

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN EN EL  
TIEMPO DE EXPOSICIÓN PARA EL ENSAYO DE RADIOGRAFÍA  
INDUSTRIAL EN TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE CON AGUA**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,**

**que presenta el bachiller:**

**ALEJANDRO MANUEL SÁNCHEZ GAVIDIA**

**ASESOR: Ing. Daniel Merino Ponce**

**Lima, Noviembre del 2016**

## RESUMEN

En la actualidad, los Ensayos No Destructivos (END) han desempeñado un papel muy importante en el control de calidad de componentes en la industria uno de estos ensayos aplicados con mayor frecuencia es la Radiografía Industrial (RI) usada principalmente para la identificación y clasificación de las discontinuidades de soldadura. Este ensayo tiene la ventaja de alta fiabilidad, versatilidad y capacidad de otorgarnos un registro permanente de información.

La RI es muy utilizada en los procesos industriales, en los que líquidos y gases son transportados por tuberías soldadas. Para poder realizar este ensayo se debe detener el proceso de la planta lo que, como se sabe, significaría una pérdida de tiempo y de costo para la industria donde se realice dicho ensayo: el tipo de material y su espesor harían más prolongado el tiempo de exposición de la soldadura en la tubería, sin contar con que esta debería estar vacía.

El presente trabajo de investigación ha tenido como propósito encontrar un factor de corrección para el tiempo que debe estar expuesta una tubería soldada de acero inoxidable, en la cual hay líquido, en este caso agua; así se busca conseguir una radiografía que cumpla con los criterios de calidad establecidos por las normas de fabricación. Previamente se realizó un estudio para definir los parámetros involucrados en esta técnica. El manejo de estos parámetros se realizaron de acuerdo al Artículo 2 del Código ASME, sección V, Edición 2013, y acorde a lo recomendado en el Apéndice A "*Recommended Radiographic Technique Sketches for Pipe or Tube Welds*" de dicho Código.

Después de realizar varias pruebas en el laboratorio en las que se utiliza un factor que se multiplica, en cada ensayo realizado, al tiempo de exposición de la tubería llena de agua expuesta a los rayos X, sin variar su voltaje y amperaje, se logra obtener un valor de corrección para este tiempo, el cual es aceptable y que cumple con los criterios de calidad.

Al final del presente trabajo de investigación, se presenta el valor del factor de corrección que se puede utilizar para los ensayos de RI que se realicen a tuberías de acero inoxidable con agua.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO	<b>DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN EN EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN PARA EL ENSAYO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL EN TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE CON AGUA</b>
ÁREA	Materiales # 125
PROPUESTO POR	Ing. Daniel Merino Ponce
ASESOR	Ing. Daniel Marino Ponce
TESISTA	Alejandro Manuel Sánchez Gavidia
CÓDIGO	20102100
FECHA	17/05/2016

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
Facultad de Ciencias e Ingeniería



**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

Se sabe que la RI está basada principalmente en el uso de rayos X o fuentes de radiación Gamma; esta última es usada por la mayoría de empresas gracias a la facilidad de transporte de las fuentes hacia los puntos de inspección y porque no requiere de fuentes de energía externa (corriente eléctrica); sin embargo, la calidad de la imagen es baja cuando se radiografía bajos espesores y se debe tener especial cuidado con el tema de seguridad radiológica.

Actualmente, se usan los rayos X como método de inspección de soldadura porque hoy en día las fábricas están desarrollando nuevas tecnologías con equipos que sean más transportables así como susceptibles de ser usados en diversas aplicaciones y condiciones. Esto se debe a que los rayos X son mejores que los rayos Gamma para la detección de pequeñas discontinuidades en secciones de bajo espesor: los rayos X proporcionan negativos más claros que los rayos Gamma.

El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio comparativo entre las placas radiográficas tomadas a la tubería soldada, de acero inoxidable, que contiene agua y aquella obtenida sobre la tubería sin fluido, es decir, vacía.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN EN EL TIEMPO  
DE EXPOSICIÓN PARA EL ENSAYO DE RADIOGRAFÍA  
INDUSTRIAL EN TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE CON AGUA**

Introducción

1. Descripción general
2. Detectología y preparación del dispositivo
3. Ensayo de RI a la tubería de acero inoxidable soldada y determinación del factor de corrección
4. Análisis de los resultados

Conclusiones y Recomendaciones

Bibliografía

*Máximo: 100 páginas*

  
Ing. Daniel Merino P.  
Asesor

*[Handwritten mark]*

*[Handwritten mark]*



## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL .....	3
1.1 Radiografía Industrial .....	3
1.2 Equipo radiográfico .....	4
1.2.1 Tubo de rayos X.....	4
1.2.1.1 Tubo protector.....	6
1.2.1.2 Panel de control .....	7
1.2.2 Curvas de exposición de rayos X.....	8
1.2.3 Accesorios del equipo: diafragma, colimadores y conos.....	9
1.3 Principios de radiología .....	10
1.3.1 Penumbra geométrica .....	10
1.3.2 Ley de los cuadros inversos .....	12
1.3.3 Procedimiento de inspección según norma ASME.....	13
1.4 Película radiográfica.....	14
1.4.1 Densidad fotográfica .....	15
1.4.2 Contraste de película.....	15
1.4.3 Curvas sensitométricas .....	16
1.4.3.1 Uso de las curvas características.....	18
1.4.4 Densitómetros.....	20
1.5 Requisitos y secuencia de inspección por radiografía industrial .....	20
1.5.1 Indicadores de calidad de la imagen .....	21
1.5.1.1 Penetrámetros tipo alambre .....	21
1.6 Ventajas y desventajas de la radiografía industrial.....	25
2. DETECTOLOGÍA Y PREPARACIÓN DEL DISPOSITIVO .....	25
2.1 La discontinuidad .....	26
2.1.1 Tipos de discontinuidad.....	28
2.1.2 Discontinuidad a examinar .....	28
2.2 Prototipo de tubería.....	29
2.2.1 Dimensiones y propiedades .....	35
2.3 Equipo .....	35
2.3.1 Equipo de rayos X y sistema de colimación del haz.....	36

2.3.1.1 Sistema de colimación del haz.....	36
2.3.2 Película radiográfica y módulo de revelado .....	41
2.3.3 Instrumentos de medición .....	43
<b>3. ENSAYO DE RI A LA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE SOLDADA Y DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN .....</b>	<b>50</b>
3.1 Ensayo a la tubería de acero inoxidable vacía.....	52
3.2 Ensayo a la tubería de acero inoxidable con agua.....	60
3.3 Datos obtenidos en los ensayos .....	61
<b>4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
4.1 Identificación de los resultados.....	61
4.2 Discusión de los resultados.....	62
4.3 Resultado del análisis de los ensayos .....	63
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>64</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>66</b>

## INTRODUCCIÓN

La siguiente investigación aborda el tema de los Ensayo No Destructivos (END) como herramientas para la inspección de tuberías con uniones soldadas. En el caso de tuberías expuestas a Radiografía Industrial (RI), se trata de obtener radiografías de calidad que cumplan con los estándares y códigos aplicables, a pesar de que fluya líquido a través de estas.

Se sabe que la RI está basada principalmente en el uso de rayos X o fuentes de radiación Gamma; esta última es usada por la mayoría de empresas gracias a la facilidad de transporte de las fuentes hacia los puntos de inspección y porque no requiere de fuentes de energía externa (corriente eléctrica); sin embargo, la calidad de la imagen es baja cuando se radiografía bajos espesores y se debe tener especial cuidado con el tema de seguridad radiológica.

Actualmente, se usan los rayos X como método de inspección de soldadura porque hoy en día las fábricas están desarrollando nuevas tecnologías con equipos que sean más transportables así como susceptibles de ser usados en diversas aplicaciones y condiciones. Esto se debe a que los rayos X son mejores que los rayos Gamma para la detección de pequeñas discontinuidades en secciones de bajo espesor; asimismo, los rayos X proporcionan negativos más claros que los rayos Gamma.

Por medio del método de rayos X se realizaron los ensayos correspondientes, para poder encontrar el factor de corrección que debe hacerse a la variable de tiempo de exposición para que las placas radiográficas finales cumplan con los requisitos de calidad del Artículo 2 del Código ASME, sección V, Edición 2015, y a lo recomendado en el Apéndice A "*Recommended Radiographic Technique Sketches for Pipe or Tube Welds*" de dicho Código.

El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio comparativo entre las placas radiográficas tomadas a la tubería soldada, de acero inoxidable, que contiene agua y aquella obtenida sobre la tubería sin fluido, es decir, vacía.

El trabajo ha sido estructurado en las siguientes partes: el primer capítulo presenta las descripciones generales de la Radiografía Industrial y la norma usada; en el segundo capítulo se expone las discontinuidades existentes, los tipos de discontinuidades que encontramos durante el ensayo, el prototipo de tubería y el equipo que se usa; el tercer capítulo aborda la realización de los ensayos y los datos obtenidos en cada uno de ellos; finalmente, el cuarto capítulo versa sobre el análisis de los resultados, es decir, en él se identifica, organiza y se discute los resultados obtenidos en los ensayos de RI, y se presenta un reporte del valor obtenido.



## CAPÍTULO 1

### DESCRIPCIÓN GENERAL

Los Ensayos No Destructivos (END) son pruebas que se practican a un material sin que este se vea afectado de forma permanente en sus propiedades, físicas o químicas, mecánicas o dimensionales. Este tipo de ensayo ocasiona un daño imperceptible o nulo. Los END se basan en la aplicación de fenómenos físicos, como las ondas electromagnéticas, capilaridad, absorción, entre otros.

Los objetivos principales del END son:

- Detectar discontinuidades en materiales y estructuras, sin dañarlas.
- Evaluar la ubicación, forma, tamaño y el tipo de discontinuidad.
- Calificar el material, según la severidad de las discontinuidades y/o defectos.

Dentro de estos ensayos podemos mencionar los siguientes: radiografía industrial, ultrasonido industrial, líquidos penetrantes e inspección visual, entre otros.

#### 1.1 Radiografía Industrial

La radiografía industrial es conocida como un Ensayo No Destructivo (END), que se utiliza para determinar la presencia, localización y severidad de las discontinuidades macroscópicas; es una técnica volumétrica. También es usada para examinar una serie de productos, tales como fundiciones, forjados y soldaduras.

Al usar este método, se obtiene una imagen de la estructura interna de una pieza o componente, ya que se emplea radiación de alta energía que penetra materiales sólidos y así obtener registros permanentes para el estudio y evaluación de discontinuidades

internas presentes en una amplia variedad de materiales.

## 1.2 Equipo radiográfico

Un equipo que genera rayos X consta de tres principales componentes que son:

- Tubo de rayos X
- Fuente de alto voltaje
- Equipo de control

Aunque estas partes pueden ser diferentes, se necesita recordar que todas las unidades convencionales tienen similitud en su construcción.

### 1.2.1 Tubo de rayos X

Los primeros equipos de rayos X utilizaron tubo llenos con gas y un cátodo frío desde el cual los electrones fueron liberados por el bombardeo de iones positivos. Los tubos de rayos X en la actualidad son de la variedad de alto vacío, permitiendo la reducción de tamaño, lo que nos permite extender la vida del tubo y tener operaciones más estables.

Los electrones se suministran por emisiones termoiónicas desde el filamento. El potencial de aceleración y la corriente del tubo pueden ser variados independientemente, con la excepción de que a bajos voltajes de aceleración, la corriente del tubo se ve afectada por la carga espacial acumulada alrededor del cátodo.

