

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Plan de Trabajo de Integración Curricular

Tema: Determinación del Factor de Corrección por el Criterio de Penumbra  
Geométrica para el Cálculo de Tiempos de Exposición en Soldaduras

AUTOR:

Daniel Emil Borja Estupiñán

QUITO DM, NOVIEMBRE DE 2023

## Contenidos

|       |  |   |
|-------|--|---|
| 1.    | CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....                              | 1 |
| 1.1   | Justificación .....  | 1 |
| 1.2   | Planteamiento del problema.....                            | 2 |
| 1.3   | Objetivos.....   | 3 |
| 1.3.1 | Objetivo general .....                                     | 3 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos .....                                | 3 |
| 1.4   | Alcance .....  | 3 |
| 1.5   | Hipótesis .....  | 3 |
| 1.6   | Operacionalización de la investigación .....               | 4 |
| 2.    | CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....                            | 5 |
| 2.1   | Ensayos no destructivos.....                               | 5 |
| 2.1.1 | Radiografía industrial .....                               | 5 |
| 2.1.2 | Rayos X .....  | 5 |
| 2.1.3 | Equipo de rayos X .....                                    | 5 |
| 2.1.4 | Película radiográfica .....                                | 6 |
| 2.1.5 | Ley inversa de los cuadrados.....                          | 6 |
| 2.2   | Penumbra .....   | 7 |
| 2.3   | Penumbra geométrica .....                                  | 7 |
| 2.3.1 | Obtención de valores adecuados de penumbra geométrica..... | 7 |
| 2.4   | Tiempo de exposición.....                                  | 8 |
| 2.4.1 | Diagrama de exposición .....                               | 8 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.4.2 | Método de cálculo de tiempo de exposición ..... | 9  |
| 3.    | CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....         | 10 |
| 3.1   | Materiales.....                                 | 10 |
| 3.1.1 | Equipo de rayos X .....                         | 10 |
| 3.1.2 | Panel de control .....                          | 10 |
| 3.1.3 | Tubo de rayos catódicos .....                   | 11 |
| 3.1.4 | Cuarto oscuro.....                              | 11 |
| 3.1.5 | Película radiográfica .....                     | 12 |
| 3.2   | Obtención de las probetas .....                 | 12 |
| 3.2.1 | Equipo de soldadura .....                       | 12 |
| 3.2.2 | Placas de acero.....                            | 12 |
| 3.2.3 | Electrodos .....                                | 13 |
| 3.3   | Métodos .....                                   | 14 |
| 3.3.1 | Biselado .....                                  | 14 |
| 3.3.2 | Proceso SMAW .....                              | 14 |
| 3.3.3 | Soldadura de raíz .....                         | 14 |
| 3.3.4 | Soldadura de relleno .....                      | 15 |
| 3.3.5 | Generación de discontinuidades .....            | 15 |
| 3.3.6 | Parámetros del proceso de soldadura.....        | 16 |
| 3.4   | Ensayo de radiografía industrial .....          | 17 |
| 3.4.1 | Cálculo de tiempos de exposición .....          | 17 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.4.2 | Penumbra geométrica teórica para probetas de 12 mm.....   | 20 |
| 3.5   | Generación del factor de corrección de distorsión de imagen por penumbra geométrica .....                                 | 21 |
| 3.5.1 | Penumbra geométrica teórica en placas de 8mm.....   | 22 |
| 3.5.2 | Error entre la Penumbra geométrica Real y Teórica .....   | 22 |
| 3.5.3 | Relación entre penumbra geométrica y tiempo de exposición .....   | 22 |
| 3.5.4 | Factores de corrección por penumbra geométrica para el tiempo de exposición.....  | 27 |
| 4.    | CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....   | 29 |
| 4.1   | Presentación de resultados .....  | 29 |
| 4.1.1 | Diagramas de factores de corrección por el criterio de penumbra geométrica para la ecuación de tiempos de exposición..... | 29 |
| 4.2   | Análisis de resultados .....  | 35 |
| 4.2.1 | En cuanto a los errores relativos entre penumbra geométrica real y penumbra geométrica teórica.....                       | 35 |
| 4.2.2 | En cuanto a la diferencia entre el tiempo de exposición teórico y el tiempo de exposición corregido.....                  | 38 |
| 4.2.3 | En cuanto a los factores de corrección por penumbra geométrica para el tiempo de exposición.....                          | 40 |
| 5.    | CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 41 |
| 5.1   | Conclusiones.....   | 41 |
| 5.2   | Recomendaciones .....   | 42 |
| 6.    | Bibliografía.....   | 43 |
| 7.    | Anexos.....   | 45 |

## Contenidos de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Características del equipo de rayos X .....                                  | 6  |
| Figura 2 Representación gráfica de la penumbra geométrica.....                        | 8  |
| Figura 3 Ejemplo de diagrama de exposición para radiografías .....                    | 9  |
| Figura 4 Panel de control.....  | 10 |
| Figura 5 Tubo de rayos catódicos.....   | 11 |
| Figura 6 Cuarto oscuro .....  | 11 |
| Figura 13 Equipo Eliweld TIG 200A .....   | 12 |
| Figura 7 Placas de acero ASTM A-36 de 150x50x12 .....                                 | 13 |
| Figura 8 Electrodo 6011 y 7018 de 1/8 de pulgada .....                                | 13 |
| Figura 9 Placas biseladas con ángulo de 30 grados.....                                | 14 |
| Figura 10 Soldadura de raíz con electrodo 6011 de 1/8 de pulgada.....                 | 15 |
| Figura 11 Relleno de soldadura con electrodo 7018 de 1/8 de pulgada.....              | 15 |
| Figura 12 Placa soldada con formación de porosidades.....                             | 16 |
| Figura 14 Configuración de foco radiográfico en equipo de radiografía de la EPN ..... | 17 |
| Figura 15 Diagrama de exposición utilizado.....                                       | 18 |
| Figura 16 Curva característica de película y factores, Structurix.....                | 19 |
| Figura 17 Ejemplo de uso del diagrama de exposición del equipo .....                  | 25 |
| Figura 18 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 100V.....              | 29 |
| Figura 19 Factores de corrección por penumbra geométrica para 100V.....               | 30 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 20 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 120V..... | 30 |
| Figura 21 Factores de corrección por penumbra geométrica para 120V.....  | 31 |
| Figura 22 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 140V..... | 31 |
| Figura 23 Factores de corrección por penumbra geométrica para 140V.....  | 32 |
| Figura 24 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 160V..... | 32 |
| Figura 25 Factores de corrección por penumbra geométrica para 160V.....  | 33 |
| Figura 26 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 180V..... | 33 |
| Figura 27 Factores de corrección por penumbra geométrica para 180V.....  | 34 |
| Figura 28 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 200V..... | 34 |
| Figura 29 Factores de corrección por penumbra geométrica para 200V.....  | 35 |

## Contenidos de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Parámetros de trabajo de soldadura probeta 1 .....   | 16 |
| Tabla 2 Parámetros de trabajo de soldadura probeta 2 .....   | 16 |
| Tabla 3 Discontinuidades obtenidas a partir de la radiografía de probetas soldadas en ensayos previos..... | 21 |
| Tabla 4 Porcentaje de error entre la penumbra geométrica real y teórica .....                              | 22 |
| Tabla 5 Penumbras geométricas teóricas según cada espesor posible de las probetas... 24                    |    |
| Tabla 6 Tiempos según el diagrama de exposición usando 5mA para diferentes voltajes .....                  | 24 |
| Tabla 7 Comparación de tiempos de exposición entre espesor de 8 y de 8.88mm. ....                          | 26 |
| Tabla 8 Espesores teóricos según penumbras geométricas reales .....  | 26 |
| Tabla 9 Tiempo de exposición para espesores teóricos según la penumbra geométrica corregida .....          | 27 |
| Tabla 10 Factores de corrección por penumbra geométrica.....   | 28 |
| Tabla 11 Penumbra geométrica en X .....  | 36 |
| Tabla 12 Penumbra geométrica en Y .....  | 36 |
| Tabla 13 Media aritmética de los valores de las penumbras en X y Y.....                                    | 36 |
| Tabla 14 Error estándar y Confiabilidad .....  | 37 |
| Tabla 15 Intervalos de confianza.....  | 38 |
| Tabla 16 Nivel de probabilidad distribución T-student.....   | 45 |

## **1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

La radiografía industrial es un método ampliamente utilizado para la inspección de materiales como la soldadura y dentro de la detección de posibles defectos en estructuras, por lo tanto, un ensayo con la mayor precisión posible es esencial al momento de obtener imágenes radiográficas de perfecta calidad que den paso a evaluaciones confiables sobre la calidad de las soldaduras.

En este contexto, bajo las circunstancias de mejorar la fiabilidad de la inspección de soldaduras por medio de la radiografía industrial, se ha propuesto analizar a profundidad factores los cuales son la penumbra geométrica y el tiempo de exposición como una herramienta crucial en los ensayos aplicados a la evaluación de soldaduras y se espera con esto poder llegar a contribuir en la mejora de estos procesos, con un impacto positivo en la seguridad y rendimiento de las estructuras y componentes de las mismas, además de sentar las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la radiografía y en los ensayos no destructivos.

### **1.1 Justificación**

Para la correcta realización de tomas radiográficas por medio de rayos X en placas soldadas es necesario un adecuado tiempo de exposición que permita la detección de defectos en las soldaduras, sin ser este demasiado corto o por el contrario demasiado largo con el fin de evitar imágenes muy tenues u oscurecidas (Cely, M.,2016).

Dentro del cálculo del tiempo de exposición para placas soldadas se tiene factores de corrección por densidad, película, distancia, material, entre otros. Sin embargo, existen otras variables a considerar en cuanto la obtención de una imagen clara y detallada como lo es la penumbra geométrica la cual en ocasiones se ve aumentada por distintos factores que pueden llegar a ocasionar que existan dudas y replanteos sobre el tiempo de exposición llegando a demorar los ensayos y dando la posibilidad a resultados erróneos. Por este motivo, el presente trabajo busca determinar un factor de corrección por el factor de penumbra geométrica que se incluya directamente al cálculo del tiempo de exposición para así poder contribuir a una mejor calidad y precisión en radiografía industrial aplicada dentro de la ingeniería civil en base a la norma AWS D1.1 para las inspecciones de uniones soldadas.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Dentro de la industria, la radiografía industrial es un ensayo no destructivo para la inspección de materiales de los más utilizados en la actualidad. Para poder realizar una correcta interpretación de las imágenes obtenidas con radiografía industrial es necesario seguir un proceso adecuado para obtener las mismas de la manera más precisa y fiable posible, lo cual nos sirve para poder evaluar soldaduras en el campo de la ingeniería civil.

En un ensayo no destructivo con radiografía industrial el tiempo de exposición se entiende como el tiempo al que una placa soldada es expuesta a los rayos X para poder ser inspeccionada, mientras que la penumbra geométrica se refiere a la cantidad de borrosidad en una imagen radiográfica debido al tamaño finito de la fuente de radiación o la configuración geométrica de exposición (Almeida G., Álvarez G., 2017).

La penumbra geométrica depende del tamaño focal de la fuente de radiación, de la distancia entre la fuente y el objeto a radiografiar y de la distancia entre el objeto a radiografiar y la película radiográfica. A su vez, el tiempo de exposición está dado por diferentes métodos de cálculo para el mismo, el cual depende de factores como la densidad, el material, la distancia del objeto a radiografiar y la fuente de radiación, etc. Estos se encuentran relacionados el uno con el otro debido a que a medida que se aumenta el tiempo de exposición de una placa a los rayos X se puede disminuir el efecto de penumbra geométrica ya que permite que los rayos X penetren con mayor intensidad en la placa.

Sin embargo, aunque el tiempo de exposición y la penumbra geométrica dentro de la radiografía industrial están potencialmente ligados para obtener una imagen de calidad dentro de los ensayos experimentales, no existe un enfoque teórico para determinar un factor de corrección por penumbra geométrica que permita calcular con mejor precisión el tiempo de exposición adecuado para obtener imágenes radiográficas de placas soldadas aptas para su evaluación.

Con este antecedente, en el presente trabajo se determinará un factor que enlace y corrija la penumbra geométrica generada dentro del cálculo de tiempo de exposición para así garantizar la calidad de las radiografías de placas soldadas y poder encadenar los dos términos de forma teórica para poder aplicarlo de forma práctica.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar un Factor de Corrección por el Criterio de Penumbra Geométrica para el Cálculo de Tiempos de Exposición en Soldaduras

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Entender el fenómeno de penumbra geométrica como fenómeno de distorsión de imagen.
- Calcular el factor de distorsión de imagen generado por el fenómeno de penumbra geométrica.
- Análisis, discusión de resultados y ensayos complementarios para contraste de la ecuación de tiempo de exposición tomando en cuenta el nuevo factor de distorsión.

