162	26,54
		B	119	
I	160	A	94	31,91
		B	64	
J	160	A	103	31,07

Tabla 6. Diferencia en porcentajes para 140 kV.

Probeta	Tensión [kV]	Diagrama de Exposición	Tiempo de Exposición [s]	Diferencia [%]
---------	--------------	------------------------	--------------------------	----------------

A	140	A	122	13,11
		B	106	
C	140	A	54	0,00
		B	54	
F	140	A	100	14,00
		B	114	
G	140	A	59	0,00
		B	59	

5.5. Grado de sensibilidad

Cuando la sensibilidad se expresa en porcentaje en función del espesor del objeto, el valor más bajo registrado demuestra una mayor sensibilidad radiográfica, por lo tanto, una mejor calidad de imagen. Es importante conocer el grado de sensibilidad de la radiografía en porcentaje y estos valores se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Grado de sensibilidad de las radiografías

Probeta	Diagrama de Exposición	# de hilos visibles	Hilo menor visible [mm]	Grado de sensibilidad [%]			
A	A	6	0,25	2,17			
	B	6	0,25	2,17			
B	A	5	0,33	2,58			
	B	6	0,25	1,95			
C	A	6	0,25	3,01			
	B	6	0,25	3,01			
D	A	5	0,33	1,66			
	B	5	0,33	1,66			
E	A	5	0,33	1,70			
	B	6	0,25	1,29			
F	A	6	0,25	2,22			
	B	6	0,25	2,22			
G	A	6	0,25	2,84			
	B	6	0,25	2,84			
H	A	4	5	0,40	0,33	1,90	1,56
	B	5	6	0,33	0,25	1,56	1,18
I	A	5	0,33	2,40			
	B	6	0,25	1,82			
J	A	6	0,25	1,76			
	B	6	0,25	1,76			

5.6. Análisis

De la Tabla 4 se puede observar que las radiografías obtenidas por el método de la multiplicación de factores presentan características similares a las radiografías obtenidas por el método del diagrama de exposición obtenido; con la única diferencia en el tiempo de exposición. En las dos radiografías obtenidas para cada probeta por cada método se pueden visualizar las mismas discontinuidades; con la diferencia en que las radiografías obtenidas por los tiempos del nuevo diagrama de exposición presentan una mayor definición y un mejor contraste.

Para las probetas ensayadas con el método de multiplicación de factores se requiere un mayor tiempo de exposición como se muestran en la Tablas 5 y 6. En la Tabla 5, para las probetas ensayadas con una Tensión de 160 kV se tiene una diferencia de tiempos de exposición en porcentaje por encima del 18% hasta un valor aproximado del 33%. De acuerdo a estos valores, conforme el espesor de la probeta aumenta el porcentaje de diferencia en los tiempos de exposición disminuye cuando se trabaja con una tensión de 160 kV.

De la Tabla 6, en donde se ensayaron probetas con una tensión de 140 kV se tiene que, para los espesores aproximados a valores de 8 mm, la diferencia del tiempo de exposición entre los dos métodos no varía; pero para valores de espesores aproximados a 13 o 14 mm ya se tiene un porcentaje de diferencia entre estos valores, teniendo una menor diferencia entre valores de tiempos de exposición cuando se tiene un menor espesor. En esta parte se repite la misma tendencia de las probetas que se ensayaron a 160 kV, conforme se aumenta el espesor de la probeta a ensayar, el porcentaje de diferencia entre tiempos de exposición disminuye.

Para que una radiografía sea aceptada siempre se debe evaluar su calidad de imagen radiográfica, lo cual se lo realiza en base a los ICI tipo hilos para este caso. La norma AWS D1.1 indica el alambre de espesor mínimo que se debe visualizar en la radiografía de acuerdo al espesor ensayado, y todas las radiografías obtenidas por los dos métodos muestran el alambre mínimo visible, inclusive algunas muestran todos los alambres del set del ICI.