Estos tubos de rayos X cuentan con las siguientes partes:

- Cubierta: estas cubiertas son usualmente hechas de vidrio o una combinación de cerámico y metal (ver figura 1.1 y 1.2). Las cubiertas de vidrio son susceptibles, es por esto que han sido reemplazadas en muchas aplicaciones por tubos más duraderos de metal-cerámico.



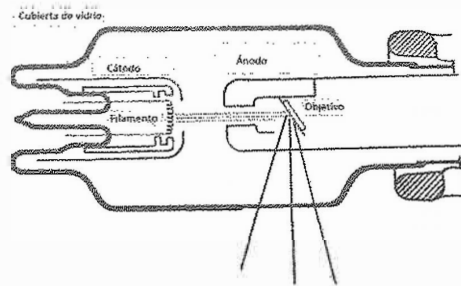


Figura 1.1. Tubo de rayos X de vidrio.

Fuente: *HANDBOOK Radiographic Testing* (Modificada).

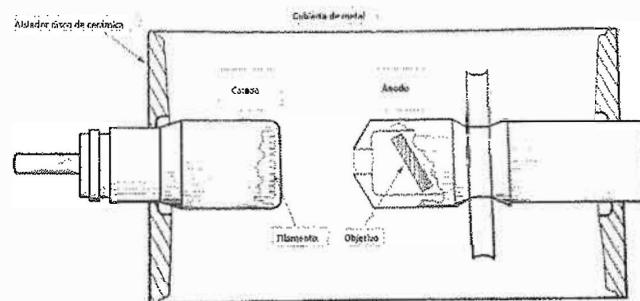


Figura 1.2. Tubo de rayos X metal-cerámico.

Fuente: *HANBOOK Radiographic Testing* (Modificada).

- **Cátodo:** incluye filamento de tungsteno a través del cual se emiten los electrones acelerados. Este se energiza con corriente alterna de 50 hasta 60 Hz desde un transformador controlado separadamente. Normalmente, el rango de corriente en el filamento es de 1 hasta 10 A. La corriente que pasa entre el cátodo y el ánodo por medio de electrones de alta velocidad está por debajo de los  $300\mu\text{A}$  para unidades pequeñas hasta 20mA para unidades de radiografía industrial convencionales.
- **Filamento de calentamiento:** por las características eléctricas del tungsteno, basta con un poco flujo de corriente para calentarlo y emitir los electrones. Cualquier cambio en el amperaje aplicado, puede variar el número de electrones emitidos. En la mayor parte de los equipos de rayos X, el control de la corriente del tubo se obtiene regulando el amperaje aplicado a través del filamento. Cuando se aumenta la corriente del tubo, la intensidad de rayos X también aumenta pero la longitud de onda sigue siendo la misma.

- **Ánodo:** es un electrodo metálico de alta conductividad eléctrica y térmica. Usualmente está hecha de cobre con una porción de tungsteno, oro o plata que va directamente al cátodo. Son estos materiales los que funcionan como objetivo. El cobre y el tungsteno son los materiales más comunes para los ánodos, ya que es necesario un material con un alto punto de fusión para soportar el calor debido a la generación de rayos X.
- **Punto focal:** La distorsión de la imagen se determina parcialmente por el tamaño de la fuente de radiación (punto focal). El haz de electrones usualmente está enfocado al área llamado objetivo que está inclinado cierto ángulo (ver figura 1.3) y el tamaño proyectado del área bombardeada así como se ve desde el objeto de prueba, aparece más pequeño que el punto focal actual y se le llama punto focal efectivo.

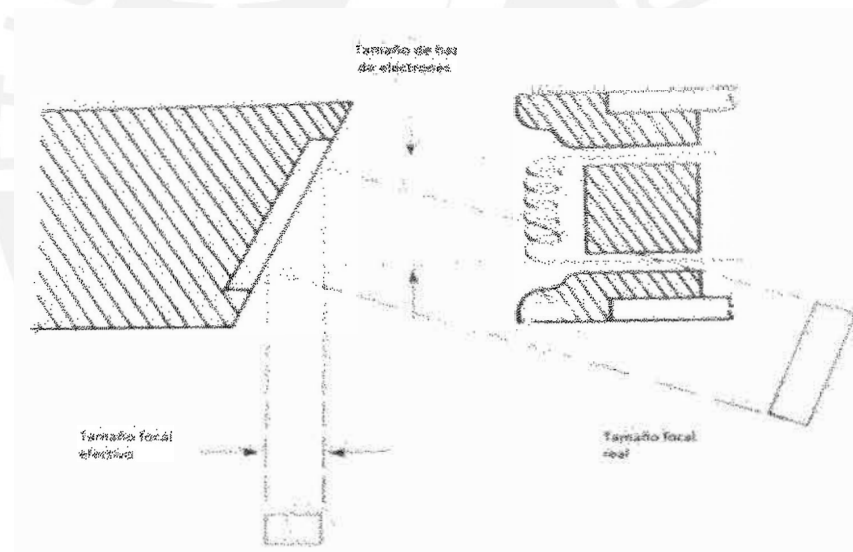


Figura 1.3. Configuración del punto focal.

Fuente: *HANDBOOK Radiographic Testing* (Modificada).

### 1.2.1.1 Tubo protector

Los tubos protectores son usados como equipos de rayos X portátiles, estos consisten de una carcasa metálica exterior con una puerta que es para los rayos X y usualmente contiene el tubo de rayos X, transformadores de alto voltaje y filamento, gas o aceite de aislamiento y una protección a base de plomo. Los tubos protectores que son utilizados permanentemente con los equipos de rayos X contienen todos los elementos antes

mencionados, excepto los transformadores, que son alojados en una unidad separada (ver figura 1.4).

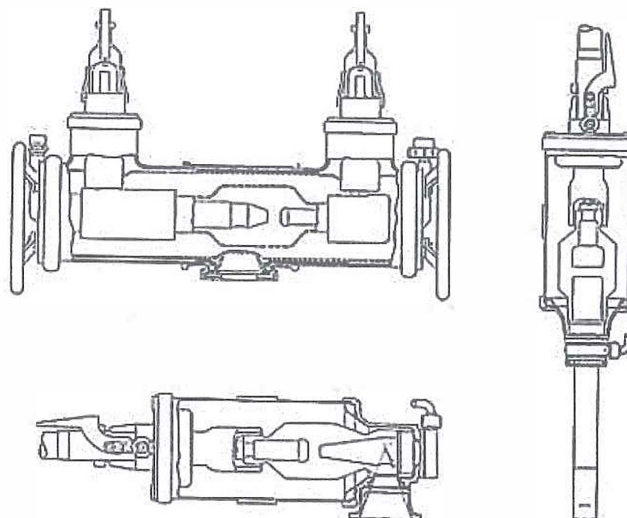


Figura 1.4. Tubos protectores de rayos X.

Fuente: *CLASSROOM TRAINING BOOK Radiographic Testing*.

#### 1.2.1.2 Panel de control

El panel de control de los equipos de rayos X están diseñados para permitir a las personas encargadas de estos equipos, el controlar la generación de rayos X para que las exposiciones puedan ser de forma simple y rápida. El panel también provee circuitos eléctricos de protección que previenen de daño al equipo.



Foto 1.1. Unidad de control de un equipo de rayos X.

Los elementos característicos de una unidad de control de rayos X son los siguientes:

- Selector de voltaje de alimentación que se ajusta a 110V, 220V, etc.
- Interruptor para encender y apagar.
- Selector de alto voltaje y voltímetro calibrado en kV, que permite ajustar la tensión entre ánodo y cátodo.
- Selector de amperaje y amperímetro calibrado en mA. Ajusta la corriente del filamento.
- Cronómetro, para controlar el tiempo de exposición.
- Encendido del generador, para iniciar la generación de rayos X.
- Apagado del generador, para finalizar la generación de rayos X.
- Foco-piloto (color rojo), nos indica cuando el equipo está generando rayos X.

### **1.2.2 Curvas de exposición de rayos X**

Un gráfico de la exposición es un gráfico que muestra la relación entre el espesor del material, kilovoltage y la exposición. En su forma más común de necesidad, un gráfico de la exposición se asemeja a la figura 1.5. Estos gráficos son adecuados para determinar las exposiciones en la radiografía de placas uniformes, pero solo sirven como guías aproximadas para los objetos de diferente forma y espesor.

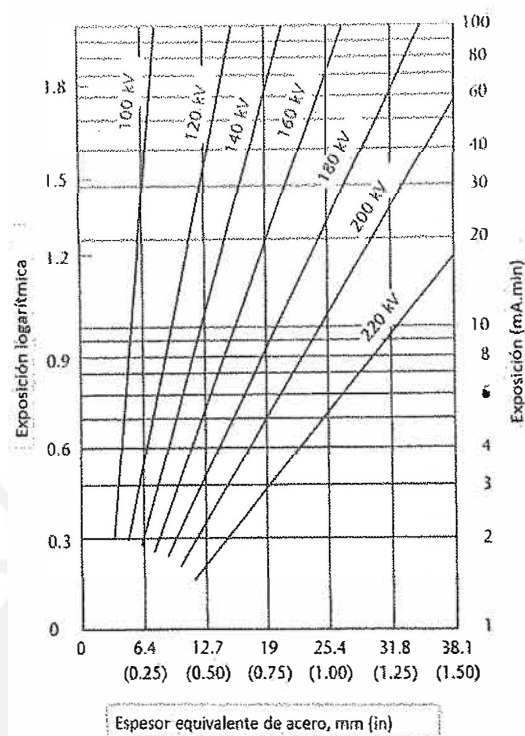


Figura 1.5. Cuadro de exposición de rayos X típico para acero.

Fuente: *HANDBOOK Radiographic Testing* (Modificada).

### 1.2.3 Accesorios del equipo

En este caso solo se presentan tres accesorios que son:

- Colimadores
- Diafragmas
- Conos

Estos son barreras de plomo o de materiales densos, como el tungsteno ensamblado en los tubos de las máquinas de rayos X o los diseñados para contener la fuente de rayos Gamma. Estos son diseñados para poder limitar el área de radiación, como se muestra en la figura 1.6. Donde limitan el haz que va hacia el objeto, gracias a que disminuyen la cantidad de radiación dispersa.

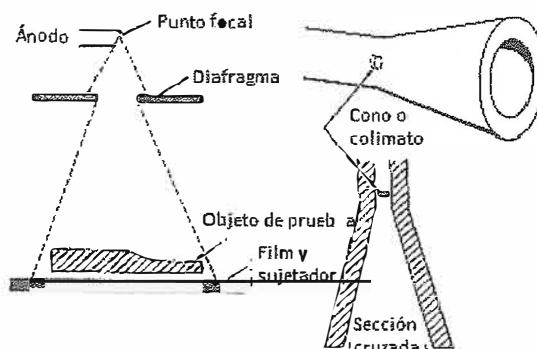


Figura 1.6. Diafragmas, colimadores y conos.

Fuente: *CLASSROOM TRAINING BOOK Radiographic Testing* (Modificada).

### 1.3 Principios de radiología

La radiografía es la materialización de una sombra proyectada sobre una película hecha por un objeto, situado entre esta y el ánodo del tubo por donde pasan las trayectorias de los rayos X o de los rayos Gamma. Por lo tanto, se deduce que la apariencia de una imagen que es registrada, se debe a las posiciones relativas del objeto - película, y por la dirección que toma el haz.

En consecuencia, será preciso estudiar los factores geométricos y los que afectan a la exposición radiográfica, con el fin de obtener radiografías de buena calidad.