## **1.4 Alcance**

El trabajo que se presenta pretende determinar un factor de corrección por el criterio de penumbra geométrica para el cálculo de tiempos de exposición en soldaduras a fin de optimizar los tiempos de exposición y así obtener imágenes radiográficas eficaces para la detección de discontinuidades en placas soldadas y la evaluación adecuada de la integridad estructural. Para el efecto se calculará un factor de distorsión de imagen generado por el fenómeno de penumbra geométrica y se lo incluirá dentro de la ecuación de tiempos de exposición, para posteriormente realizar ensayos complementarios con el fin de contrastar el uso de esta antes y después de haber tomado en cuenta el nuevo factor de distorsión.

## **1.5 Hipótesis**

Mediante el análisis de la penumbra geométrica y su impacto en imágenes generadas con radiografía industrial se podrá generar un factor de distorsión por penumbra geométrica para así incluirlo dentro de la ecuación de tiempos de exposición y de esta manera optimizar este criterio al momento de realizar un ensayo de radiografía industrial y obtener imágenes más precisas y detalladas.

## 1.6 Operacionalización de la investigación

| <b>VARIABLE</b>      | <b>INDICADOR</b>   | <b>UNIDAD DE MEDIDA</b> |
|----------------------|--|-------------------------|
| Tiempo de exposición | Tiempo de Diagrama<br>Voltaje<br>Amperaje<br>Espesor de la muestra | s.<br>Kv.<br>mA.<br>mm. |
| Penumbra Geométrica  | Distorsión   | mm.                     |

## **2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Ensayos no destructivos**

Los ensayos no destructivos son exámenes o pruebas que son utilizados para detectar discontinuidades internas y/o superficiales o para determinar propiedades selectas en materiales, soldaduras, partes y componentes; usando técnicas que no alteran el estado físico o constitución química, dañen o destruyan los mismos. Dentro los ensayos no destructivos están incluidos la inspección por radiografía, inspección por partículas magnéticas, inspección por líquidos penetrantes, inspección visual y también inspección por ultrasonido. (Gauna, D., Rodríguez, E., et al. 2012)

#### **2.1.1 Radiografía industrial**

Según el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) la radiografía industrial es un método que permite inspeccionar los materiales a fin de detectar defectos no visibles mediante la capacidad de penetración de diversos materiales que poseen los rayos X de onda corta, los rayos gama y los neutrones. Se trata de un elemento importante de los ensayos no destructivos. Se emplea para inspeccionar, entre otros, el hormigón y gran variedad de soldaduras, como las de gasoductos y tuberías de agua, los depósitos de almacenamiento y los elementos estructurales, y permite detectar grietas o defectos que de otro modo pueden no ser visibles.

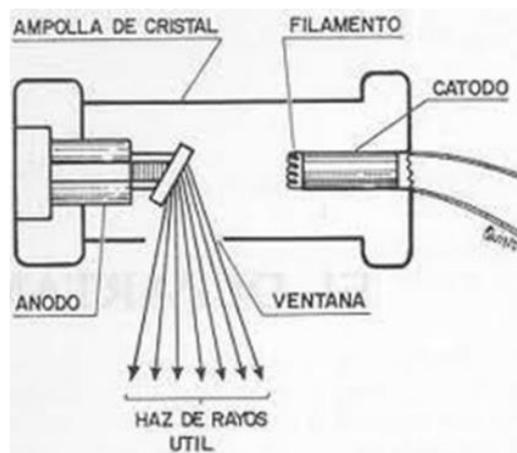
#### **2.1.2 Rayos X**

Los rayos X son una forma de energía electromagnética que puede ionizar a la materia, es decir, que puede arrancar un electrón de un átomo. Además, estos rayos tienen la característica de atravesar diferentes materiales que absorben o reflejan la luz visible. (Salinas, A., et al. 2016)

#### **2.1.3 Equipo de rayos X**

Los rayos X se generan con tubos de rayos X, dentro de los cuales se produce el calentamiento de un filamento del cátodo y los electrones de dicho filamento se activan a un alto nivel de energía. Este alto voltaje potencial generado entre dos electrodos induce a los electrones a trasladarse por el vacío del tubo de rayos X a una muy alta velocidad, moviéndose desde el cátodo al ánodo.

Los electrones colisionan en el ánodo, en un punto denominado punto focal y se generan los rayos X (figura 1). Estos rayos se emiten a través de una ventana metálica, generalmente construida con berilio, y se produce un cono de radiación, denominado flujo de rayos X útiles (Salinas, A., et al. 2016)



*Figura 1* Características del equipo de rayos X

(Fuente: Chavarría, P., 2014)

#### **2.1.4 Película radiográfica**

La película radiográfica es un material que se lo define como fotosensible donde se visualiza la imagen de las radiografías, es decir, reacciona a los rayos X alterando sus propiedades físicas o químicas a esta exposición para poder capturar imágenes del objeto que ha sido expuesto en este caso a los rayos X.

#### **2.1.5 Ley inversa de los cuadrados**

Según (Hurtado, O., Martínez, J., Soto, L., 2009) cuando se habla de películas radiográficas, se menciona que la exposición se describe como el resultado de multiplicar la intensidad de la radiación por el tiempo para una energía específica. Además, se reconoce que no toda la intensidad de radiación emitida por la fuente llega al filme, ya que parte de ella es absorbida por el objeto a radiografiar. Incluso si hay un objeto entre la fuente y la película, la radiación que llega a la película es menor que la emitida por la fuente debido a la ley del inverso del cuadrado de la distancia. La intensidad de radiación se define en términos de la cantidad de rayos generados en un período dado.

Se comprende que, a medida que la radiación se aleja de la fuente, se dispersa y cubre áreas más grandes. Por lo tanto, un objeto cercano a la fuente recibe una cantidad mayor de rayos porque está expuesto a un haz de radiación más concentrado. Según esta ley, si se duplica la distancia entre el filme y la fuente, la intensidad de radiación que llega al filme será la mitad de la intensidad original. Dado que la exposición es proporcional a la intensidad de radiación, esto implica que se requerirá una exposición cuatro veces mayor para obtener la misma densidad inicial en el filme al duplicar la distancia. Para lograr esto, se necesita aumentar el tiempo de exposición o la corriente en el tubo de rayos X.

Este fenómeno explica por qué no es posible compensar un tamaño de fuente mayor con una distancia mayor entre el foco y la película, ya que esto resultaría en un significativo aumento en el tiempo de exposición.

## **2.2 Penumbra**

Según la (RAE, 2022) penumbra se define como la sombra débil entre la luz y la oscuridad, que no deja percibir donde empieza la una o acaba la otra.

## **2.3 Penumbra geométrica**

La penumbra geométrica en la radiografía industrial es la falta de nitidez que se tiene en los bordes de una zona con otra, por ejemplo, en una soldadura se tiene la delimitación del cordón de soldadura con el material base. Es en la frontera de estos que se tienen diferentes contrastes, pero también se puede tener falta de nitidez, así como distorsiones debido a que la penumbra geométrica tiene magnitudes mayores que las aceptadas en las normativas (Cely, M., 2016) (Figura 6.2.2)

### **2.3.1 Obtención de valores adecuados de penumbra geométrica**

Para este fin, debe ser necesario el conocimiento y la experiencia para manejar las debidas distancias en los ensayos de acuerdo con los diferentes materiales dentro del mismo. Existen dos distancias las cuales se deben tomar en cuenta para obtener un valor adecuado de penumbra geométrica, primero la que se toma desde la fuente emisora de rayos X hasta el objeto a radiografiar, y la segunda que se toma desde el objeto a radiografiar hasta la película o detector (Cely, M., 2016).

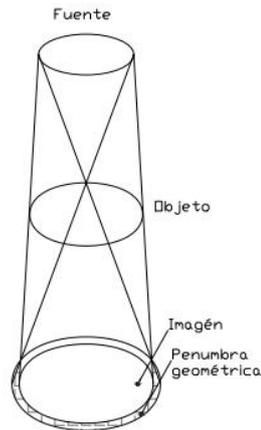


Figura 2 Representación gráfica de la penumbra geométrica

## 2.4 Tiempo de exposición

En un ensayo no destructivo con radiografía industrial el tiempo de exposición se entiende como el tiempo al que una placa soldada es expuesta a los rayos X para poder ser inspeccionada.

### 2.4.1 Diagrama de exposición

El diagrama de exposición en la radiografía es un diagrama gráfico que muestra al usuario de los equipos de rayos X cómo se debe configurar adecuadamente el equipo para obtener una imagen clara en las películas radiográficas o en los detectores digitales, lo cual nos asegura una buena relación entre el contraste y la densidad.

En este diagrama se muestra la relación que existe entre el espesor de un material, la energía y tiempo de exposición. Estos diagramas tienen como función dar a un operador el tiempo de exposición a la radiación al que debe someterse un material u objeto.

Estos diagramas son incluidos en los equipos de rayos X generalmente dados por los propios fabricantes de estos. (Jami, B., 2016)

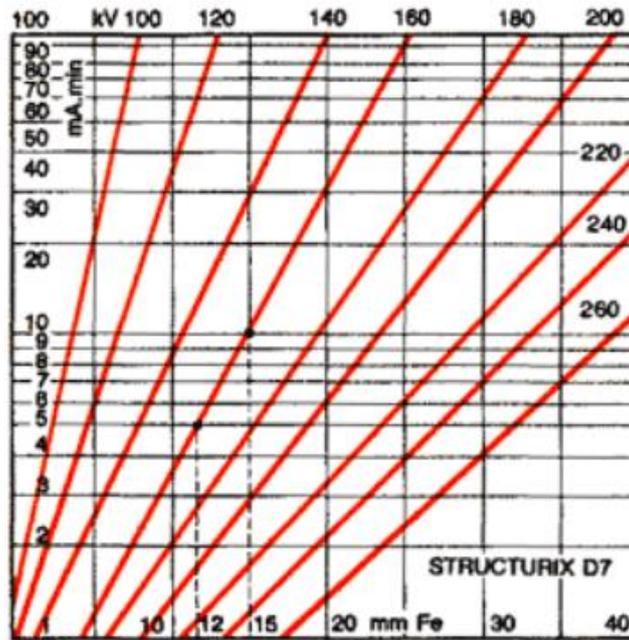


Figura 3 Ejemplo de diagrama de exposición para radiografías

(Fuente: NDT, resource center, 2016)

#### 2.4.2 Método de cálculo de tiempo de exposición

El tiempo de exposición se puede calcular usando la siguiente ecuación que corresponde al tiempo de exposición de acuerdo con los cálculos que se desarrollan en el equipo Balteau del Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la EPN.

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

Ecuación 1 Tiempo de exposición

(Fuente: Laboratorio de ensayos no destructivos EPN, 2016)

Donde:

$t_{exp}$ : tiempo de exposición

$t_c$ : tiempo del diagrama de exposición

$f_n$ : factor de corrección por densidad

$f_p$ : factor de corrección por película

$f_D$ : factor de corrección por distancia

$f_v$ : factor de corrección por varios (mA, kV, material, técnica, etc.)

### 3. CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Materiales

Se utilizará los equipos empleados en ensayos dentro del laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional y se utilizará materiales con los cuales sea factible obtener la penumbra geométrica y los cálculos de tiempo de exposición. Los cuales son expuestos a continuación:

##### 3.1.1 Equipo de rayos X

Se utilizará un equipo de rayos X cuya marca es Balteau, modelo Baltographe BF 200/10 el cual se maneja con un voltaje nominal de 200 kilovoltios (kv) y un amperaje de 5 miliamperios (mA). Este equipo se encuentra en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional.

##### 3.1.2 Panel de control

Se llama panel de control al dispositivo donde se controla y se monitorea las diferentes variables de un ensayo con exposición radiográfica. En este panel podemos encontrar diferentes componentes para regular el kilo-voltaje y el mili-amperaje. Las perillas del panel de control muestran las medidas de kilo-voltaje y mili-amperaje y cuenta con un cronómetro digital el cual puede apagar el equipo y se deja de emitir radiación.



*Figura 4* Panel de control

(Fuente: Almeida, G., Álvarez G., 2017).

### 3.1.3 Tubo de rayos catódicos

El tubo de rayos catódicos se sostiene perpendicularmente al piso mediante una estructura y es el elemento encargado de producir los rayos X que serán irradiados a los objetos a ensayar.



Figura 5 Tubo de rayos catódicos

(Fuente: Almeida, G., Álvarez G., 2017).

### 3.1.4 Cuarto oscuro

Un cuarto oscuro o un cuarto de revelado es un cuarto diseñado para procesar y revelar las radiografías tomadas en el ensayo radiográfico, está centrado en que las imágenes se manejen de manera segura y que no se expongan a la luz antes de ser reveladas para no dañar la calidad de las películas radiográficas.



Figura 6 Cuarto oscuro

(Fuente: Cely, M., 2016).