Ahora es necesario realizar una comparación en el grado de sensibilidad de la radiografía entre los diagramas. Analizando la Tabla 7, se tiene que la gran cerca del 50% de las probetas ensayadas con los tiempos del nuevo diagrama de exposición, presentan una mayor sensibilidad en comparación a las probetas ensayadas con el método de multiplicación de factores, brindando así una mejor calidad de imagen.

6. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el proceso experimental se puede concluir que con la metodología planteada se logró obtener de manera satisfactoria los diagramas de exposición para probetas de acero estructural ASTM A-36 estudiado para un equipo generador de Rayos; los cuales pueden ser utilizados para ensayos o trabajos futuros.

Las radiografías obtenidas con este nuevo diagrama de exposición son aceptables, ya que en su gran mayoría presentan mejores características que las radiografías obtenidas por el método de la multiplicación de factores; estas radiografías presentan una mejor definición, un mejor contraste y mayor grado de sensibilidad, lo que permite una mejor evaluación y detección de discontinuidades en elementos o componentes mecánicos.

Para el caso de las probetas de acero; con el nuevo diagrama de exposición se obtuvieron menores tiempos de exposición en comparación al método de multiplicación por factores. De

acuerdo al trabajo presentado por Cely, M., & Sotomayor, con nombre *Pinhole Imaging Standard Method in the Determination of the Focal Spot of an X-Ray Tube for the Evaluation of Quality of Radiographic Images of Welded Joints*; el tamaño real del foco del equipo es 5.9 mm que es un valor muy diferente al teórico que es de 4.52 mm, lo que como consecuencia puede dar una mayor área de impacto para los electrones, generando así una mayor cantidad de energía de radiación y así disminuyendo el tiempo de exposición para las probetas.

Debido al largo tiempo de vida útil del equipo, éste ha sufrido un desgaste considerable, como consecuencia se tienen el aumento del tamaño del foco, disminución de los tiempos de exposición, disminución del rango de tensión de trabajo de 200 Kv como máximo valor nominal a 160 Kv como máximo valor de trabajo, lo que dificultó obtener una mayor cantidad de datos para obtener el nuevo diagrama de exposición.

El equipo generador de rayos X del Laboratorio de Ensayos No Destructivos tiene un tiempo de vida considerable, por lo cual fue importante obtener un diagrama de exposición de acuerdo al estado y condiciones del equipo y materiales utilizados en el ensayo, con el fin de lograr una eficiencia en el proceso, disminuir tiempo y reducir costos.

La metodología desarrollada en este artículo también puede ser utilizada para la obtención de diagramas de exposición para otros tipos de materiales como cobre, bronce, algunos materiales compuestos, etc., con el propósito de ampliar el campo de aplicación de las radiaciones y comprender el comportamiento de la radiación en estos tipos de materiales.

Conforme se aumenta la tensión de trabajo utilizada para la exposición, el porcentaje en la diferencia de tiempos aumenta; también se tiene que, para una misma tensión de trabajo utilizada, conforme se aumenta el espesor de la probeta el porcentaje en la diferencia de tiempos entre los dos diagramas de exposición disminuye.