#### 1.3.1 Penumbra geométrica

La parte borrosa, que tiene cierto ancho y que no es clara en la imagen de la película se le conoce como penumbra geométrica. Esta es por lo general una consecuencia de los factores geométricos y es directamente proporcional al tamaño del punto focal, al espesor de objeto y a la distancia que hay entre el objeto y la película (ver figura 1.7). Siendo inversamente proporcional a la distancia de la fuente y el objeto. Esta relación se da con la siguiente fórmula.

$$U_g = F \cdot \frac{d}{D_o} \dots\dots\dots (1.1)$$



Donde:

$U_g$  = Penumbra geométrica

$F$  = Tamaño de la fuente, punto focal

$d$  = Distancia objeto – película

$D_o$  = Distancia fuente – objeto

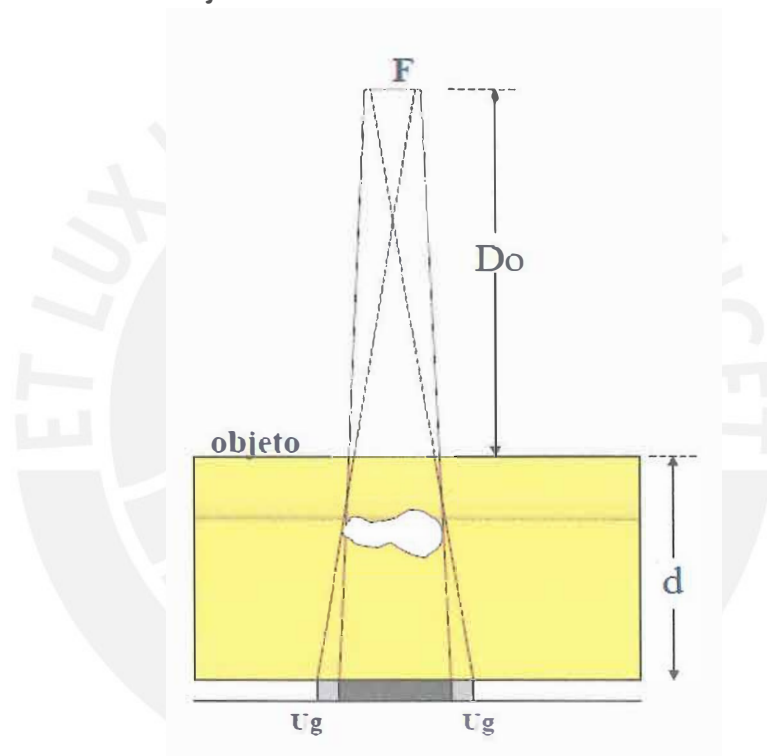


Figura 1.7. Penumbra geométrica.

Fuente: PUCP Radiografía Industrial de Daniel Merino (Modificada).

Se sabe, que la penumbra geométrica mínima se obtiene cuando la fuente es pequeña, la distancia “D” es relativamente grande y la distancia “d” es reducida (ver figura 1.8).

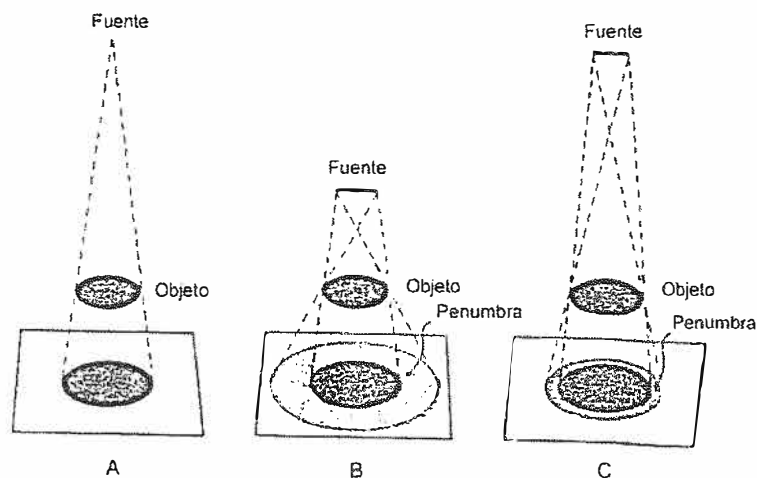


Figura 1.8. Dimensión de la penumbra geométrica según distancias.

Fuente: CAMPUSVIRTUAL.EDU.UY/Ensayo Radiográfico.

### 1.3.2 Ley de los cuadros inversos

La intensidad de un haz de rayos X varía inversamente con el cuadrado de la distancia desde la fuente de radiación. Los rayos X, como los rayos de luz visible, divergen en la emisión de su fuente y cubren áreas cada vez más grandes mientras más aumenta la distancia de la fuente. Esta relación se puede observar en la figura 1.9 y se le conoce como la ley de los cuadros inversos. Esta es una consideración importante en el cálculo de las exposiciones radiográficas y procedimientos de seguridad.

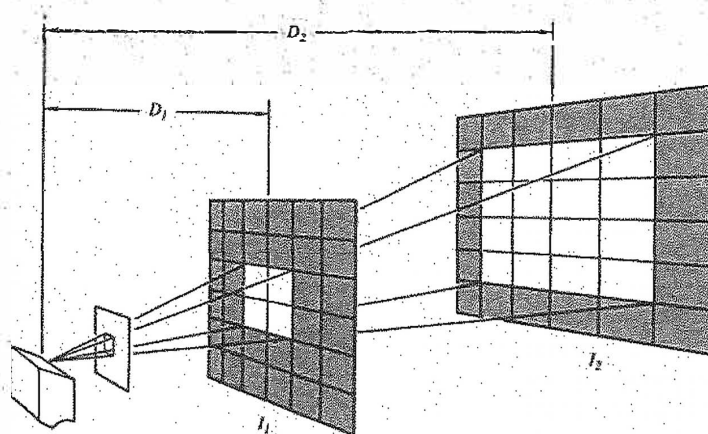


Figura 1.9. Diagrama de la ley del cuadrado inverso.

Fuente: CLASSROOM TRAINING BOOK Radiographic Testing.

La fórmula para esta ley es la siguiente:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2} \dots\dots\dots (1.2)$$

Donde:

I = Intensidad de radiación

D = Distancia fuente – película

### 1.3.3 Procedimiento de inspección según norma ASME

El examen radiográfico se llevará a cabo de acuerdo con un procedimiento escrito. Cada procedimiento debe incluir al menos la siguiente información, según sea el caso:

- El tipo de material y rango de espesor.
- La tensión máxima de isótopos o de rayos X utilizados.
- La distancia fuente – objeto ( $D_o$ ).
- La distancia objeto – película (d).
- El tamaño de la fuente (F).
- Marca y denominación de la película.
- Pantallas utilizadas.

Primero se debe conocer algunas características del material que se va a examinar, como son: el tipo de metal, su configuración, el espesor de la pared a ser radiografiada, etc. Todo esto con el fin de seleccionar el radioisótopo o el kilovoltaje más adecuado.

Una vez que se tiene la fuente de radiación, se deben calcular las distancias entre la fuente, objeto y película para así poder obtener la nitidez deseada.

Por último, se selecciona el tipo de película con las características que nos permitan una exposición en un tiempo razonable y con una calidad de imagen óptima.

## 1.4 Película radiográfica

La película radiográfica es una hoja de plástico transparente delgada, que presenta como componentes fundamentales una capa protectora, una capa sensible llamada emulsión, que recubren un soporte flexible y transparente llamado base (ver figura 1.10).

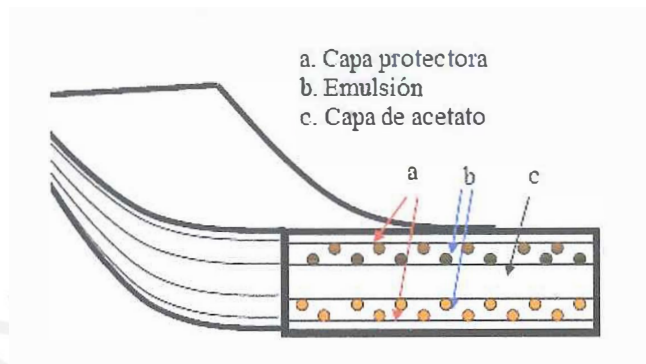


Figura 1.10. Estructura de la película radiográfica.

Fuente: PUCP Radiografía Industrial de Daniel Merino (Modificada).

Cuando se expone a los rayos X, rayos Gamma o luz visible, los bromuros de plata experimentan una reacción que acelera al proceso químico y que convierte a estos en plata metálica negra y esta se da al tratar la película en una solución química o revelador. Si se coloca la emulsión en ambos lados de la base, se duplica la cantidad de radiación que sensibiliza al compuesto de plata, y aumenta la velocidad. Las capas de emulsión son lo suficientemente delgadas para que el revelado, fijación y secado puedan ser completados en un tiempo razonable.

Tiempos a los que debe ser expuesta la película para ser revelada, es el siguiente:

- Revelado: 5 minutos, y reduce las sales de plata expuestas a plata metálica.
- Enjuague: 1 a 2 minutos.
- Fijado: 10 a 20 min, disuelve los granos de sales no expuestos.
- Lavado: 10 a 30 minutos.

### 1.4.1 Densidad fotográfica

La densidad fotográfica, hace referencia a la medición cuantitativa del ennegrecimiento de la película, conocido también como densidad óptica o densidad sentisométrica. Esta está definida por la siguiente ecuación:

$$D = \log \frac{I_0}{I_t} \dots\dots\dots (1.3)$$

Donde:

$D$  = Densidad

$I_0$  = Intensidad de la luz incidente sobre la película

$I_t$  = Intensidad de la luz transmitida

### 1.4.2 Contraste de película

El contraste de la película, es la característica primordial para que la película pueda detectar y registrar diferentes exposiciones de radiación así como las diferencias en la densidad. Este contraste se debe a que las películas radiográficas son fabricadas con una variedad de emulsiones, que nos brindan diferentes contrastes de películas y otras propiedades. Esta relación se expresa en las curvas características de la película y está determinado por los siguientes factores:

- Tamaño e grano y tipo de película.
- Composición química de los productos químicos de procesamiento de película.
- Concentraciones de los productos químicos de procesamiento de película.
- Tiempo de revelado.
- Temperatura de revelado.
- Tipo de agitación.

Tabla 1.1. Clasificación de la película radiográfica en función de su rapidez, contraste y tamaño de grano.

Fuente: Inspección Radiográfica de las Uniones Soldadas.

Tipo	Rapidez	Contraste	Tamaño de grano
1	Lenta	Muy alto	Muy pequeño
2	Media	Alto	Pequeño
3	Alta	Medio	Grande
4	Muy alta (a)	Muy alto (a)	(b)

(a) Películas con pantallas reforzadas fluorescentes.

(b) El tamaño de grano depende de las pantallas fluorescentes utilizadas.

#### 1.4.3 Curvas sensitométricas

Las curvas sensitométricas, también llamadas curvas características o curvas H – D (Hurter – Driffield), relacionan la exposición aplicada a una película radiográfica con la densidad fotográfica resultante, que se obtiene en condiciones de revelado y fijado ya establecidos. En la figura 1.11 se muestran las curvas características de los 4 tipos de películas mencionados anteriormente en la tabla 1.1. Estas curvas se obtienen con una serie de exposiciones a la película, determinando las densidades producidas, graficando la densidad y el logaritmo de la exposición relativa.