### **3.1.5 Película radiográfica**

En la película radiográfica se va a imprimir la imagen del ensayo, en donde obtendremos la imagen de las placas soldadas incluyendo sus discontinuidades las cuales se deberán medir para su análisis.

## **3.2 Obtención de las probetas**

### **3.2.1 Equipo de soldadura**

Se utilizó el equipo manual marca Eliweld modelo TIG 200A para realizar los trabajos de soldadura.



Figura 7 Equipo Eliweld TIG 200A

### **3.2.2 Placas de acero**

Se va a obtener placas de acero cuyas dimensiones se determinarán en función de los tamaños permisibles de la norma AWS D1.1. El material el cual se va a implementar en la investigación es el acero ASTM A-36 el cual tendrá dimensiones de 150 mm x 100 mm x 12 mm. Este material es usado habitualmente en el medio debido a que tiene un bajo costo y es por lo que se lo toma en cuenta para este trabajo.



Figura 8 Placas de acero ASTM A-36 de 150x50x12

### 3.2.3 Electrodo

Se va a usar electrodos 6011 de 1/8 de pulgada para la raíz de las soldaduras y posteriormente se va a implementar un electrodo 7018 de 1/8 para el relleno.



Figura 9 Electrodo 6011 y 7018 de 1/8 de pulgada

### **3.3 Métodos**

#### **3.3.1 Biselado**

Se elaboró un bisel tipo Y con un ángulo de 60 grados (30 en cada una de las placas) y un talón de 3mm. Se utilizó soportes auxiliares para poder mantener fijas las placas al momento de realizar el trabajo de soldadura.



Figura 10 Placas biseladas con ángulo de 30 grados

#### **3.3.2 Proceso SMAW**

El método manual de metal por arco (SMAW), es uno de los métodos más usados de soldadura. Es un proceso de soldadura por arco, con un arco producido entre el electrodo revestido y el charco de soldadura. Este proceso se realiza con una protección proveniente de la descomposición del revestimiento del electrodo, sin la aplicación de presión y con el metal de aporte proveniente del electrodo. (Estándar AWS A3.0, 2005)

#### **3.3.3 Soldadura de raíz**

Se implementó el electrodo 6011 de 1/8 de pulgada para la raíz de la soldadura. Esto debido a que es necesario para el mismo que se tenga una penetración adecuada en el primer pase.



Figura 11 Soldadura de raíz con electrodo 6011 de 1/8 de pulgada

### 3.3.4 Soldadura de relleno

Se implementó el electrodo 7018 de 1/8 de pulgada para el relleno de la soldadura.



Figura 12 Relleno de soldadura con electrodo 7018 de 1/8 de pulgada

### 3.3.5 Generación de discontinuidades

Para generar las porosidades que nos ayudarán en esta investigación en las probetas soldadas se implementó el uso de electrodos humedecidos al igual que un bajo amperaje en la fuente de poder. Esto conlleva a tener una humedad excesiva en la soldadura que va a generar la discontinuidad deseada.



Figura 13 Placa soldada con formación de porosidades

### 3.3.6 Parámetros del proceso de soldadura

La realización de las probetas soldadas con las discontinuidades intencionales deseadas se la realizó con las condiciones descritas en el acápite 3.3.5. Se generó dos probetas soldadas, donde en cada una de ellas se generó la porosidad intencional.

Los detalles de los parámetros relevantes dentro del trabajo de soldadura se los presenta a continuación:

| No. Pase | Electrodo | A DC <sup>+</sup> (AMP) | Longitud (mm) | Tiempo (seg) | Vel. Avance (mm/seg) |
|----------|-----------|-------------------------|---------------|--------------|----------------------|
| 1        | E6010     | 70                      | 150           | 44,62        | 1.66                 |
|          |           | 70                      |               | 45,89        |                      |
| 2        | E7018     | 130                     | 150           | 35.34        | 2.38                 |
|          |           | 129                     |               | 27.6         |                      |

Tabla 1 Parámetros de trabajo de soldadura probeta 1

| No. Pase | Electrodo | A DC <sup>+</sup> (AMP) | Longitud (mm) | Tiempo (seg) | Vel. Avance (mm/seg) |
|----------|-----------|-------------------------|---------------|--------------|----------------------|
| 1        | E6010     | 70                      | 150           | 45.51        | 1.66                 |
|          |           | 70                      |               | 47.86        |                      |
| 2        | E7018     | 145                     | 150           | 33.14        | 2.38                 |
|          |           | 129                     |               | 37.8         |                      |

Tabla 2 Parámetros de trabajo de soldadura probeta 2

### 3.4 Ensayo de radiografía industrial

#### 3.4.1 Cálculo de tiempos de exposición

Para realizar el cálculo del tiempo de exposición que se utilizará y se analizará en la presente investigación es importante mencionar que éste depende del equipo que se utilice para radiografiar. En nuestro caso se utilizará el equipo disponible en el laboratorio de Ensayos no Destructivos de la EPN mencionado en el acápite 3.1.1.

##### 3.4.1.1 Distancia fuente - objeto

Podremos observar el esquema de la configuración del foco radiográfico usado en el ensayo en la Figura 14, donde:

X = mitad del ancho de la probeta a radiografiar.

H = distancia de la fuente al objeto mínima

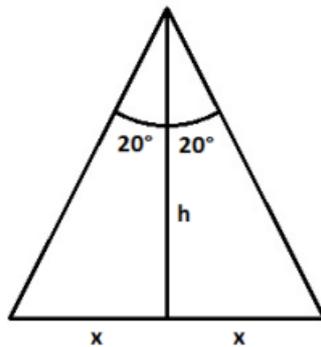


Figura 14 Configuración de foco radiográfico en equipo de radiografía de la EPN

(Fuente: Tapia, R., 2012)

$$\tan(20) = \frac{75mm}{h}$$

$$h = \frac{75mm}{\tan(20)}$$

$$h = 206.06mm$$

La distancia h encontrada ayuda a definir la distancia mínima a la cual se puede ubicar las placas que se van a radiografiar.

### 3.4.1.2 Ecuación de tiempo de exposición empleada

Se utilizará la ecuación (1) mencionada en el acápite 2.4.2. Para esto se tiene que:

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

Donde:

- $t_{exp}$ : tiempo de exposición
- $t_c$ : 112 seg.

El tiempo del diagrama de exposición del equipo de rayos X de la EPN es variable dependiendo el espesor de la probeta que se va a radiografiar, en este caso siendo de 12 milímetros. Con estas características el tiempo del diagrama de exposición nos da de 89 segundos.

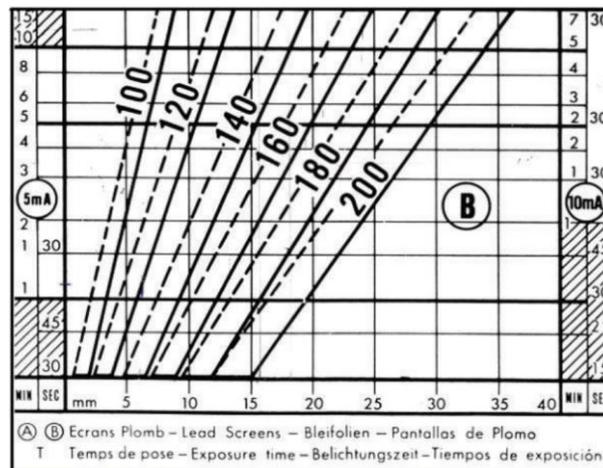


Figura 15 Diagrama de exposición utilizado

(Fuente: Laboratorio de ensayos no destructivos EPN, 2016)

- $f_n = 1$

El factor de corrección por densidad se lo obtiene a partir de las curvas características de películas radiográficas y factores, Structurix, lo cual podemos encontrar en la figura 3.4.1.2.1 considerando que usará voltajes de hasta 200kv.

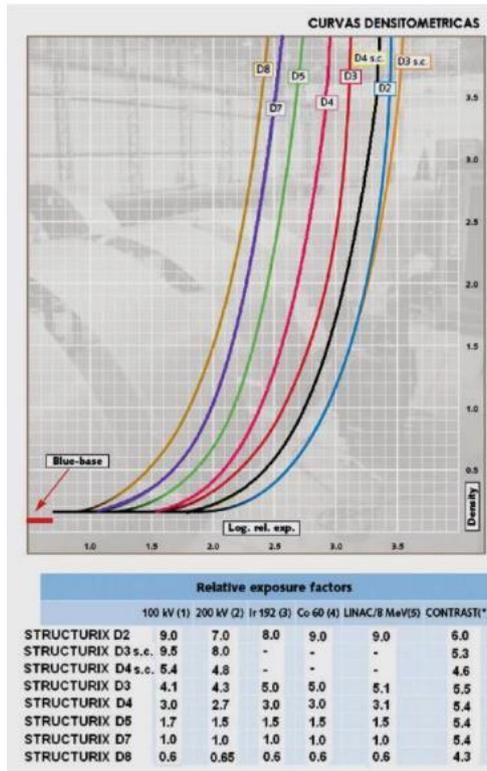


Figura 16 Curva característica de película y factores, Structurix

(Fuente: Laboratorio de Ensayos no Destructivos EPN, 2016)

- $f_p = 2.2$

Según (Torres, Torres, & Montanez, 1988) cuando sea posible se debería evitar gradientes inferiores a  $N=2$  por cual se toma un factor de corrección por película igual a 2.2.

- $f_D = 0.5$

Si tenemos que T es el tiempo de exposición para una distancia de fuente-película de 500 mm, utilizando la ecuación de la ley inversa del cuadrado de la distancia, tenemos que el factor de corrección es de:

$$\frac{t_{exp1}}{t_{exp2}} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Ecuación 2 Ley inversa del cuadrado de la distancia

(Fuente: Laboratorio de ensayos no destructivos EPN, 2016)

$$\frac{T}{t_{exp2}} = \frac{700^2}{500^2}$$

$$t_{exp2} = T * 0.5$$

$f_D = 0.5$  para una distancia de 500mm

Una vez obtenidos estos valores de los factores de corrección se procede a calcular el tiempo de exposición:

$$t_{exp} = 112 \cdot 2.2 \cdot 1 \cdot 0.5$$

$$t_{exp} = 123.2 \text{ seg}$$

### 3.4.2 Penumbra geométrica teórica para probetas de 12 mm.

$$U_g = F * \frac{t}{d_o}$$

Ecuación 3 Penumbra geométrica teórica en función del espesor de un material

(Fuente: NDT resource center)

Donde:

- $U_g$ : Penumbra geométrica.
- $F$ : tamaño focal del generador de rayos X.
- $t$ : espesor del material.
- $d_o$ : distancia de la fuente de rayos X hasta la superficie del objeto a radiografiarse.

El tamaño focal real del equipo es igual a 5.9 mm, este valor se obtuvo de la tesis de (Cely M., 2016), donde se determinó el tamaño de foco real por el uso del método pinole imaging.

La distancia de las probetas hasta el foco será de 350mm.

Por lo tanto, tenemos que:

$$U_g = 5.9 * \frac{12}{380}$$

$$U_g = 0.1863 \text{ mm.}$$

### 3.5 Generación del factor de corrección de distorsión de imagen por penumbra geométrica

Para generar un factor de corrección de distorsión de imagen por penumbra geométrica, se va a incluir dentro de esta investigación los resultados de los ensayos realizados por Almeida G., y Álvarez G., en su trabajo previo a la obtención de título de Ingeniería Mecánica titulado “Estudio de la penumbra geométrica de un generador de Rayos X y su influencia en la evaluación de discontinuidades”.

Los datos que serán extraídos del estudio previamente indicado son las dimensiones de las discontinuidades obtenidas a partir de la radiografía de dos probetas soldadas realizada en el laboratorio de ensayos no destructivos de la EPN, en las cuales se insertó esferas de óxido de aluminio de 2 mm de diámetro con el fin de simular porosidades, siguiendo la norma API1104. Estas probetas ensayadas tuvieron un espesor de 8 mm y dimensiones de 150x50x8 mm. Se utilizó un tiempo de exposición de 46 segundos para estos ensayos. Los resultados de las dimensiones de las discontinuidades presentados son los siguientes:

| Código | Diámetro Real | X    | Y    |
|--------|---------------|------|------|
| 222-1  | 2             | 2.12 | 1.85 |
| 222-2  | 2             | 2.12 | 2.12 |
| 232-1  | 2             | 2.38 | 2.38 |
| 232-2  | 2             | 2.38 | 2.12 |

Tabla 3 Discontinuidades obtenidas a partir de la radiografía de probetas soldadas en ensayos previos

(Fuente: Almeida, G., Álvarez G., 2017).