REFERENCIAS

- Alcaraz Baños, M. (18 de Octubre de 2009). *El Equipo de Rayos X*. Murcia, España.
- Alcaraz Baños, M. (s.f.). *Universidad de Murcia*. Obtenido de <https://webs.um.es/mab/miwiki/lib/exe/fetch.php?id=lecciones&cache=cache&media=lectura-10.pdf>.
- American Society of Testing Materials. (2010). *Standard Guide for Radiographic Examination E94*. ASTM E94.
- American Welding Society D1.1. (2015). *Código de Soldadura Estructural - Acero*. Estados Unidos de America: American Welding Society.
- Askeland, D., & Phulé, P. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: Thomson.
- ASME V. (1 de Julio de 2015). *Boiler & Pressure Vessel Code*. New York, Estados Unidos de America: ASME.
- Balteau. (1991). *Manuel D'emploi et D'entretien*. Serbia.
- Cely, M. & Sotomayor, V. (2017). *Pinhole Imaging Standard Method in the Determination of the Focal Spot of an X-Ray Tube for the Evaluation of Quality of Radiographic Images of Welded Joints*. 26th ASNT Research Symposium. Jacksonville, Florida. EEUU.
- Departamento de Aeronáutica. (2006). *Radiografía Industrial*. Departamento de Aeronáutica.
- Disfruta las Matemáticas. (2011). *Porcentaje de diferencia y*. Obtenido de <http://www.disfrutalasmaticas.com/datos/porcentaje-diferencia-error.html>.
- ESECO. (Abril de 2016). *ESECO*. Obtenido de <http://www.eseco-speedmaster.com/NDT.html>.
- Finestres Zubeldia, F. (s.f.). *Protección en Radiología odontológica*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Garza, H. (2014). *Slideplayer*. Obtenido de <http://slideplayer.es/slide/2357372/>
- General Electric. (2005). *Sistemas radiográficos de película*. General Electric Company.
- General Electric Company. (Enero de 2007). *Industrial Radiography*.
- Halmshaw, R. (1995). *Industrial Radiology: Theory and practice*. Pondicherry: Springer-Science.
- Hellier, C. (2003). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. United States of America: McGraw-Hill.
- InMed. (2016). *InMed*. Recuperado el 31 de Mayo de 2016, de <http://www.inmed.com.au/products/quality-assurance-testing/phantoms-test-objects/step-wedges/gammex-radiographic-aluminium-step-wedge/>
- KODAK. (1980). *Radiography in Modern Industry*. New York.
- Laboratorio de Ensayos No Destructivos. (2016). *Guía de Practicas*. Quito.
- Mora Chamorro, H. (2013). *Manual de Radioscopia*. España: Editorial Club Universitario.
- NDT. (Abril de 2012). *NDT*. Obtenido de http://www.ndt.net/article/wcndt2012/workshop/Ewert_WCNDT_Exposure_Diagram_2012_04.pdf
- NDT Resource Center. (9 de Mayo de 2016). *NDT Resource Center*. Obtenido de <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/EquipmentMaterials/radiographicfilm.htm>
- Pazos Peinado, N. (2006). *Tecnología de los Metales y Procesos de Manufactura*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.
- Shekhar, R. (2011 de Febrero de 2011). *Slideshare*. Obtenido de <http://www.slideshare.net/ravrak/intro-to-radiography-12ndt>
- Torres M., N., Torres S., M., & Montanez, J. J. (1988). *Radiografía Industrial X y Gamma*. Bogotá: Instituto de Asuntos Nucleares.
- Tucci R., A. (2012). *Radiodiagnóstico y Radioterapia*. Londres: Lulu.

Acerca de los autores

Mauricio Cely



Mauricio es Docente a Tiempo Completo en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, en la Facultad de Ingeniería, Escuela de Civil. Es Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional y es Magíster en Ingeniería Mecánica con Mención en Materiales y Procesos de Manufactura. Nació en la ciudad de Machala, en el año de 1987. Cuenta con una certificación ASNT nivel II como inspector en radiografía industrial y ha sido profesor universitario desde el año 2013 hasta la fecha.

Stalin Jami



Graduado como Ingeniero Mecánico en la Escuela Politécnica Nacional, donde los últimos años en la Universidad se desempeñó como ayudante de cátedra en la materia de Ensayos No Destructivos. Actualmente trabajando como Inspector Nivel II en Ensayos No Destructivos en la empresa Servicios de Inspección y Gestión de Calidad (ITQM) en las técnicas de Gammagrafía Industrial, Inspección Visual, Líquidos Penetrantes, Partículas Magnetizables y Ultrasonido (Convencional y Arreglo de Fases).

Verónica Sotomayor



Profesora e Investigadora en la Escuela Politécnica Nacional desde 2014. Su línea de Investigación se centra en el estudio de materiales mediante ensayos no destructivos. Es catedrática en el Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y directora del Laboratorio de Ensayos No Destructivos. Desarrolla su labor docente en la cátedra de Ensayos No Destructivos, también en la enseñanza de asignaturas como Ciencia de Materiales, Desgaste y Falla. Ingeniera Mecánica graduada en la Escuela Politécnica Nacional en 2007. Magister en Materiales Estructurales y Nuevas Tecnologías, en la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, en 2009.