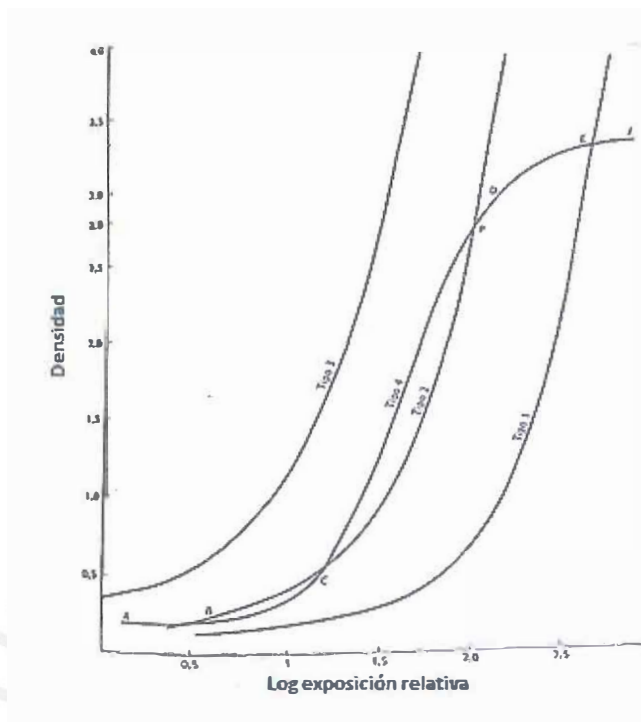


Figura 1.11. Curva característica de 4 películas de rayos X (Densidad vs log exposición relativa).

Fuente: Inspección Radiográfica de las Uniones Soldadas.

La exposición se conoce como el producto de la intensidad de la radiación que alcanza el objeto y el tiempo en el que el objeto está expuesto a esta.

Las curvas características nos muestran como la cantidad de radiación expuesta en el material fotográfico, se relaciona con la densidad de la óptica de la imagen. Una película no expuesta, pero revelada tiene una baja densidad, conocida como base niebla (esta será mayor si la película es revelada por un tiempo mayor).

Se sabe que la cantidad de radiación es directamente proporcional al tiempo de exposición, lo cual permite establecer:

$$E = M^*t \dots\dots\dots (1.4)$$

Donde:

E = Exposición o dosis

M = Corriente del tubo (mA)

t = Tiempo de exposición

Es esta relación que permite la exposición de rayos X, a un kilovoltaje dado, nos dé el resultado en términos de miliamperio-minuto o miliamperio-segundos. De la misma forma con los rayos Gamma, pero en términos de Curie-minutos, milicurie-minutos o milicurie-segundos.

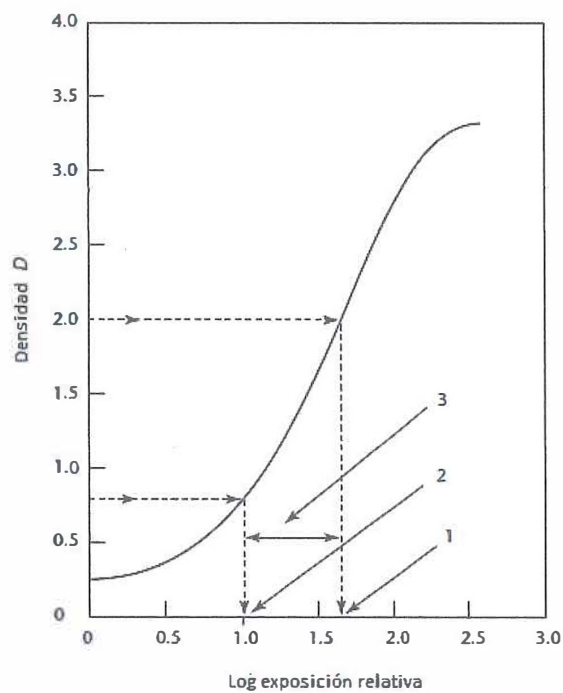
#### **1.4.3.1 Uso de las curvas características**

Estas curvas pueden ser usadas para resolver problemas cuantitativos que empiezan en la radiografía, en la preparación de cuadros técnicos y en la investigación radiográfica.

Las curvas características hechas bajo las condiciones radiográficas actuales deberían ser usadas para resolver problemas prácticos, sin embargo no siempre es posible producir este tipo de curvas, por lo que se usa curva ya hechas en otros lugares.

La exactitud que se logra, cuando se usan las curvas características preparadas, está gobernada en gran medida por la similitud entre las condiciones del revelado que se usan para producir las curvas características y de las películas, donde sus densidades van a ser evaluadas.

Se puede observar el uso de esta curva en la figura 1.12.



**Leyenda**

1.  $\log E = 1.62$  at  $D = 2.0$ .
2.  $\log E = 1.00$  at  $D = 0.8$ .
3. Diferencia en  $\log E$  es  $0.62$ .

Figura 1.12. Curva característica de una película radiográfica.

Fuente: *HANDBOOK Radiographic Testing* (Modificada).

En este ejemplo se quiere incrementar la densidad de 0.8 con una exposición de 12 mA·min a una densidad de 2.0.

Cómo se ve el  $\log E$  es de 0.62 y el antilogaritmo de esta diferencia es 4.2, que se usa para multiplicar a la exposición inicial que nos da el valor de 50 mA·min para producir una densidad de 2.0.

#### **1.4.4 Densitómetros**

El densitómetro es mejor dicho un instrumento óptico que sirve para medir las densidades fotográficas. Esta densidad de la película que es de un rango requerido, es usualmente especificada en los procedimientos radiográficos. Estos instrumentos deben estar disponibles para poder cumplir con las especificaciones. El densitómetro es esencial para crear las curvas características de la película.

Existen diferentes tipos de densitómetros, ya sean visuales o fotoeléctricos. Para propósitos prácticos de la radiografía industrial, no existe una gran importancia en la alta precisión de un densitómetro. Una propiedad más importante es la fiabilidad, porque el densitómetro debe reproducir lecturas del día a día.

#### **1.5 Requisitos y secuencia de inspección por radiografía industrial**

Continuando el método de inspección según la norma ASME, la película se coloca dentro de una porta película para proteger a esta de la luz y evitar que se dañe la emulsión fotográfica. Además, contiene pantallas intensificadoras que sirven para la reducción del tiempo de exposición, mejorando la calidad de la imagen.

Cuando se realiza todo o anterior, se procede con las medidas de seguridad radiológica en la zona en la que se va a efectuar la radiografía, para así evitar una sobredosis de estos rayos en el personal.

A continuación, se procede en colocar la fuente a la distancia calculada con respecto al objeto y se coloca la película radiográfica del otro lado para registrar la radiación del material a prueba.

La radiación provoca la impresión de la película radiográfica, que es el negativo de una fotografía. Al realizarse la inspección, los indicadores de calidad de imagen se eligen de manera que el espesor de éstos represente aproximadamente el 2% del espesor de la parte a inspeccionar.

Luego de estos, la película se lleva a revelar y si se comprueba que la imagen es aprobada, se inspecciona para poder ver qué tipo de discontinuidades o fallas presenta y saber qué efecto tendrá sobre el material.

### 1.5.1 Indicadores de calidad de la imagen

Para esto tenemos los penetrámetros tipo agujero y los penetrámetros tipo alambre. Estos, se colocan en la zona más desfavorable; esto es, en la zona a inspeccionar más alejada de la película, ya que esta será la más afectada por la borrosidad y distorsión.

En este trabajo de investigación, nos enfocaremos en los penetrámetros tipo alambre.

#### 1.5.1.1 Penetrámetros tipo alambre

Son Indicadores de Calidad de la Imagen (ICI), de acuerdo con las normas ASTM, para la obtención e identificación de imágenes claras y bien definidas en radiografía (ver figura 1.13).

$$DE = \frac{\phi}{d_{total}} * 100 \dots \dots \dots (1.10)$$

Donde:

DE = Sensibilidad requerida (%)

$\phi$  = Diámetro del hilo más fino visible

$d_{total}$  = Espesor total a radiografiar

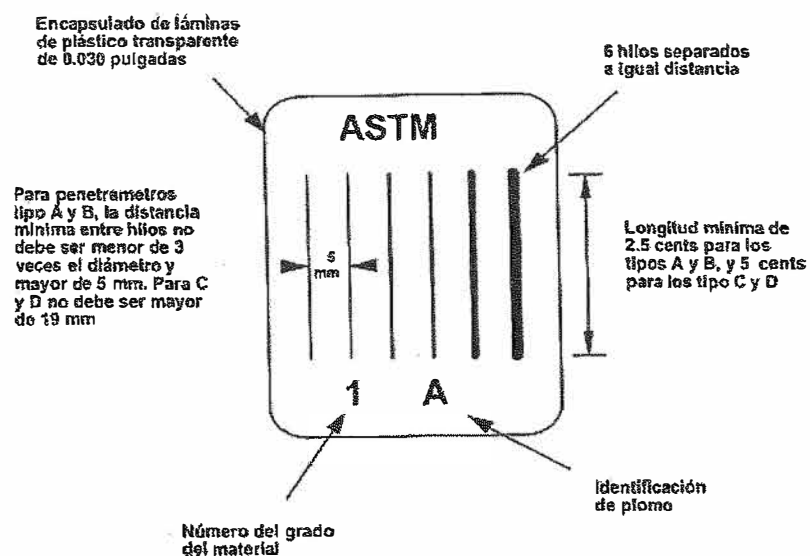


Figura 1.13. Estuche de hilos.

Fuente: PUCP Radiografía industrial de Daniel Merino.

Tabla 1.3. Designación ICI tipo alambre, diámetro del alambre e identidad del alambre.

Fuente: ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V (Modificada).

Estuche A			Estuche B		
Diámetro del alambre, pulg.	(mm)	Identidad del alambre	Diámetro del alambre, pulg.	(mm)	Identidad del alambre
0.0032	(0.08)	1	0.010	(0.25)	6
0.004	(0.10)	2	0.013	(0.33)	7
0.005	(0.13)	3	0.016	(0.41)	8
0.0063	(0.16)	4	0.020	(0.51)	9
0.008	(0.20)	5	0.025	(0.64)	10
0.010	(0.25)	6	0.032	(0.81)	11
Estuche C			Estuche D		
Diámetro del alambre, pulg.	(mm)	Identidad del alambre	Diámetro del alambre, pulg.	(mm)	Identidad del alambre
0.032	(0.81)	11	0.100	(2.54)	16
0.040	(1.02)	12	0.126	(3.20)	17
0.050	(1.27)	13	0.160	(4.06)	18
0.063	(1.60)	14	0.200	(5.08)	19
0.080	(2.03)	15	0.250	(6.35)	20
0.100	(2.54)	16	0.320	(8.13)	21



Tabla 1.4. Selección ICI.

Fuente: ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V (Modificada).

Rango de espesor nominal – Pared simple, pulgadas	ICI					
	Lado de la fuente			Lado de la película		
	Designación del Tipo de agujero	Agujero esencial	Tipo de alambre	Designación del Tipo de agujero	Agujero esencial	Tipo de alambre
Hasta 0.25	12	2T	5	10	2T	4
0.25 a 0.375	15	2T	6	12	2T	5
0.375 a 0.50	17	2T	7	15	2T	6
0.50 a 0.75	20	2T	8	17	2T	7
0.75 a 1.00	25	2T	9	20	2T	8
1.00 a 1.50	30	2T	10	25	2T	9
1.50 a 2.00	35	2T	11	30	2T	10
2.00 a 2.50	40	2T	12	35	2T	11
2.50 a 4.00	50	2T	13	40	2T	12
4.00 a 6.00	60	2T	14	50	2T	13
6.00 a 8.00	80	2T	16	60	2T	14
8.00 a 10.00	100	2T	17	80	2T	16
10.00 a 12.00	120	2T	18	100	2T	17
12.00 a 16.00	160	2T	20	120	2T	18
16.00 a 20.00	200	2T	21	160	2T	20

### 1.6 Ventajas y desventajas de la Radiografía Industrial

En este tipo de END, se puede tener muchas ventajas como desventajas, entre ellas tenemos las siguientes:

Ventajas:

- Detecta defectos internos.
- Existe registro de la inspección.
- Se determina forma y tamaño del defecto.
- Es independiente de la forma y dimensiones (relativo) del material.
- Los defectos (señales) pueden ser visibles directamente (fluoroscopia).
- Buena detectabilidad de defectos en soldadura.