Estos datos se recuperan con el fin de optimizar la investigación, al ser resultados de ensayos realizados en el laboratorio de la EPN con las mismas condiciones y equipos que el presente trabajo, permite que se tenga una mayor eficiencia al momento de crear un factor de corrección por penumbra geométrica. Con estos datos podremos contrastar los ensayos que se han realizado previamente junto con los que se van a realizar a continuación, y así también se va a verificar los datos ya existentes.

Como se puede evidenciar en los resultados de las radiografías obtenidos por Almeida G., y Álvarez G., existe un error entre los valores de las dimensiones reales de las

discontinuidades y las dimensiones experimentales, los mismos que se analizarán a continuación.

### 3.5.1 Penumbra geométrica teórica en placas de 8mm.

Este valor corresponde a la penumbra geométrica teórica basándonos en la ecuación 3 del acápite 3.4.2, considerando el espesor del material usado en los ensayos que fue de 8 mm:

$$U_g = 5.9 * \frac{8}{500}$$

$$U_g = 0.094mm.$$

Al ser esta ecuación dependiente solamente del tamaño del foco, del espesor y de la distancia de la fuente al objeto, no se tiene una relación directa con el tiempo de exposición.

### 3.5.2 Error entre la Penumbra geométrica Real y Teórica

| Penumbra geométrica real |      | Penumbra Geométrica teórica | Errores relativos |       |
|--------------------------|------|-----------------------------|-------------------|-------|
| X                        | Y    |                             | X (%)             | Y (%) |
| 0.13                     | 0.10 | 0.09                        | 32.42             | 11.11 |

Tabla 4 Porcentaje de error entre la penumbra geométrica real y teórica

Podemos ver que en los resultados presentados en la tabla 3.5.2 existe un error entre la penumbra geométrica real y la penumbra geométrica teórica de 32.42% en X y un error de 11.11% en Y.

Los errores que puedan existir, según el trabajo realizado por Almeida G., y Álvarez G., se debe a la naturaleza del proceso en el cual al realizarse de forma manual no se puede garantizar la perpendicularidad del haz de electrones y el paralelismo entre el objeto y película. (Almeida, G., Álvarez G., 2017).

### 3.5.3 Relación entre penumbra geométrica y tiempo de exposición

Al ser ensayos de laboratorios realizados de forma manual como se menciona en la tesis de Almeida G., y Álvarez G., no se puede definir con certeza cuál va a ser la penumbra

geométrica para cada tiempo de exposición, inclusive si los ensayos fueran realizados consecutivamente, con las mismas probetas y en las mismas condiciones pueden existir cambios en las dimensiones de la penumbra geométrica en cada caso.

Dado que para este trabajo se desea realizar un factor de corrección por penumbra geométrica en la ecuación de tiempo de exposición, se va a dar un enfoque en la penumbra geométrica teórica ya que es un valor que no se ve alterado, y su porcentaje de error real presente en los ensayos previos, y se la va a relacionar al diagrama de exposición del equipo presentado por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos para generar un factor de corrección. Se procede a tomar esta decisión dado a que tanto la ecuación de la penumbra geométrica teórica y el diagrama de exposición comparten una variable, la cual es el espesor del material.

Para poder tener un factor común entre la ecuación de la penumbra geométrica y el tiempo de exposición lo primero será definir las diferentes penumbras geométricas teóricas existentes para cada diferente espesor posible de las probetas. Los espesores con los que se trabajará en los cálculos que preceden esta investigación serán desde los 3 milímetros hasta los 20 milímetros con el fin de no tener valores de tiempo de exposición demasiado altos y así evitar una desviación estándar demasiado grande entre los valores de los tiempos de exposición relacionados a cada espesor.

Los resultados de las penumbras geométricas teóricas según sus espesores se los calcula a partir del proceso presentado en el acápite 3.5.1 y se los presenta a continuación.

| Espesor | Penumbra geométrica teórica $U_g$ (mm) |
|---------|--|
| 3       | 0.035                                  |
| 4       | 0.047                                  |
| 5       | 0.059                                  |
| 6       | 0.071                                  |
| 7       | 0.083                                  |
| 8       | 0.094                                  |
| 9       | 0.106                                  |
| 10      | 0.118                                  |
| 11      | 0.130                                  |
| 12      | 0.142                                  |
| 13      | 0.153                                  |
| 14      | 0.165                                  |
| 15      | 0.177                                  |
| 16      | 0.189                                  |
| 17      | 0.201                                  |

|    |       |
|----|-------|
| 18 | 0.212 |
| 19 | 0.224 |
| 20 | 0.236 |

Tabla 5 Penumbras geométricas teóricas según cada espesor posible de las probetas

Una vez definidas las penumbras geométricas teóricas para cada tipo de espesor se procede a definir el tiempo de exposición según el diagrama de exposición del equipo y se obtiene los siguientes resultados:

| Espesor (mm) | Tiempo según el diagrama de exposición usando 5mA (seg). |      |      |      |      |      |
|--------------|--|------|------|------|------|------|
|              | 100V   | 120V | 140V | 160V | 180V | 200V |
| 3            | 42   |      |      |      |      |      |
| 4            | 82   | 34   |      |      |      |      |
| 5            | 126  | 45   |      |      |      |      |
| 6            | 216  | 64   |      |      |      |      |
| 7            |  | 89   | 35   |      |      |      |
| 8            |  | 124  | 44   |      |      |      |
| 9            |  | 176  | 57   |      |      |      |
| 10           |  |      | 74   | 39   |      |      |
| 11           |  |      | 93   | 42   |      |      |
| 12           |  |      | 119  | 57   | 31   |      |
| 13           |  |      | 158  | 72   | 38   |      |
| 14           |  |      | 204  | 87   | 44   |      |
| 15           |  |      |      | 107  | 53   | 30   |
| 16           |  |      |      | 132  | 64   | 36   |
| 17           |  |      |      | 164  | 77   | 41   |
| 18           |  |      |      | 203  | 90   | 48   |
| 19           |  |      |      |      | 108  | 56   |
| 20           |  |      |      |      | 129  | 66   |

Tabla 6 Tiempos según el diagrama de exposición usando 5mA para diferentes voltajes

Si se toma en consideración las investigaciones y ensayos realizados anteriormente y expuestos en el acápite 3.5.2 podemos fijar un error mínimo del 11.11% entre la penumbra geométrica real y la penumbra geométrica teórica, el cual lo vamos a incluir dentro de la ecuación de penumbra geométrica teórica conocida y pondremos como incógnita el espesor.

Siguiendo este proceso lo que se busca es tener una relación entre el error de penumbra geométrica y el espesor del material, para poder buscar un tiempo de exposición que se ajuste exactamente a la penumbra geométrica real.

Ejemplo de cálculo tomando las mismas condiciones del ensayo que dio los resultados del acápite 3.5.2 donde se tenía un espesor de 8mm:

$$U_{g\_teórica} = F * \frac{t}{d_o} \rightarrow t = U_{g\_real} * \frac{d_o}{F}$$

Ecuación 4 Espesor en función de la penumbra geométrica

$$t = U_{g\_real} * \frac{d_o}{F}$$

$$t = (0.094 * 1.1111) * \frac{500}{5.9}$$

$$t = 8.88 \text{ mm}$$

Con este cálculo a lo que se llega es que el espesor que en teoría debía generar una penumbra geométrica como la que se obtuvo en el ensayo es de 8.88 milímetros, este espesor es 0.88 milímetros mayor al usado realmente, que fue de 8 milímetros. Si nos dirigimos al diagrama de exposición del equipo y revisamos los valores de los tiempos de exposición que se deben usar para 8 y 8,88 mm obtenemos lo siguiente:

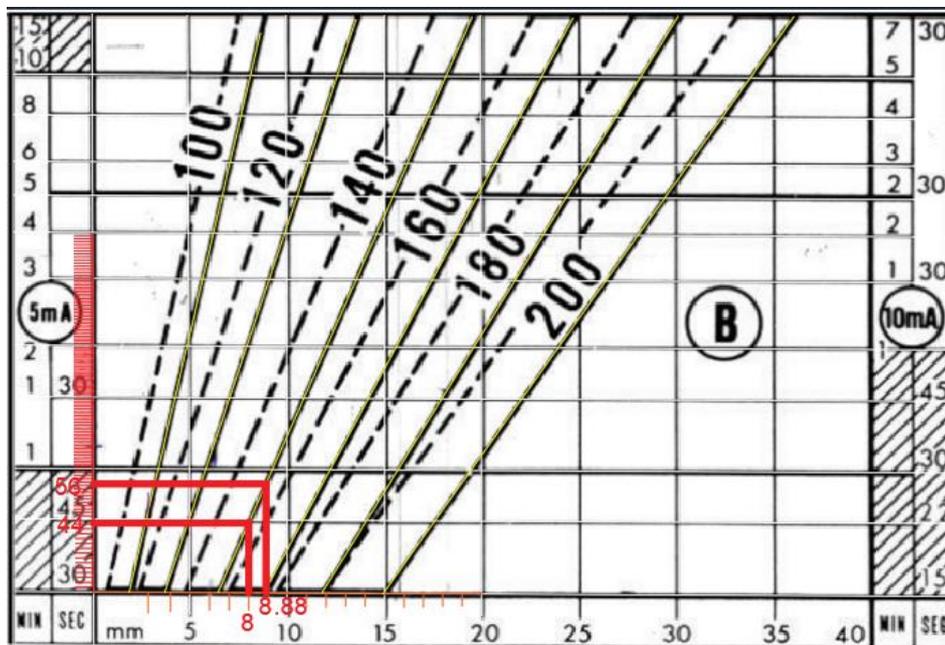


Figura 17 Ejemplo de uso del diagrama de exposición del equipo

| Espesor (mm) | Kilovoltaje (kV) | Miliamperaje (mA) | T <sub>c</sub> (seg) | U <sub>g</sub> teórica (mm) | U <sub>g</sub> real (mm) |
|--------------|------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 8            | 140              | 5                 | 44                   | 0.09                        | 0.10                     |
| 8.88         | 140              | 5                 | 56                   | 0.10                        | N/A                      |

Tabla 7 Comparación de tiempos de exposición entre espesor de 8 y de 8.88mm.

Se puede evidenciar que, aunque el espesor y la penumbra geométrica no tengan un incremento significativo, el tiempo de exposición aumentó un 27.27% respecto al valor que se tenía inicialmente.

Se procede a obtener los valores de los espesores corregidos siguiendo el proceso previamente detallado:

| Espesor real (mm) | Espesor teórico (mm) |
|-------------------|----------------------|
| 3                 | 3.3333               |
| 4                 | 4.4444               |
| 5                 | 5.5555               |
| 6                 | 6.6666               |
| 7                 | 7.7777               |
| 8                 | 8.8888               |
| 9                 | 9.9999               |
| 10                | 11.1111              |
| 11                | 12.2221              |
| 12                | 13.3332              |
| 13                | 14.4443              |
| 14                | 15.5554              |
| 15                | 16.6665              |
| 16                | 17.7776              |
| 17                | 18.8887              |
| 18                | 19.9998              |
| 19                | 21.1109              |
| 20                | 22.222               |

Tabla 8 Espesores teóricos según penumbras geométricas reales

Con estos valores de los espesores teóricos según la penumbra geométrica corregida se vuelve a determinar los tiempos de exposición necesarios según el diagrama de exposición del equipo y se obtiene lo siguiente:

| Espesor (mm) | Espesor teórico (mm) | Tiempo según el diagrama de exposición usando 5mA (seg). |      |      |      |      |      |
|--------------|----------------------|--|------|------|------|------|------|
|              |                      | 100V   | 120V | 140V | 160V | 180V | 200V |
| 3            | 3.3333               | 57   |      |      |      |      |      |

|    |         |     |     |     |     |     |    |
|----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 4  | 4.4444  | 100 | 39  |     |     |     |    |
| 5  | 5.5555  | 172 | 55  |     |     |     |    |
| 6  | 6.6666  | 300 | 81  |     |     |     |    |
| 7  | 7.7777  |     | 115 | 42  |     |     |    |
| 8  | 8.8888  |     | 175 | 56  |     |     |    |
| 9  | 9.9999  |     | 246 | 74  |     |     |    |
| 10 | 11.1111 |     |     | 96  | 48  |     |    |
| 11 | 12.2221 |     |     | 127 | 60  |     |    |
| 12 | 13.3332 |     |     | 170 | 77  | 40  |    |
| 13 | 14.4443 |     |     | 230 | 95  | 48  |    |
| 14 | 15.5554 |     |     | 300 | 128 | 58  |    |
| 15 | 16.6665 |     |     |     | 154 | 73  | 39 |
| 16 | 17.7776 |     |     |     | 193 | 87  | 46 |
| 17 | 18.8887 |     |     |     | 245 | 106 | 55 |
| 18 | 19.9998 |     |     |     | 305 | 129 | 66 |
| 19 | 21.1109 |     |     |     |     | 160 | 78 |
| 20 | 22.222  |     |     |     |     | 196 | 91 |

Tabla 9 Tiempo de exposición para espesores teóricos según la penumbra geométrica corregida

### 3.5.4 Factores de corrección por penumbra geométrica para el tiempo de exposición

Con los valores de tiempos de exposición correspondientes a los espesores teóricos, se puede realizar una comparación con los valores de tiempos de exposición de los espesores reales, previamente obtenidos en la tabla 6, y así lograr obtener un factor de corrección para cada uno de los tiempos según el voltaje a utilizar.