Desventajas:

- Limitado por el espesor y geometría complicada.
- Personal de alta calificación.
- Aplicable con eficiente protección radiológica.
- Equipos costosos.



## CAPÍTULO 2 DETECTOLOGÍA Y PREPARACIÓN DEL DISPOSITIVO

En las soldaduras manuales, automáticas o cualquier procedimiento que se haya usado para realizarlas; se pueden producir discontinuidades, defectos o heterogeneidades, cuya posible presencia en las soldaduras merece que la unión sea inspeccionada. Estas discontinuidades se detectan, como se mencionó antes, por END. En este caso nos basaremos en el Ensayo No Destructivo de la Radiografía Industrial.

### 2.1 La discontinuidad

Las discontinuidades son interrupciones en la estructura física deseable de la soldadura. Se considera que la discontinuidad es un defecto cuando la misma constituye un peligro para el funcionamiento idóneo de la soldadura. Esto indica que la soldadura requiere medidas correctivas o su rechazo.

La discontinuidad en la soldadura debe ser vista como algo idóneo para el propósito que debe cumplir la soldadura; siendo esta idoneidad un balance entre la calidad, confiabilidad y economía del procedimiento de soldadura. Existen normas y códigos de aceptación que son usados cuando una discontinuidad ha sido claramente localizada, identificada, medida, determinada su orientación y estructuralmente cuestionada. Se considera que una discontinuidad es aceptable cuando la misma no influye en la confiabilidad de la soldadura.

Las discontinuidades en las soldaduras se dividen en tres grupos: relacionadas al diseño, al proceso de soldadura y a los aspectos metalúrgicos, siendo más comunes: los poros, las inclusiones de escoria, la falta de fusión, la falta de penetración, etc.

### 2.1.1 Tipos de discontinuidades

- Porosidad: son cavidades que se producen por inclusiones gaseosas que pueden presentarse de manera dispersa y de pequeño tamaños. También, pueden presentarse concentradas en el centro del cordón de soldadura, dando lugar a cavidades de mayor tamaño (ver figura 2.1).

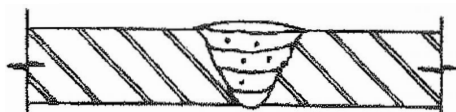


Figura 2.1. Porosidad.

Fuente: *Acceptance Criteria for Welds and Examination Methods for Evaluating Weld Imperfections* (Modificada).

- Inclusiones de escoria: este tipo de discontinuidad se da por materia extraña que se encuentra aprisionada durante el proceso de soldadura. Se presentan más en las uniones efectuadas por pasadas múltiples (ver figura 2.2).



Figura 2.2. Inclusiones de escoria.

Fuente: *Acceptance Criteria for Welds and Examination Methods for Evaluating Weld Imperfections* (Modificada).

- Falta de fusión: este tipo de discontinuidad se da entre el material base y el material de aporte. Se da por la mala preparación del diseño de la junta o por la preparación del metal base. En donde hay una falta de acceso a todas las superficies de fusión (ver figura 2.3).



Figura 2.3. Falta de fusión.

Fuente: *Acceptance Criteria for Welds and Examination Methods for Evaluating Weld Imperfections* (Modificada).

- Falta de penetración: esto sucede cuando el material de aporte no ha logrado rellenar la raíz al momento de soldar (ver figura 2.4).



Figura 2.4. Falta de penetración.

Fuente: *Acceptance Criteria for Welds and Examination Methods for Evaluating Weld Imperfections* (Modificada).

- Mordedura de bordes: se presenta como una ranura o garganta en la superficie o en la parte interna de la soldadura (ver figura 2.5).

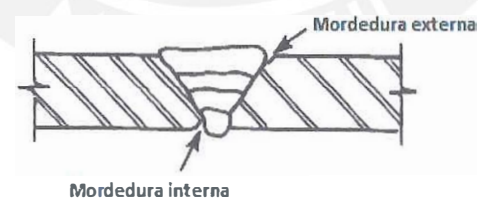


Figura 2.5. Falta de penetración.

Fuente: *Acceptance Criteria for Welds and Examination Methods for Evaluating Weld Imperfections* (Modificada).

- Exceso de refuerzo externo: es el exceso de metal en la soldadura conocida como sobre monta excesiva, la sobre monta es un concentrador de tensiones y, además, un exceso de esta aumenta las tensiones residuales, presentes en cualquier soldadura, debido al aporte sobrante. (ver figura 2.6).



Figura 2.6. Exceso de refuerzo externo.

Fuente: *Acceptance Criteria for Welds and Examination Methods for Evaluating Weld Imperfections* (Modificada).

### 2.1.2 Discontinuidad a examinar

Esta investigación se realizó utilizando una tubería soldada vacía y la misma tubería, pero con agua. Para esto, nos tuvimos que basar en el tiempo de exposición de la tubería vacía, frente a los rayos X para obtener el tiempo de exposición y la imagen de referencia.

En donde la placa radiográfica de la tubería soldada que está llena de agua, debe ser de una calidad similar o igual de clara a cuando esta se encuentra vacía, para identificar la misma discontinuidad.

Lo que se quiere lograr obtener es el factor de corrección que debe hacerse a las variables de tiempo y exposición para que las placas radiográficas finales de la tubería con agua cumplan con los requisitos de calidad del Artículo 2 del Código ASME, sección V, Edición 2015, y a lo recomendado en el Apéndice A "*Recommended Radiographic Technique Sketches for Pipe or Tube Welds*" de dicho Código.

La discontinuidad que presenta la tubería soldada se mostrará más adelante en el capítulo 3.1.

## 2.2 Prototipo de tubería

En esta investigación, se usará una tubería de acero inoxidable. Esta tubería representa a las utilizadas en la industria, como: las usadas en calderas, intercambiadores de calor, condensadores, industria alimentaria, azucarera, papelería, química, etc.

### 2.2.1 Dimensiones y propiedades

Como se mencionó antes, se usará una tubería de acero inoxidable, con las siguientes medidas (ver figura 2.7).

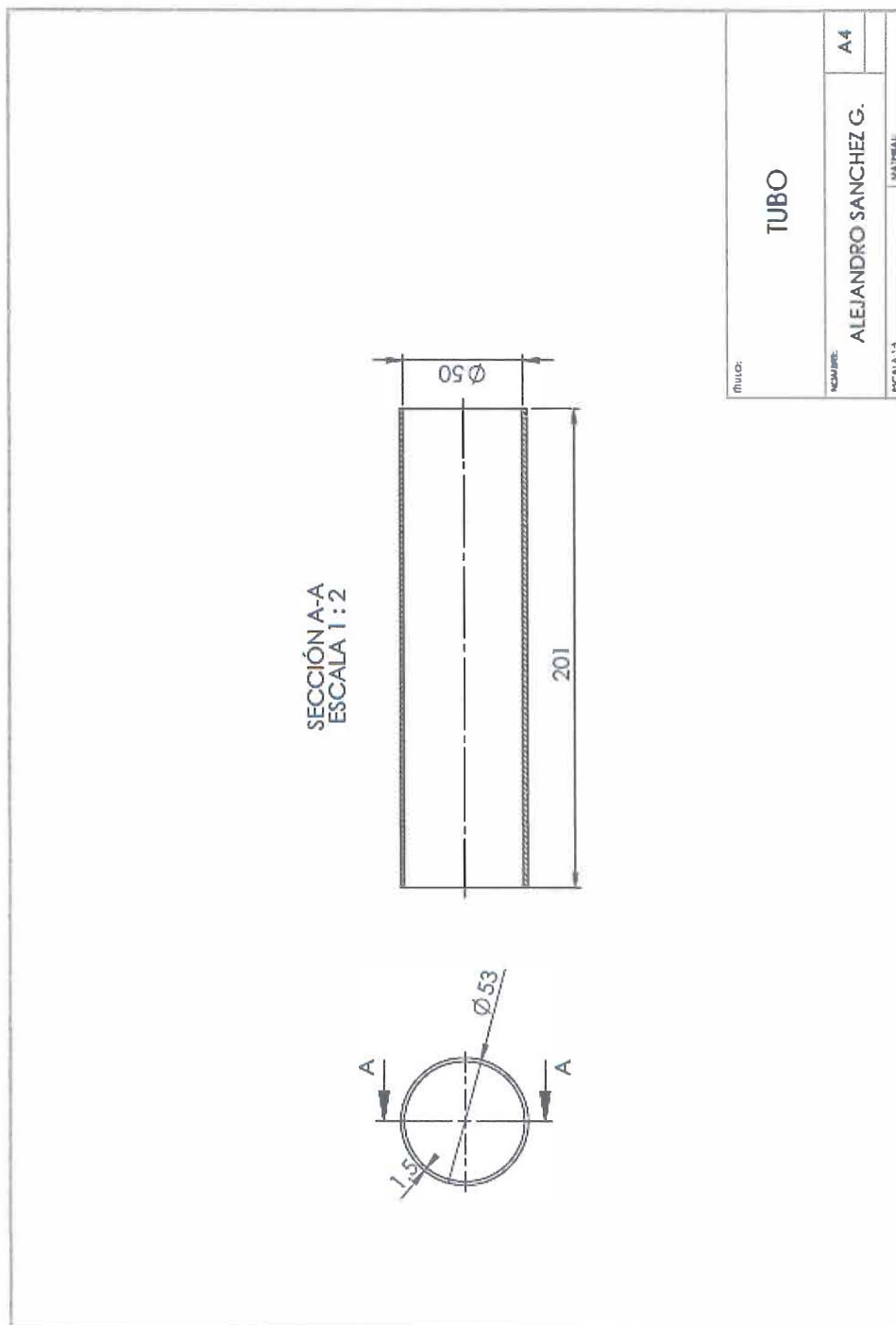


Figura 2.7. Tubería de acero inoxidable.



Para que esta contenga agua, se le soldaron a ambas caras de la tubería unas tapas (ver figura 2.8 y 2.9).

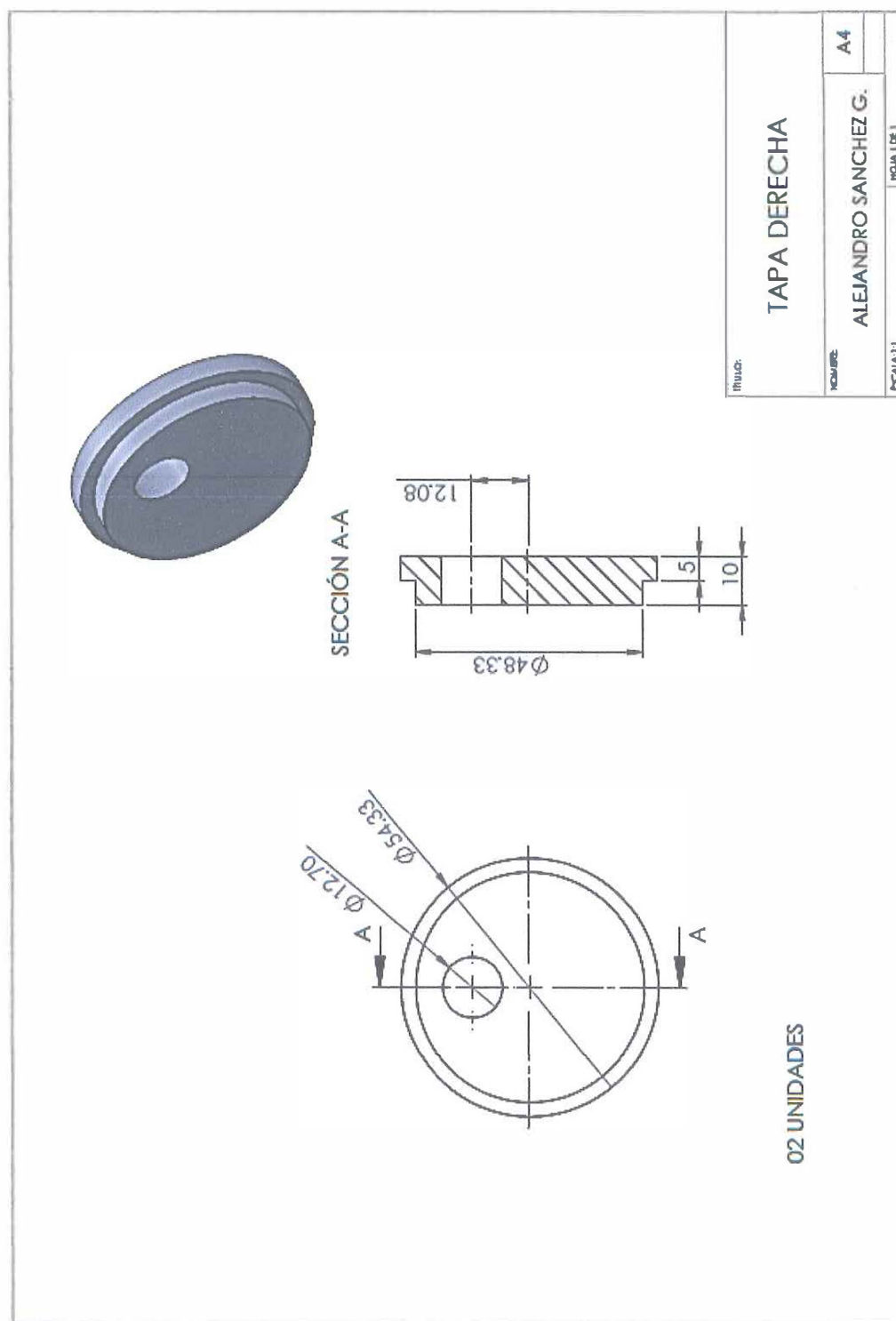


Figura 2.8. Tapa derecha.

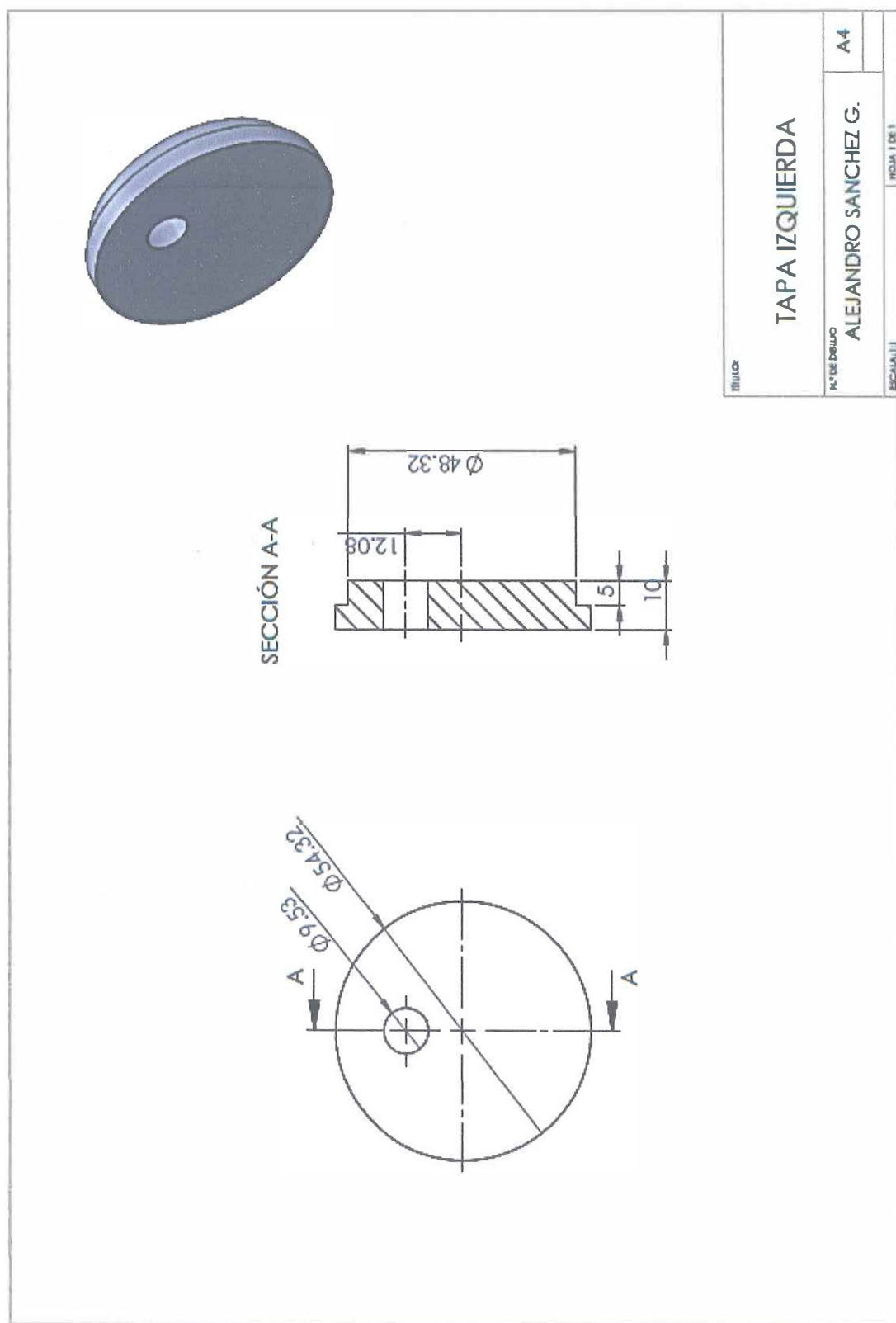


Figura 2.9. Tapa izquierda.

Como se puede observar, cada tapa cuenta con un agujero. Estos sirven para poder soldar su respectiva tobera, para el ingreso del agua. Estas las podemos observar en la figura 2.10 y 2.11.

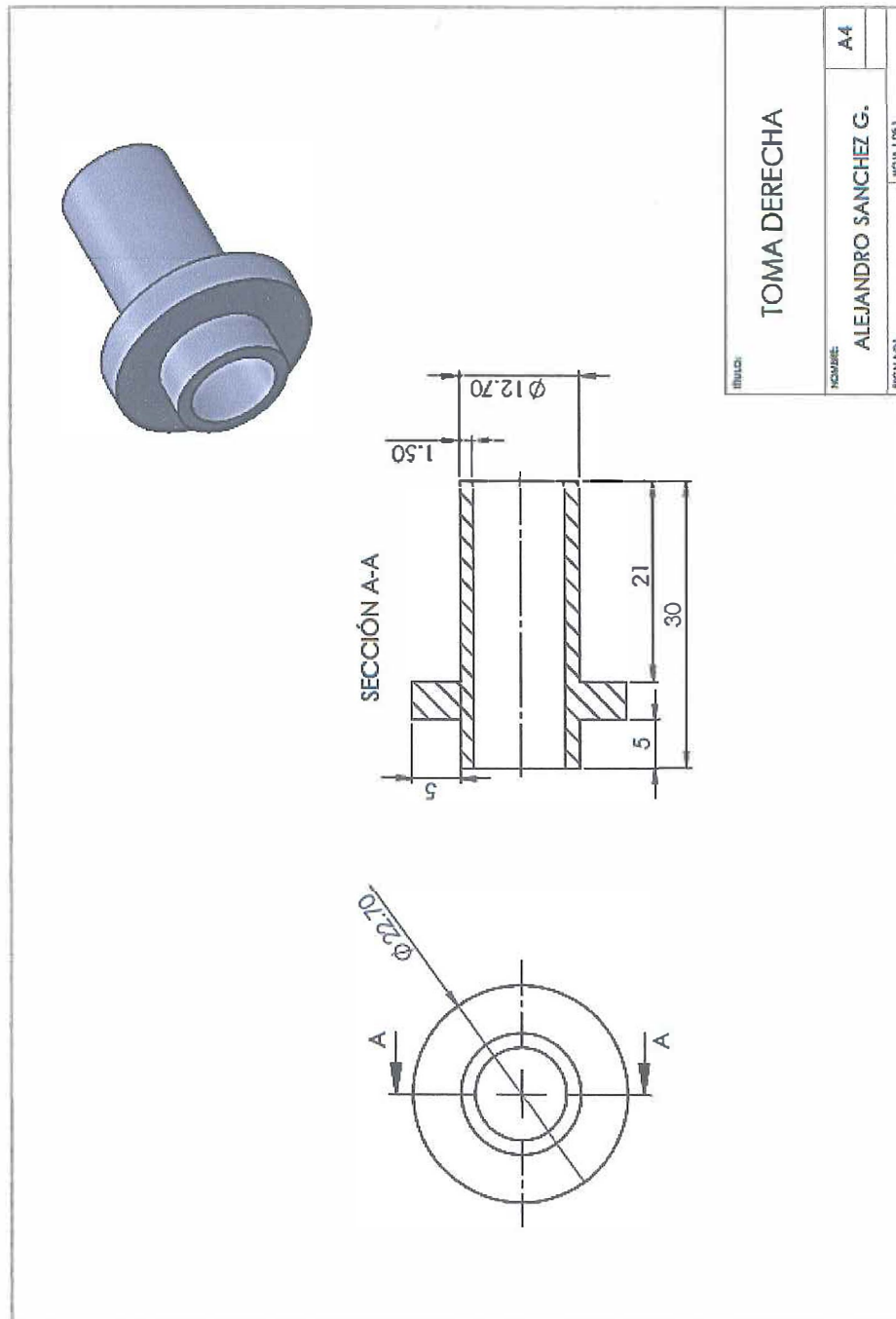


Figura 2.10. Toma derecha.