Ejemplo de cálculo del factor de corrección para un espesor de 8mm:

- Tiempo  $t_c$  del diagrama de exposición con espesor real: 44 segundos.
- Tiempo  $t_c$  del diagrama de exposición con espesor teórico: 56 segundos.

$$\text{Factor de corrección por penumbra geométrica} = \frac{56}{44} = 1.273$$

Se procede a realizar el cálculo de los factores para cada espesor y cada voltaje y se obtiene los siguientes resultados:

| Espesor (mm) | Factores de corrección por penumbra geométrica para 5mA (seg). |      |      |      |      |      |
|--------------|--|------|------|------|------|------|
|              | 100V   | 120V | 140V | 160V | 180V | 200V |
|              |  |      |      |      |      |      |

|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| 3  | 1.36 |      |      |      |      |      |
| 4  | 1.22 | 1.15 |      |      |      |      |
| 5  | 1.37 | 1.22 |      |      |      |      |
| 6  | 1.39 | 1.27 |      |      |      |      |
| 7  |      | 1.29 | 1.20 |      |      |      |
| 8  |      | 1.41 | 1.27 |      |      |      |
| 9  |      | 1.40 | 1.30 |      |      |      |
| 10 |      |      | 1.30 | 1.23 |      |      |
| 11 |      |      | 1.37 | 1.43 |      |      |
| 12 |      |      | 1.44 | 1.35 | 1.29 |      |
| 13 |      |      | 1.46 | 1.32 | 1.26 |      |
| 14 |      |      | 1.47 | 1.47 | 1.32 |      |
| 15 |      |      |      | 1.44 | 1.38 | 1.30 |
| 16 |      |      |      | 1.46 | 1.36 | 1.28 |
| 17 |      |      |      | 1.49 | 1.38 | 1.34 |
| 18 |      |      |      | 1.50 | 1.43 | 1.38 |
| 19 |      |      |      |      | 1.48 | 1.39 |
| 20 |      |      |      |      | 1.52 | 1.38 |

Tabla 10 Factores de corrección por penumbra geométrica

## 4. CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Presentación de resultados

#### 4.1.1 Diagramas de factores de corrección por el criterio de penumbra geométrica para la ecuación de tiempos de exposición

Una vez generados los factores de corrección por penumbra geométrica que fueron presentados en el acápite 3.5.4 se procede a crear diagramas que relacionen los espesores con sus respectivos factores de corrección para el tiempo de exposición dependiendo de cada voltaje, al igual que se va a generar diagramas donde se visualice las tendencias de los tiempos de exposición corregidos y de los tiempos de exposición sin corregir para tener una visualización clara de la variación del tiempo de exposición al implementar los factores de corrección.

Para utilizar adecuadamente los diagramas de los factores de corrección por el criterio de penumbra geométrica para la ecuación de tiempos de exposición se debe tener de dato simplemente el espesor de la probeta la cual se va a ensayar, posteriormente se debe seleccionar el diagrama según el kilovoltaje al que se va a configurar el equipo y ubicamos el tamaño del espesor en el eje de las abscisas del diagrama. Con esto podemos subir a la curva del diagrama y definir el factor de corrección que se presenta en el eje de las ordenadas.