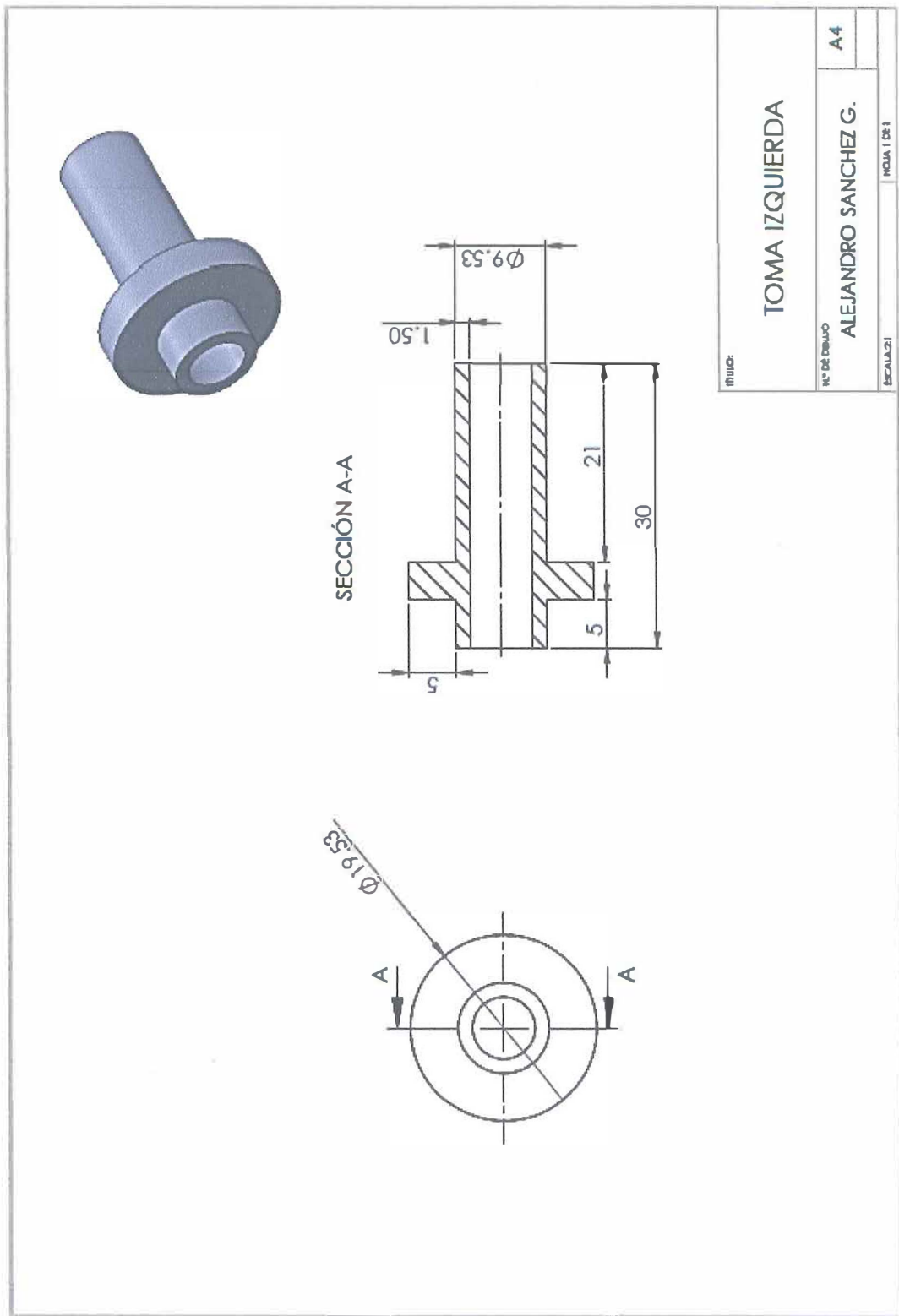


Figura 2 11 a iz uie

Al soldar todos elementos, el prototipo que se obtiene es el siguiente (ver figura 2.12 y foto 2.1)

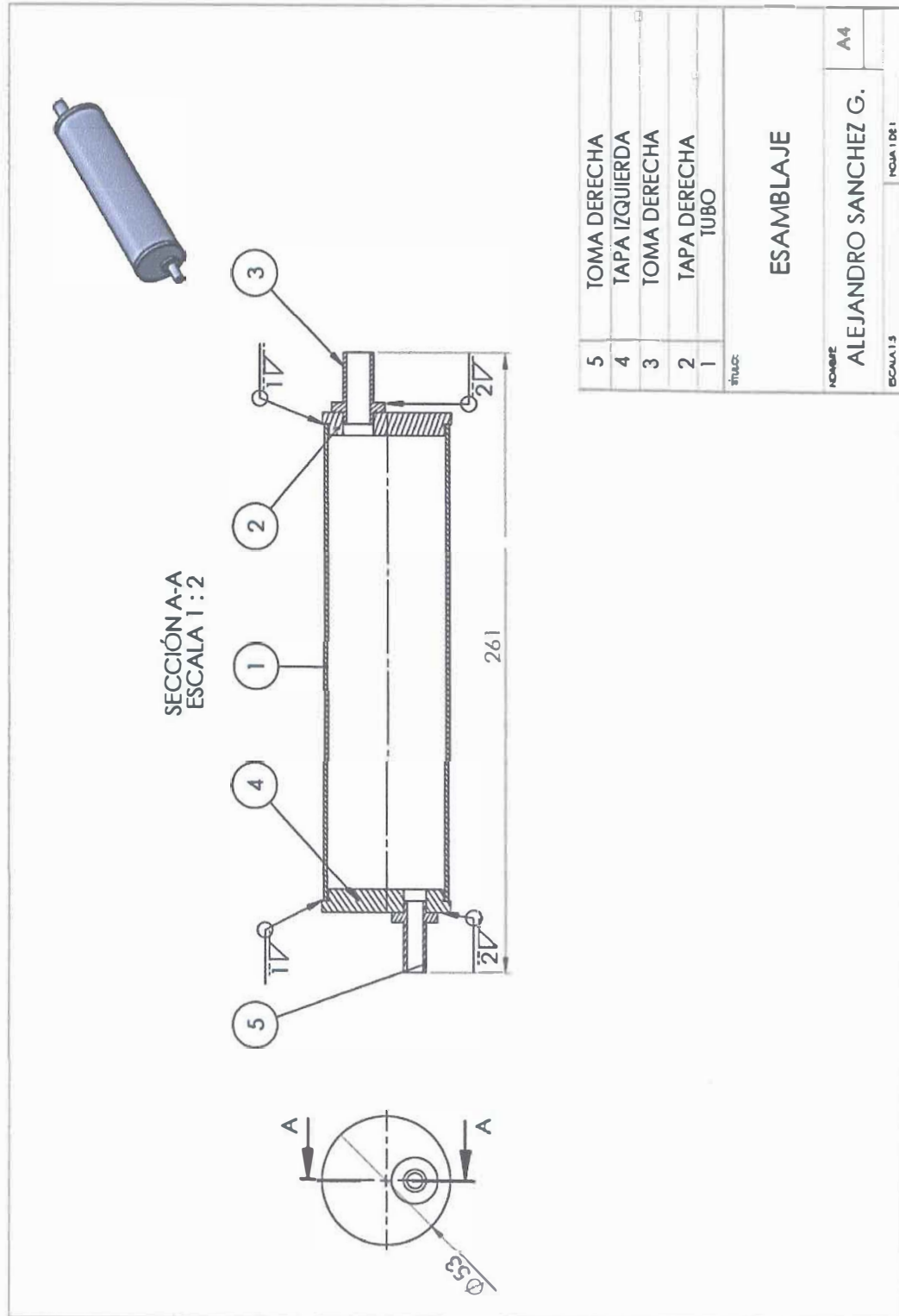


Figura 2.12. Prototipo virtual.



Foto 2.1. Prototipo real.

## 2.3 Equipo

### 2.3.1 Equipos de rayos X y sistema de colimación del Haz.

El equipo de rayos X SMART200PC (ver foto 2.2), opera con un transformador de corriente alterna. Este provee de energía al equipo, para emitir los rayos X. Sus características principales son las siguientes.

- Marca : YXLON
- Modelo : SMART200PC
- Procedencia : Alemania
- Diámetro del tubo : 200 mm
- Diámetro del punto focal : 0.4 x 4 mm
- Peso del equipos : 27 Kg
- Rango de voltaje : 50 – 200 Kv
- Rango de amperaje: 0.5 – 4.5 mA

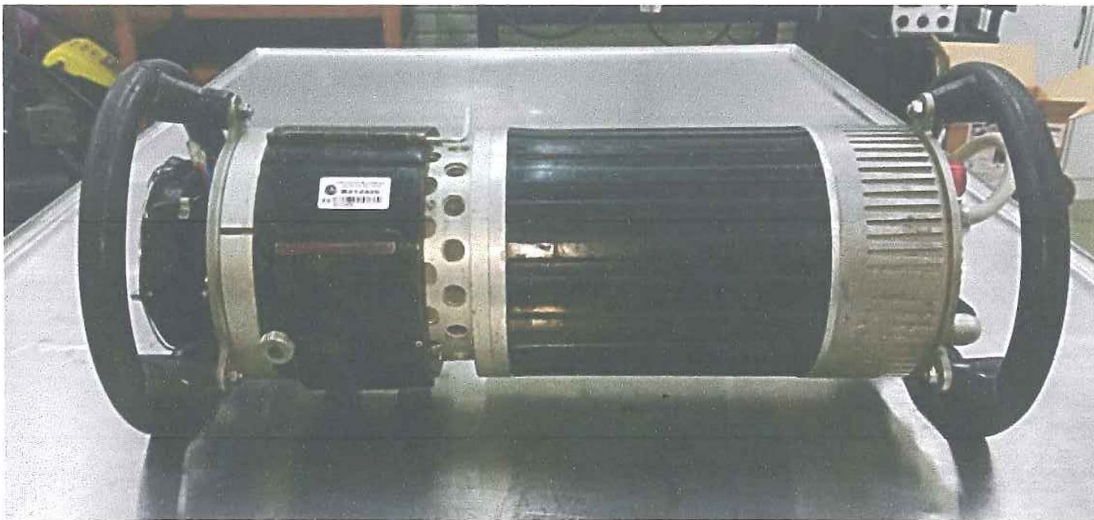


Foto 2.2. Tubo de rayos X SMART200PC.

#### **2.3.1.1 Sistema de colimación del haz**

El haz de rayos X presenta un sistema de colimación, que está constituido por una consola. Este sirve para homogeneizar las trayectorias o rayos emitidos de la fuente.

Los rayos contienen las mismas propiedades, por el colimador. El cual se encuentra en el mismo tubo de rayos X.

#### **2.3.2 Películas radiográficas y módulos de revelado**

La película radiográfica utilizada en esta investigación es la marca AGFA tipo D7 Structurix (ver foto 2.3). Estas películas serán reveladas en el módulo de revelado del Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (ver foto 2.4 y foto 2.5).





Foto 2.3. Película radiográfica.



Foto 2.4. Módulo de revelado con luz encendida.

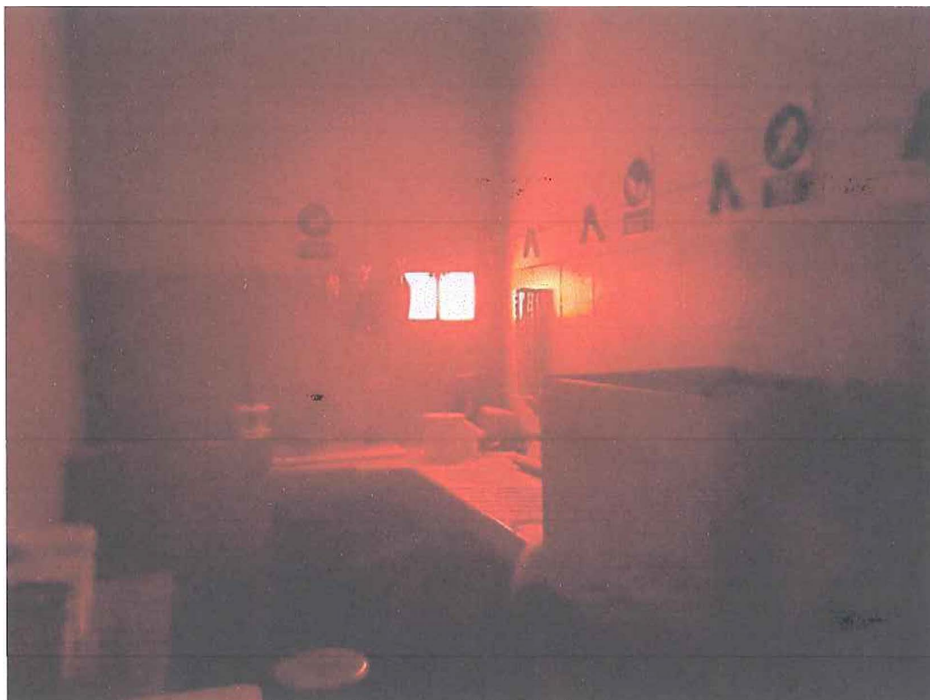


Foto 2.5. Módulo de revelado con luz apagada.