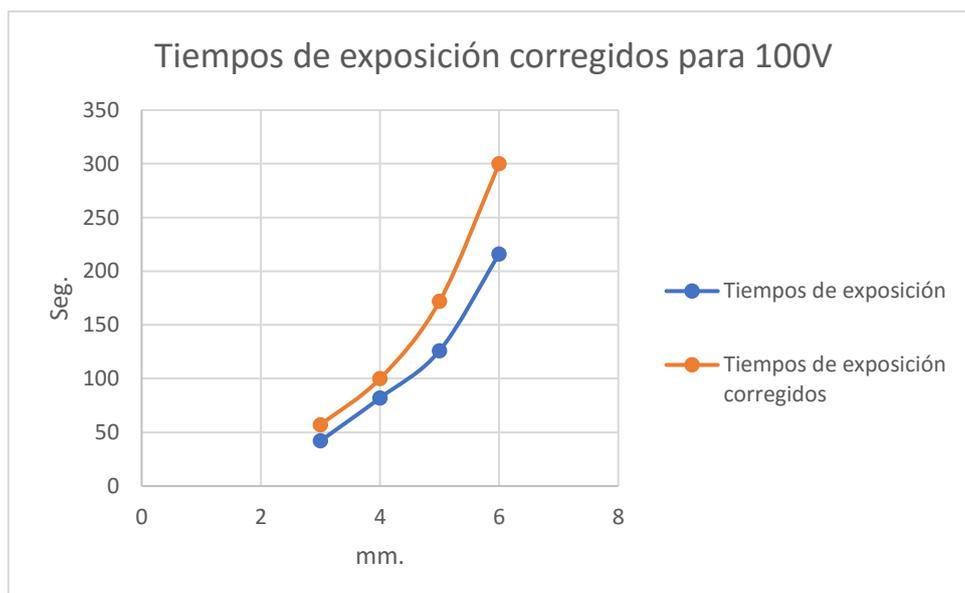


Figura 18 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 100V

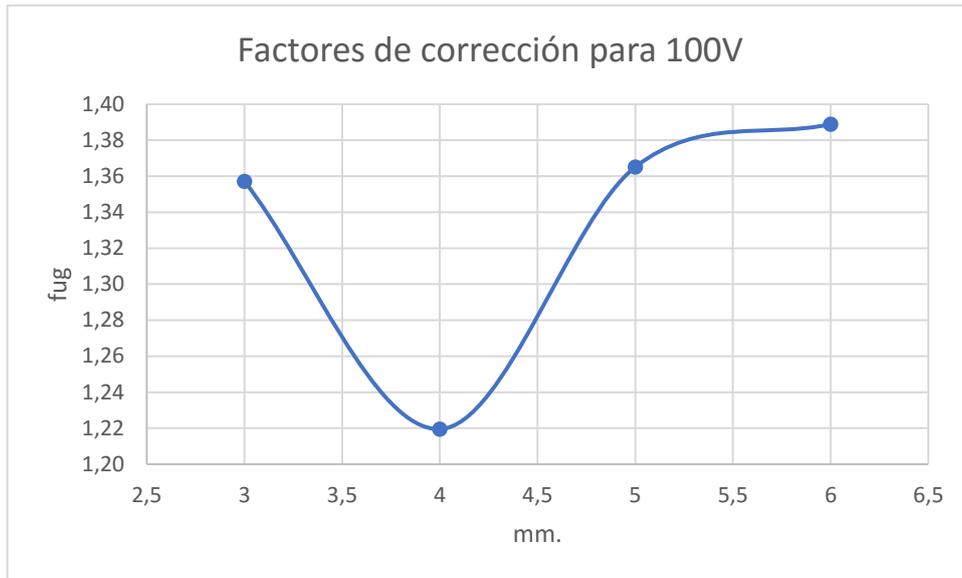


Figura 19 Factores de corrección por penumbra geométrica para 100V

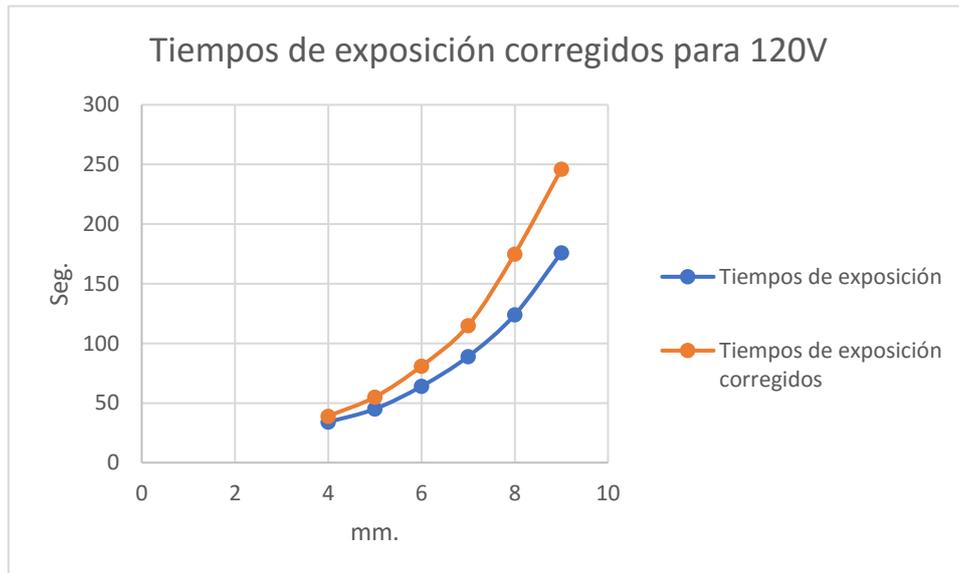


Figura 20 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 120V

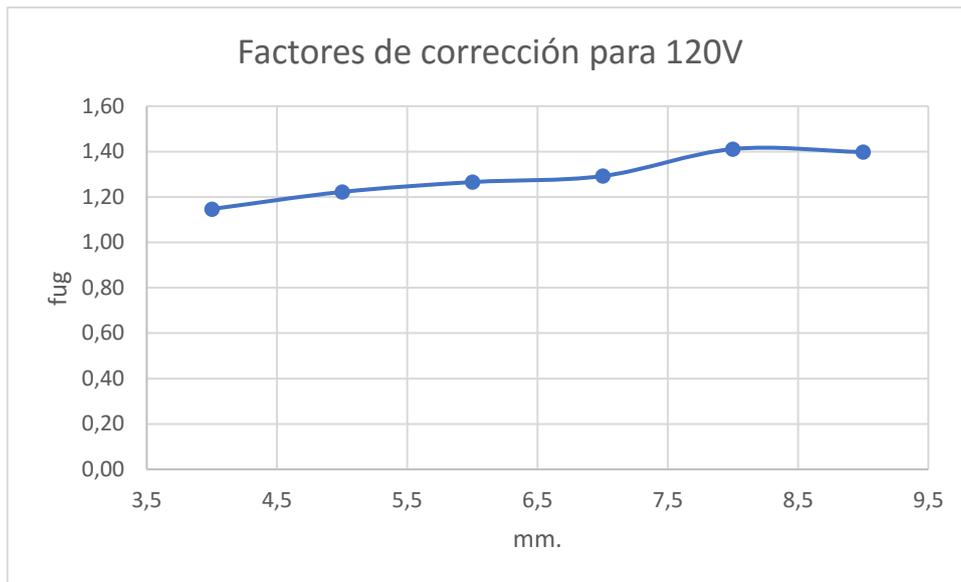


Figura 21 Factores de corrección por penumbra geométrica para 120V

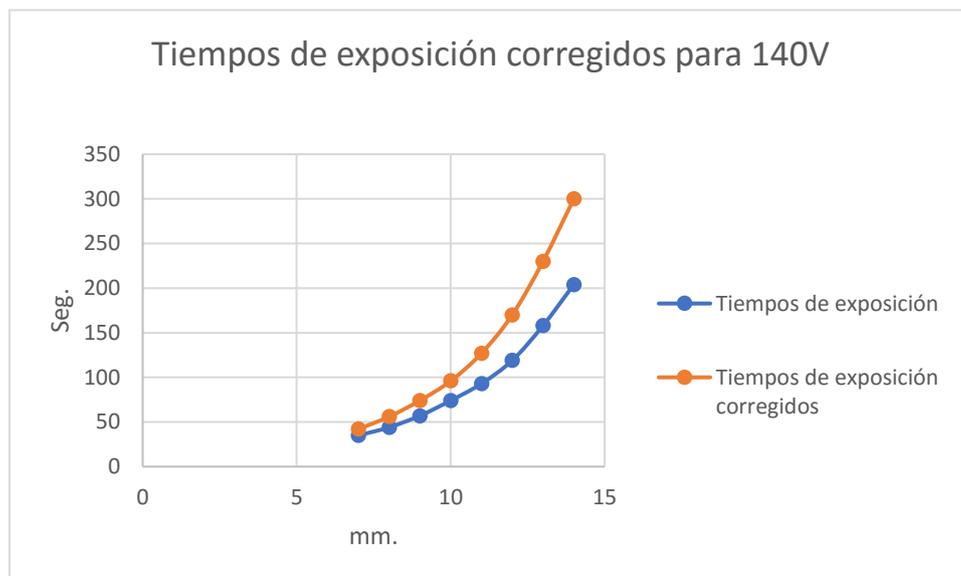


Figura 22 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 140V

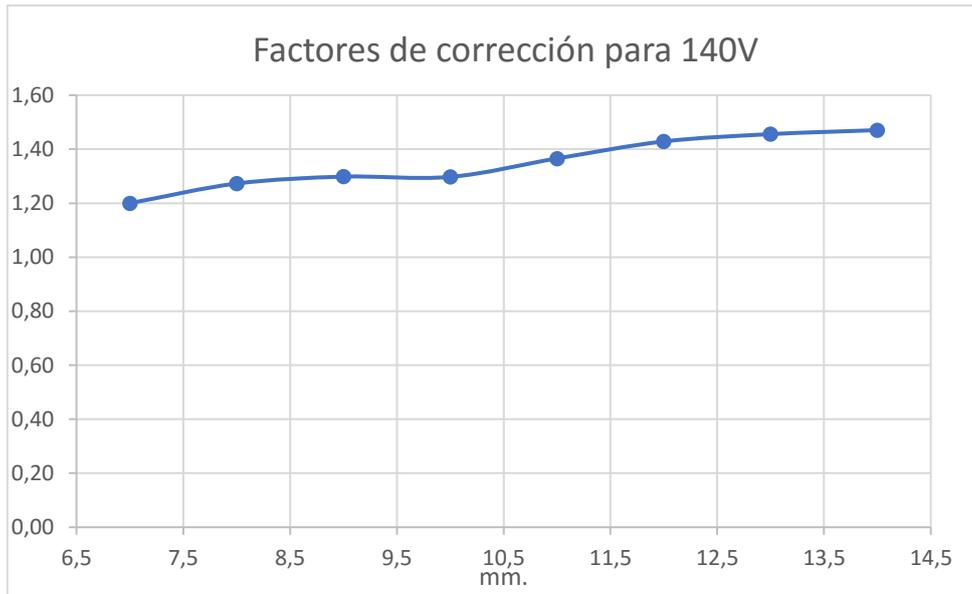


Figura 23 Factores de corrección por penumbra geométrica para 140V

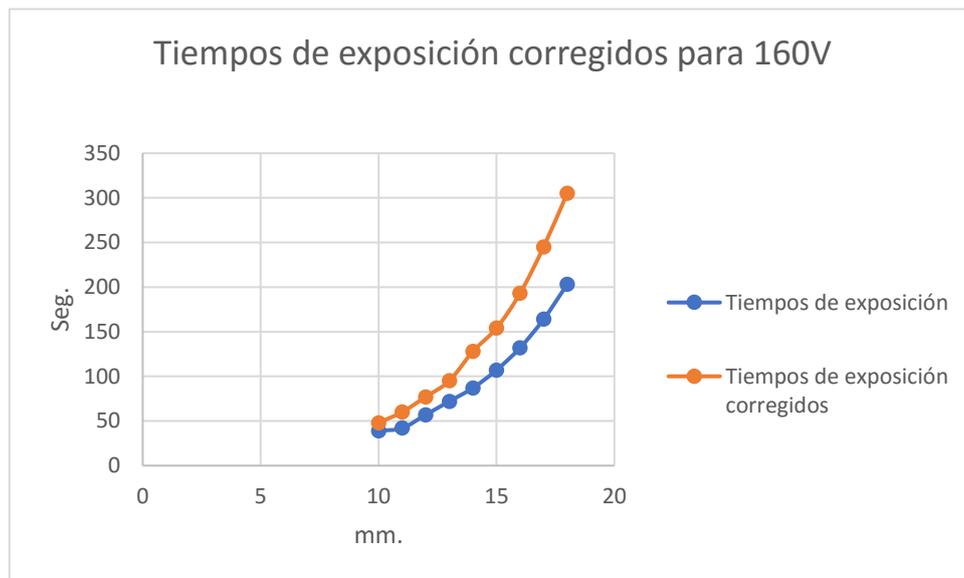


Figura 24 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 160V

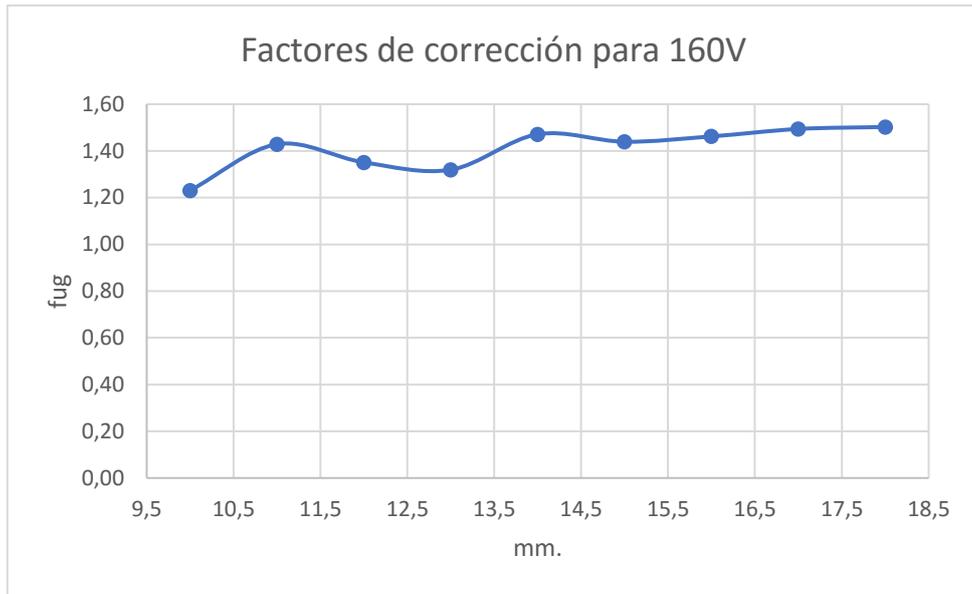


Figura 25 Factores de corrección por penumbra geométrica para 160V

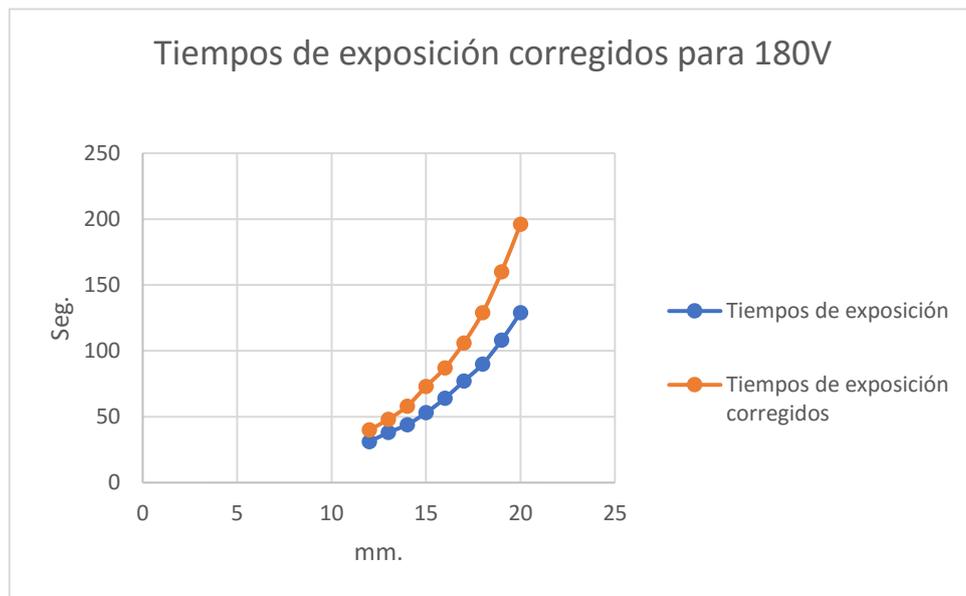


Figura 26 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 180V

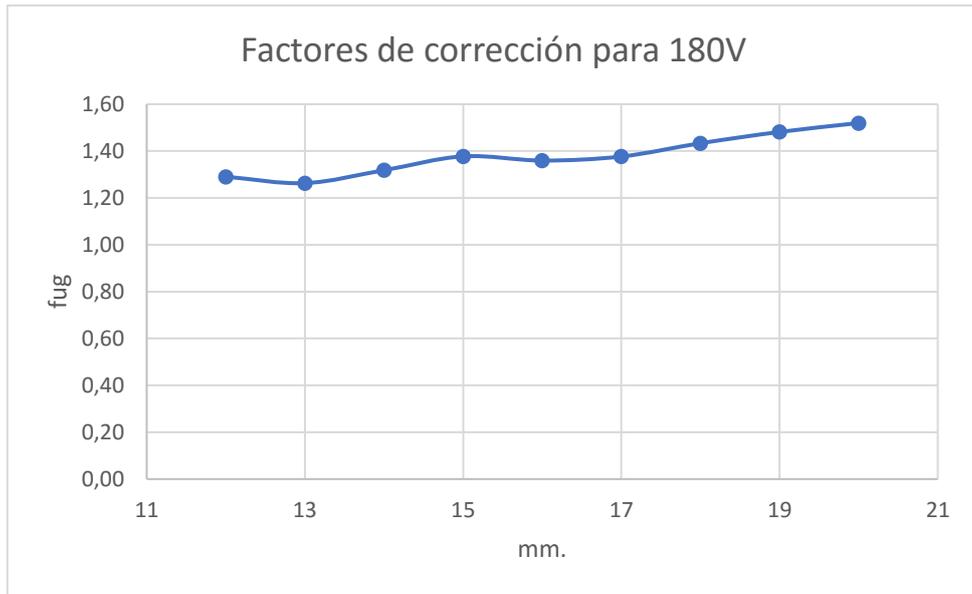


Figura 27 Factores de corrección por penumbra geométrica para 180V

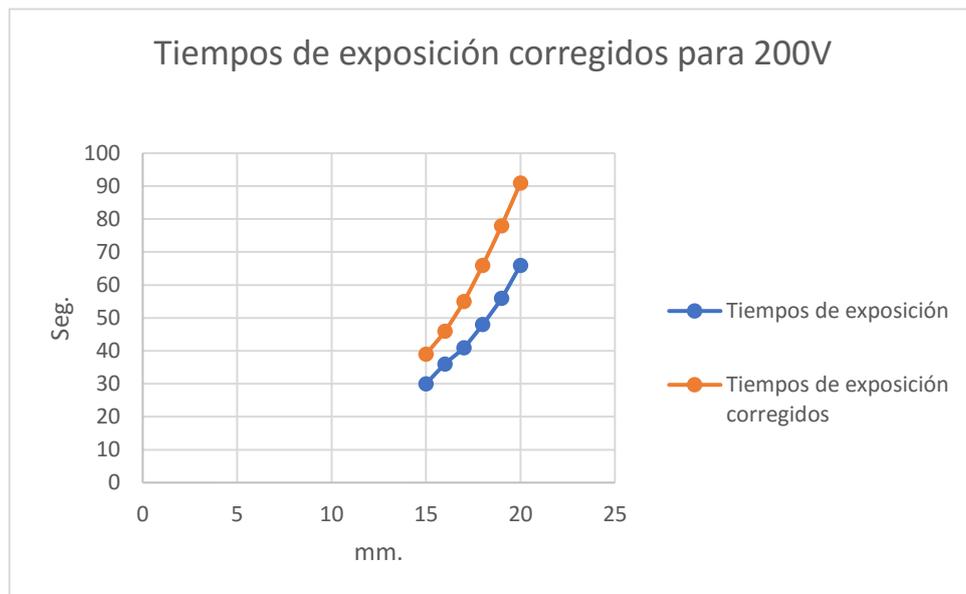


Figura 28 Tiempos de exposición corregidos y sin corregir para 200V

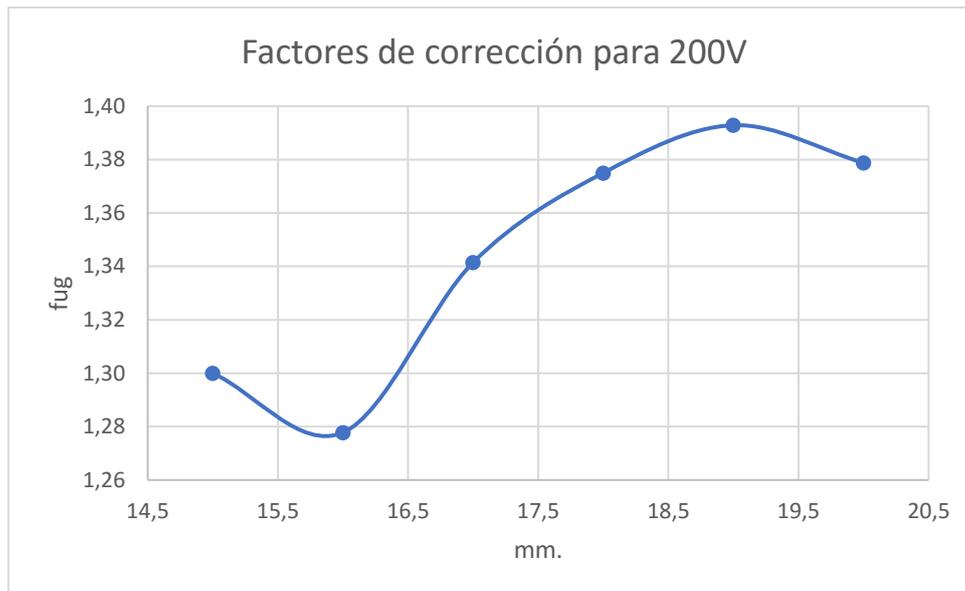


Figura 29 Factores de corrección por penumbra geométrica para 200V

## 4.2 Análisis de resultados

### 4.2.1 En cuanto a los errores relativos entre penumbra geométrica real y penumbra geométrica teórica

Se recupero los siguientes resultados de las dimensiones de las discontinuidades obtenidas en probetas soldadas realizadas en ensayos pasados en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de le EPN:

| Código | Diámetro Real | X    | Y    |
|--------|---------------|------|------|
| 222-1  | 2             | 2.12 | 1.85 |
| 222-2  | 2             | 2.12 | 2.12 |
| 232-1  | 2             | 2.38 | 2.38 |
| 232-2  | 2             | 2.38 | 2.12 |

Para analizar dichos valores y calcular porcentaje de error se empezó realizando una resta entre los valores de las dimensiones del diámetro real de la discontinuidad y el diámetro obtenido en los ensayos de radiografía para obtener el valor de la penumbra geométrica y se obtuvo lo siguiente:

| Código | Diámetro Real | X    | Penumbra en X |
|--------|---------------|------|---------------|
| 222-1  | 2             | 2.12 | 0.06          |
| 222-2  | 2             | 2.12 | 0.06          |
| 232-1  | 2             | 2.38 | 0.19          |
| 232-2  | 2             | 2.38 | 0.19          |

Tabla 11 Penumbra geométrica en X

| Código | Diámetro Real | Y    | Penumbra en Y |
|--------|---------------|------|---------------|
| 222-1  | 2             | 1.85 | 0.075         |
| 222-2  | 2             | 2.12 | 0.06          |
| 232-1  | 2             | 2.38 | 0.19          |
| 232-2  | 2             | 2.12 | 0.06          |

Tabla 12 Penumbra geométrica en Y

Se procede a calcular la media aritmética de los valores de las penumbras geométricas generadas en el ensayo tanto para X como para Y y se obtiene que:

|                   |            |            |
|-------------------|------------|------------|
| Discontinuidad    | Error en X | Error en Y |
| Porosidad Soldada | 12.5       | 9.625      |

Tabla 13 Media aritmética de los valores de las penumbras en X y Y

Al tener una muestra pequeña de datos de las penumbras geométricas se utiliza la distribución T-student para poder establecer intervalos de confianza donde se asegure que se puede trabajar con los valores previamente calculados.

Para ello se calcula primero la desviación estándar tanto para los valores de penumbras geométricas en X, al igual que para Y.

|                          |      |
|--------------------------|------|
| Desviación estándar en X | 7.51 |
| Desviación estándar en Y | 6.29 |

Para continuar el proceso se utiliza las siguientes fórmulas para poder calcular el error estándar y la confiabilidad:

$$Error\ estándar = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 5 Error estándar

Donde:

- S = Desviación estándar
- n = Número de muestras

$$\text{Confiabilidad} = 100\% - 2 * EE$$

Ecuación 6 Confiabilidad

Donde:

- EE = Error estándar

Y se obtienen los siguientes resultados:

|                       |        |        |
|-----------------------|--------|--------|
| Penumbras geométricas | X      | Y      |
| Error estándar        | 3.75   | 3.14   |
| Confiabilidad         | 92.49% | 93.71% |

Tabla 14 Error estándar y Confiabilidad

Para obtener los intervalos de confianza de acuerdo con la distribución T-Student se utiliza la siguiente ecuación:

$$IC_x = \bar{X} \pm (t_{\alpha/2}) * EE$$

Ecuación 7 Intervalos de confianza

Donde:

- $\bar{X}$  = Media aritmética
- $t_{\alpha}$  = Valor crítico T-student

Y se obtiene lo siguiente:

|                     |       |       |
|---------------------|-------|-------|
| Media               | 12,5  | 9,63  |
| Desviación Estándar | 7,51  | 6,29  |
| Confiabilidad       | 92,49 | 93,71 |
| Tamaño de muestra   | 4     | 4     |
| $t_{\alpha/2}$      | 2,75  | 2,94  |
| Grados de libertad  | 3     | 3     |

|                         |        |       |
|-------------------------|--------|-------|
| Intervalos de confianza | X (mm) | Y(mm) |
| Inferior                | 0.02   | 0.004 |
| Superior                | 0.23   | 0.19  |

Tabla 15 Intervalos de confianza

De donde se puede definir que el intervalo de confianza para X va desde 0.02 hasta 0.23 milímetros y el intervalo de confianza para Y es de 0.004 hasta 0.19 milímetros. Por lo tanto, los valores definidos para las penumbras geométricas reales se encuentran dentro de los intervalos de confianza y son aptos para su utilización en los cálculos pertinentes para definir el error relativo existente entre la penumbra geométrica real y la penumbra geométrica teórica.

#### **4.2.2 En cuanto a la diferencia entre el tiempo de exposición teórico y el tiempo de exposición corregido**

El tiempo de exposición teórico hace referencia al tiempo de exposición que se obtiene mediante el diagrama de exposición. Para obtener este valor se toma medidas del espesor de la probeta la cual se va a radiografiar para después dirigirse al diagrama de exposición, el cual es dado generalmente por los fabricantes de los equipos de radiografía, y de acuerdo con el valor del espesor se establece los parámetros del ensayo los cuales son el kilovoltaje, el miliamperaje, y el tiempo de exposición. Al fijar el espesor del material dentro del diagrama se puede visualizar los kilovoltajes que se podrían llegar a usar para efectuar el ensayo, donde puede existir varias opciones, la línea que corta el plano en el eje de las abscisas donde se encuentran los espesores se interseca con los diferentes valores de kilovoltajes que se pueden emplear para ensayar el material en cuestión. Con estas intersecciones tenemos dos opciones, al lado derecho del diagrama se encuentran los valores de tiempos de exposición que en teoría se deben usar en los ensayos suponiendo que se use un amperaje de 10 miliamperios, y por el contrario en el lado izquierdo del diagrama se encuentran los tiempos de exposición que teóricamente se deberían usar para un amperaje de 5 miliamperios.

Es importante analizar para cada espesor la energía adecuada para tener un ensayo factible. Puede existir diferentes líneas de voltaje que intersequen con el valor del espesor del material, al igual que se puede usar cualquiera de los dos valores de amperaje. La definición de estos parámetros se va a dar de acuerdo con el tiempo de exposición teórico que se recomiende por el diagrama, es decir, si vemos que se puede utilizar dos tipos de voltaje, analizamos los tiempos de exposición que se dan tanto en 5mA. y en 10mA. para cada voltaje y se elige el menor tiempo recomendado.

Cabe mencionar que en este caso en particular la energía nominal del equipo es de 600 Watts, y ningún ensayo puede superar este nivel de energía. Los parámetros de kV. y de mA. al ser multiplicados entre sí nos da de respuesta los Watts a los que trabajará el equipo, por lo tanto, al multiplicar estos valores nunca se deberá superar la energía nominal del equipo. Basándonos en los valores de energía nominal del equipo es que en este trabajo se realiza los cálculos de los factores de corrección por penumbra geométrica solamente para un amperaje de 5 mA.

En cuanto al tiempo de exposición corregido, se lo puede definir como el tiempo de exposición al que debería trabajar el equipo para obtener los valores de penumbra geométrica, tomando en cuenta el error porcentual que existe entre la penumbra geométrica teórica y la penumbra geométrica real.

Al analizar los resultados de las dimensiones de las discontinuidades obtenidas con ensayos de radiografía industrial en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional se encontró un error mínimo de penumbra geométrica de 11.11%. Es decir, las dimensiones de las discontinuidades que se observan por medio del ensayo de radiografía tienen un error del 11.11% con respecto al tamaño real de las discontinuidades debido a la penumbra geométrica.

Para poder corregir este error dentro de los resultados obtenidos se busca establecer un tiempo de exposición para el cual se vaya a obtener una penumbra geométrica que contemple este error, y que al obtener resultados de las dimensiones de las discontinuidades por medio de la penumbra geométrica real se pueda definir una dimensión de las discontinuidades más acercado a la realidad, y esto se lo puede hacer mediante el factor de corrección que se presenta en este trabajo.

Los resultados de los valores de tiempos de exposición teóricos y los tiempos de exposición corregidos a los que se llegó en este estudio nos muestra un incremento no lineal entre los mismos a medida que se incrementan las dimensiones de los espesores. con lo que se puede establecer que mientras mayor sea el espesor mayor será el factor con el que se deberá corregir el tiempo de exposición teórico.

### **4.2.3 En cuanto a los factores de corrección por penumbra geométrica para el tiempo de exposición**

Como se mencionó dentro de la discusión de resultados de las variaciones que existen entre el tiempo de exposición teórico y el tiempo de exposición corregido, estos varían de manera no lineal a medida que se incrementa los espesores, es por esta razón que para ciertos voltajes los factores de corrección a medida que incrementa la dimensión del espesor del material puedan ser menores a los espesores que los preceden. Sin embargo, la tendencia de las curvas de los factores de corrección es creciente.

Es importante que una vez corregidos los tiempos de exposición teóricos con los factores de corrección por penumbra geométrica se tome en cuenta el valor de la penumbra geométrica real que va a existir para cada espesor al obtener los resultados. Al existir un error de penumbra geométrica de 11.11%, si es que al analizar los resultados de los ensayos no se toma en cuenta la penumbra geométrica real que existe en las dimensiones de las discontinuidades observadas, el error va a seguir presente, por lo cual por más que se pueda corregir el tiempo de exposición no se obtendrá un resultado acercado a la realidad.

## 5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Al realizar un análisis de los resultados obtenidos en ensayos de radiografía industrial en el laboratorio Ensayos no Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional se encontró errores entre las dimensiones de las penumbras geométricas reales y penumbras geométricas teóricas que se evidenciaron, basándose en estos errores se pudo crear un factor de corrección por penumbra geométrica el cual depende del espesor de cada material que se implemente en los ensayos de radiografía industrial, por lo que se concluye que el objetivo principal planteado en el presente estudio se cumplió correctamente.
- Se obtuvieron valores de los factores de corrección por penumbra geométrica para incluirlos en la ecuación de tiempos de exposición para cada tipo de voltaje a utilizar en los ensayos de radiografía industrial dependiendo del espesor de cada material, lo cual es un aporte positivo para ensayos de radiografía industrial y ayudará a tener inspecciones de mejor calidad en trabajos futuros de esta índole.
- Los factores de corrección para cada espesor varían de diferente manera en los diferentes tipos de voltajes que se usen en las radiografías, por lo cual los diagramas de factores de corrección según cada voltaje son esenciales para una determinación clara del valor del factor de corrección y contribuyen a un adecuado uso de este.
- Al determinar el error existente entre la penumbra geométrica teórica y la penumbra geométrica experimental obtenida en los ensayos previos realizados en probetas de ocho milímetros se determinó un error mínimo del 11.11% entre las dimensiones de las discontinuidades. A simple vista este error no parece ser realmente significativo, sin embargo, al aplicar el factor de corrección en el tiempo de exposición para este ensayo se puede ver un incremento del 27.27% del tiempo al que esta muestra debería haber sido expuesta a la fuente de radiación, por lo tanto, existe un aumento importante del mismo y tomar en

cuenta estas consideraciones aporta directamente a optimizar la precisión en radiografía industrial aplicada dentro de la ingeniería civil.

- Lo que se expone en este estudio aparte de una manera de obtener resultados de mayor calidad en las radiografías industriales realizadas en juntas soldadas para un aporte en la rama de calidad e inspección de materiales, es compartir con la comunidad la variabilidad que existe dentro del funcionamiento de los equipos que se utilizan para los ensayos, que en este caso corresponde a los Rayos X, y el deterioro que aumenta con el pasar del tiempo. Es importante emprender una búsqueda de correcciones adecuadas para garantizar un trabajo eficaz y acertado a pesar de los efectos negativos que se puedan generar con el uso constante y el tiempo de uso de un equipo, lo cual contribuye directamente a la vida útil de los mismos.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se recomienda para usar los factores de corrección por penumbra geométrica dentro de la ecuación de tiempos de exposición se seleccione adecuadamente el voltaje con el que se va a configurar el equipo, si se usa voltajes muy bajos para espesores grandes el tiempo al que se deberá exponer las probetas será de una larga duración. Esto puede que no sea factible y se vean comprometidos los resultados de las radiografías.
- Se recomienda tener una distancia fuente-película adecuada para cada ensayo que se realice en el equipo de radiografía ya que este es un factor que también puede afectar la calidad de la imagen y se pueden generar confusiones, atribuyendo esta baja calidad al tiempo de exposición lo cual podría demorar los ensayos.

## 6. Bibliografía

Almeida, G., Álvarez G., (08 de 2017). Estudio de la penumbra geométrica de un generador de rayos X y su influencia en la evaluación de discontinuidades (Trabajo de titulación). Obtenido de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18769>

Cely, M., (07 de 2016). Método normalizado “Pinhole Imaging” en la determinación del tamaño de foco de un equipo de rayos X para la evaluación de la calidad de imágenes radiográficas de juntas soldadas. (Trabajo fin de máster). Obtenido de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16521>

Chavarría, P., (2014) HAZ DE RAYOS X Y FORMACIÓN DE LA IMAGEN. Obtenido de: <https://slideplayer.es/slide/1827755/>

Estándar AWS., (2005), Términos estandarizados de soldadura y definiciones, IHS, abril 2005, pág.34.

Gauna, D., Rodríguez, E., Flores, L., Higuera, J., Martínez, J., Pezón, Y., Gonzales, O., (09 de 2012). Ensayos no destructivos. Obtenido de: <https://chirinosilveroger.files.wordpress.com/2012/05/trabajo-de-ensayos-no-destructivos.pdf>

Hurtado, O., Martínez, J., Soto, L., (2009). Elaboración de manual de procedimientos para el laboratorio de radiografía industrial. Obtenido de: <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/25019>

IAEA, (s.f.) Radiografía industrial. Obtenido de: <https://www.iaea.org/es/temas/radiografia-industrial>

Laboratorio de ensayos no destructivos, (2016). Guía de prácticas, Laboratorio de ensayos no destructivos, Quito.

Loayza, J., (08 de 2016). Importancia y nuevos retos de la soldadura en aplicaciones industriales. Obtenido de: <https://www.virtualpro.co/editoriales/20160801-ed.pdf>

NDT Resource Center. (9 de mayo de 2016). NDT Resource Center. Obtenido de <https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/EquipmentMaterials/radiographicfilm.htm>

Real Academia Española, (2022), penumbra, obtenido de: <https://dle.rae.es/penumbra>

Rivas Muñoz, R. (2011). UNIDAD 5: DIAGNÓSTICO EN ENDODONCIA. Obtenido de:

<https://www.iztacala.unam.mx/rrivas/NOTAS/Notas5Diagnostico/radcarfactores.html>

Salinas, A., Arango, M., Gallo, C., Alzugaray, C., Carnevale, N., Gibbons, R., Craviotto, R., (2016). Manual de rayos X aplicado a la calidad de semillas. Obtenido de: [https://agroavances.com/img/publicacion\\_documentos/manual\\_de\\_rayos\\_x\\_v3.pdf](https://agroavances.com/img/publicacion_documentos/manual_de_rayos_x_v3.pdf)

Tapia, R., (12 de 2012), Análisis de la formación de porosidades en el proceso de soldadura SMAW e influencia en la resistencia mecánica de las juntas soldadas. (Trabajo de titulación). Recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5807/1/CD-4698.pdf>

Zoofan, B., (s.f.). American Welding Society, Recuperado el 03 de 09 de 2023, de The Effect of Geometric Unsharpness on Radiographs: <https://app.aws.org/itrends/2005/019/>

Jami, B., (10 de 2016), desarrollo de una metodología para la obtención de diagramas de exposición radiográfica para probetas de aluminio y acero mediante el uso de un equipo generador de rayos X, obtenido de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16855>

## 7. Anexos

| g.l.     | Nivel de probabilidad ( $\alpha$ ) |       |       |       |       |       |        |        |        |         |
|----------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
|          | 0.4                                | 0.3   | 0.2   | 0.15  | 0.1   | 0.05  | 0.025  | 0.01   | 0.005  | 0.0025  |
| 1        | 0.325                              | 0.727 | 1.376 | 1.963 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.656 | 127.321 |
| 2        | 0.289                              | 0.617 | 1.061 | 1.386 | 1.886 | 2.920 | 4.303  | 6.965  | 9.925  | 14.089  |
| 3        | 0.277                              | 0.584 | 0.978 | 1.250 | 1.638 | 2.353 | 3.182  | 4.541  | 5.841  | 7.453   |
| 4        | 0.271                              | 0.569 | 0.941 | 1.190 | 1.533 | 2.132 | 2.776  | 3.747  | 4.604  | 5.598   |
| 5        | 0.267                              | 0.559 | 0.920 | 1.156 | 1.476 | 2.015 | 2.571  | 3.365  | 4.032  | 4.773   |
| 6        | 0.265                              | 0.553 | 0.906 | 1.134 | 1.440 | 1.943 | 2.447  | 3.143  | 3.707  | 4.317   |
| 7        | 0.263                              | 0.549 | 0.896 | 1.119 | 1.415 | 1.895 | 2.365  | 2.998  | 3.499  | 4.029   |
| 8        | 0.262                              | 0.546 | 0.889 | 1.108 | 1.397 | 1.860 | 2.306  | 2.896  | 3.355  | 3.833   |
| 9        | 0.261                              | 0.543 | 0.883 | 1.100 | 1.383 | 1.833 | 2.262  | 2.821  | 3.250  | 3.690   |
| 10       | 0.260                              | 0.542 | 0.879 | 1.093 | 1.372 | 1.812 | 2.228  | 2.764  | 3.169  | 3.581   |
| 11       | 0.260                              | 0.540 | 0.876 | 1.088 | 1.363 | 1.796 | 2.201  | 2.718  | 3.106  | 3.497   |
| 12       | 0.259                              | 0.539 | 0.873 | 1.083 | 1.356 | 1.782 | 2.179  | 2.681  | 3.055  | 3.428   |
| 13       | 0.259                              | 0.538 | 0.870 | 1.079 | 1.350 | 1.771 | 2.160  | 2.650  | 3.012  | 3.372   |
| 14       | 0.258                              | 0.537 | 0.868 | 1.076 | 1.345 | 1.761 | 2.145  | 2.624  | 2.977  | 3.326   |
| 15       | 0.258                              | 0.536 | 0.866 | 1.074 | 1.341 | 1.753 | 2.131  | 2.602  | 2.947  | 3.286   |
| 16       | 0.258                              | 0.535 | 0.865 | 1.071 | 1.337 | 1.746 | 2.120  | 2.583  | 2.921  | 3.252   |
| 17       | 0.257                              | 0.534 | 0.863 | 1.069 | 1.333 | 1.740 | 2.110  | 2.567  | 2.898  | 3.222   |
| 18       | 0.257                              | 0.534 | 0.862 | 1.067 | 1.330 | 1.734 | 2.101  | 2.552  | 2.878  | 3.197   |
| 19       | 0.257                              | 0.533 | 0.861 | 1.066 | 1.328 | 1.729 | 2.093  | 2.539  | 2.861  | 3.174   |
| 20       | 0.257                              | 0.533 | 0.860 | 1.064 | 1.325 | 1.725 | 2.086  | 2.528  | 2.845  | 3.153   |
| 21       | 0.257                              | 0.532 | 0.859 | 1.063 | 1.323 | 1.721 | 2.080  | 2.518  | 2.831  | 3.135   |
| 22       | 0.256                              | 0.532 | 0.858 | 1.061 | 1.321 | 1.717 | 2.074  | 2.508  | 2.819  | 3.119   |
| 23       | 0.256                              | 0.532 | 0.858 | 1.060 | 1.319 | 1.714 | 2.069  | 2.500  | 2.807  | 3.104   |
| 24       | 0.256                              | 0.531 | 0.857 | 1.059 | 1.318 | 1.711 | 2.064  | 2.492  | 2.797  | 3.091   |
| 25       | 0.256                              | 0.531 | 0.856 | 1.058 | 1.316 | 1.708 | 2.060  | 2.485  | 2.787  | 3.078   |
| 26       | 0.256                              | 0.531 | 0.856 | 1.058 | 1.315 | 1.706 | 2.056  | 2.479  | 2.779  | 3.067   |
| 27       | 0.256                              | 0.531 | 0.855 | 1.057 | 1.314 | 1.703 | 2.052  | 2.473  | 2.771  | 3.057   |
| 28       | 0.256                              | 0.530 | 0.855 | 1.056 | 1.313 | 1.701 | 2.048  | 2.467  | 2.763  | 3.047   |
| 29       | 0.256                              | 0.530 | 0.854 | 1.055 | 1.311 | 1.699 | 2.045  | 2.462  | 2.756  | 3.038   |
| 30       | 0.256                              | 0.530 | 0.854 | 1.055 | 1.310 | 1.697 | 2.042  | 2.457  | 2.750  | 3.030   |
| 35       | 0.255                              | 0.529 | 0.852 | 1.052 | 1.306 | 1.690 | 2.030  | 2.438  | 2.724  | 2.996   |
| 40       | 0.255                              | 0.529 | 0.851 | 1.050 | 1.303 | 1.684 | 2.021  | 2.423  | 2.704  | 2.971   |
| 45       | 0.255                              | 0.528 | 0.850 | 1.049 | 1.301 | 1.679 | 2.014  | 2.412  | 2.690  | 2.952   |
| 50       | 0.255                              | 0.528 | 0.849 | 1.047 | 1.299 | 1.676 | 2.009  | 2.403  | 2.678  | 2.937   |
| 60       | 0.254                              | 0.527 | 0.848 | 1.045 | 1.296 | 1.671 | 2.000  | 2.390  | 2.660  | 2.915   |
| 70       | 0.254                              | 0.527 | 0.847 | 1.044 | 1.294 | 1.667 | 1.994  | 2.381  | 2.648  | 2.899   |
| 80       | 0.254                              | 0.526 | 0.846 | 1.043 | 1.292 | 1.664 | 1.990  | 2.374  | 2.639  | 2.887   |
| 90       | 0.254                              | 0.526 | 0.846 | 1.042 | 1.291 | 1.662 | 1.987  | 2.368  | 2.632  | 2.878   |
| 100      | 0.254                              | 0.526 | 0.845 | 1.042 | 1.290 | 1.660 | 1.984  | 2.364  | 2.626  | 2.871   |
| $\infty$ | 0.675                              | 0.525 | 0.675 | 1.037 | 1.282 | 1.645 | 1.960  | 2.327  | 2.576  | 2.808   |

Tabla 16 Nivel de probabilidad distribución T-student



**Escuela Politécnica Nacional**

**Dirección Matriz:** Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía.

**Contribuyente especial Nro:** 1308

**Obligado a llevar contabilidad:** Si

**R.U.C.:** 1760005620001

**FACTURA**

**No.** 001-003-0080020

**NÚMERO DE AUTORIZACIÓN**

**1011202301176000562000120010030000800201722023718**

**FECHA Y HORA DE AUTORIZACIÓN:** 2023-11-10 13:50:04.0

**AMBIENTE:** PRODUCCION

**EMISIÓN:** NORMAL

**CLAVE DE ACCESO**



1011202301176000562000120010030000800201722023718

**Razn Social/ Nombres y Apellidos:** DANIEL EMIL BORJA ESTUPIÑAN  
**identificación:**1720769833

**Fecha Emisión:** 10/11/2023

| Cod. Principal            | Cod. Auxiliar | Cant. | Descripcin                       | Detalle Adicional 1 | Detalle Adicional 2 | Detalle Adicional 3 | Precio Unitario | Descuento | Precio Total |
|---------------------------|---------------|-------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------|--------------|
| DT-S0892                  | DT-S0892      | 4     | ENSAYO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL |                     |                     |                     | 74.68           | 0.00      | 298.72       |
| SUBTOTAL 12%              |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 298.72       |
| SUBTOTAL 0%               |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 0.00         |
| SUBTOTAL no objeto de IVA |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 0.00         |
| SUBTOTAL Exento de IVA    |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 0.00         |
| SUBTOTAL SIN IMPUESTOS    |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 298.72       |
| TOTAL Descuento           |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 0.00         |
| ICE                       |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 0.00         |
| IVA 12%                   |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 35.85        |
| IRBPNR                    |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 0.00         |
| PROPINA                   |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 0.00         |
| VALOR TOTAL               |               |       |                                  |                     |                     |                     |                 |           | 334.57       |

**Información Adicional**

**Dirección:** NACIONES UNIDAS Y AMAZONAS, TORRES CCNU

**Teléfono:**

**Email:** daniel.borja1@hotmail.com

**Forma de Pago:** OTROS CON UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO: 334.57

Figura 30 Ensayos del Laboratorio de Ensayos No Destructivos ded la EPN