En el módulo de revelado se tienen los baños respectivos para hacer la imagen permanente en la película (ver foto 2.6) y el instrumento donde va la película para ser puesta en cada baño (ver foto 2.7).

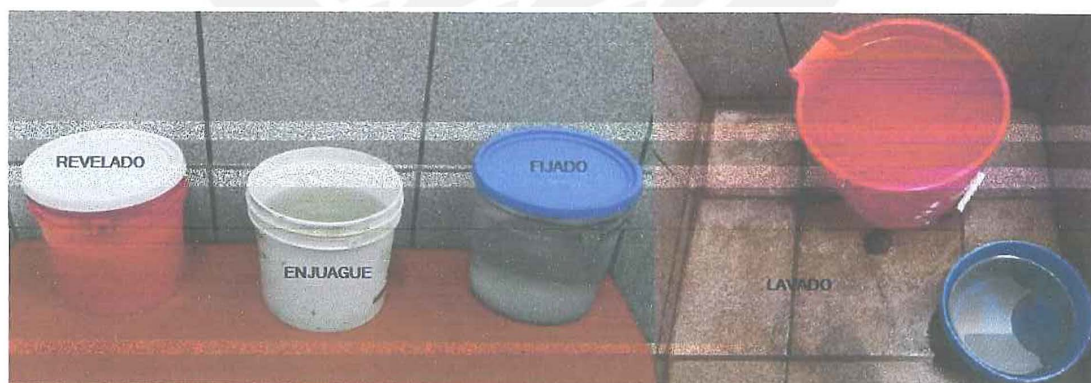


Foto 2.6. Procesos de revelado.

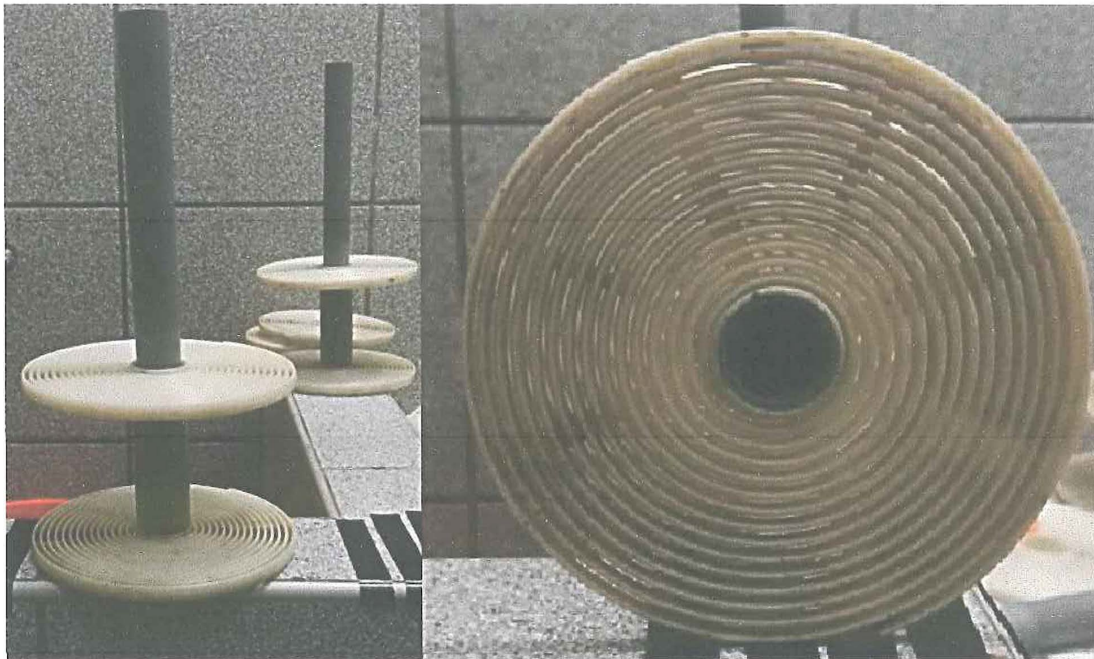


Foto 2.7. Base para película.

Los procesos por cuales pasa la película son:

- Revelado: donde las áreas expuestas a radiación se toman oscuras (por reducción de la plata metálica, esto es a partir de las sales) y el grado de ennegrecimiento, va a depender del nivel de radiación recibido. La película debe estar expuesta 5 minutos a este baño (ver figura 2.13).

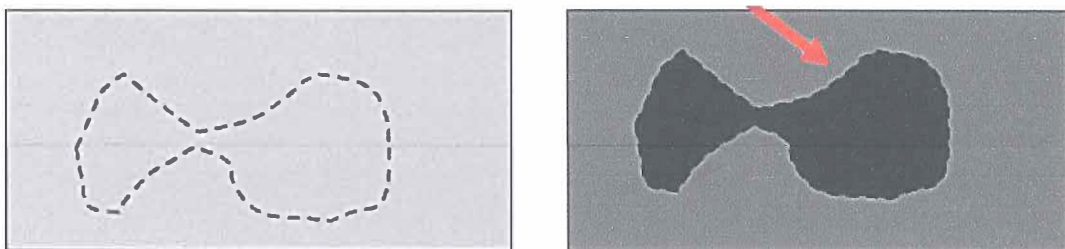


Figura 2.13. Revelado.

Fuente: PUCP Radiografía Industrial de Daniel Merino (Modificada).

- Baño de parada: la función que tiene este proceso, es el de interrumpir la acción del revelador, evitando un revelado desigual y así prevenir las manchas en la película. Se tiene que agitar la película durante al menos 1 minuto. Este puede



estar compuesto de agua con ácido acético o acético glacial (35 ml por litro agua). La película debe estar expuesta de 1 a 2 minutos (ver figura 2.14).



Figura 2.14. Baño de parada.

Fuente: PUCP Radiografía Industrial de Daniel Merino (Modificada).

- Fijado: la función de este proceso es el de remover las sales (bromuro) de plata no expuestas a la radiación, endurece la emulsión gelatinosa lo que permite el secado al aire. Está compuesto por: tiempo de definición y tiempo adicional para remoción de sales no expuesta. La película debe estar expuesta a este proceso de 10 a 20 minutos (ver figura 2.15).

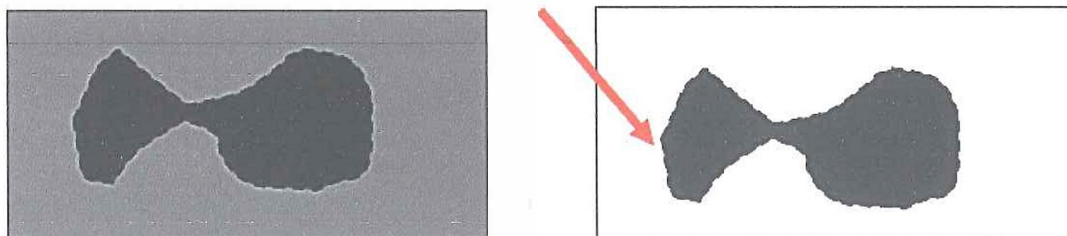


Figura 2.15. Fijado.

Fuente: PUCP Radiografía Industrial de Daniel Merino (Modificada).

- Lavado de la película: la función de este proceso es el de remover el fijador de la emulsión, interrumpir la acción del revelador, evitando un revelado desigual y previniendo las manchas en la película. Se agita la película durante al menos 1 minuto y como el baño de parada debe estar compuesto de agua con ácido acético o acético glacial (35 ml por litro de agua). La película debe estar expuesta a este proceso de 10 a 30 minutos (ver figura 2.16).

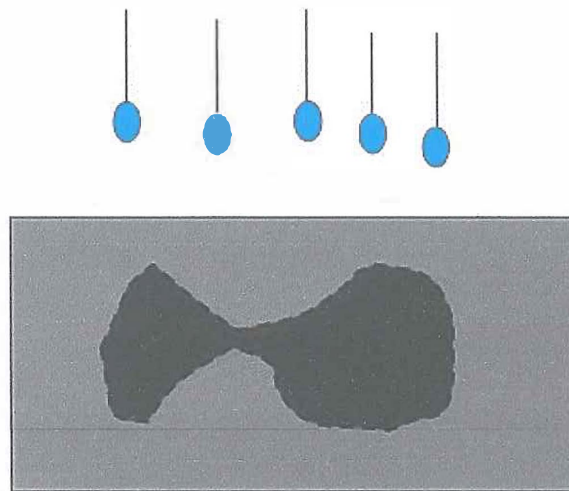


Figura 2.16. Lavado.

Fuente: PUCP Radiografía Industrial de Daniel Merino (Modificada).

- Secado: paso final después del lavado. Dejar secando la película de un día para otro (ver foto 2.8).



Foto 2.8. Secado de las películas.

### 2.3.3 Instrumentos de medición

Para los ensayos de RI, se usarán los siguientes instrumentos:

- Cronómetro digital: ayudará a controlar el tiempo de exposición, también el tiempo en el revelado (ver foto 2.9).

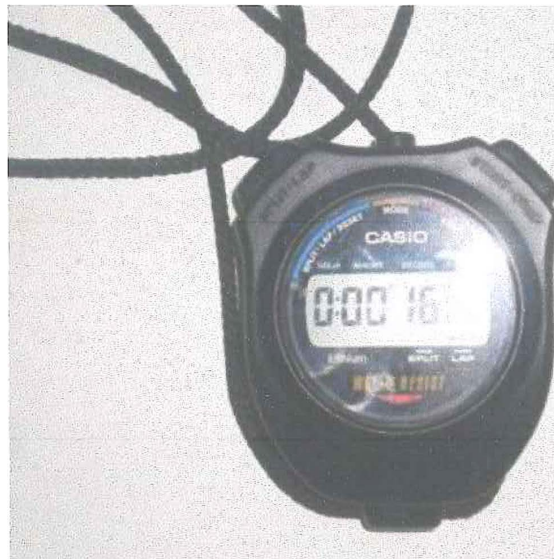


Foto 2.9. Cronómetro digital

- Densitómetro digital: Con este podremos verificar la densidad de la película (ver foto 2.10).



Foto 2.10. Densitómetro digital.

### CAPÍTULO 3

#### ENSAYO DE RI A LA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE SOLDADA Y DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN

Para poder realizar los ensayos de Ri, se tienen que realizar ciertos cálculos previos. Para esto necesitamos los gráficos y curvas del equipo de radiografía, las tablas del Artículo 2 del Código ASME, sección V, Edición 2015, y a lo recomendado en el Apéndice A "*Recommended Radiographic Technique Sketches for Pipe or Tube Welds*" de dicho Código, los datos de la tubería y las ecuaciones anteriormente mencionada.

Datos de la pieza (ver figura 3.1):

- Tubería de acero Inoxidable.
- Diámetro exterior (De): 53 mm
- Diámetro interior (Di): 50 mm
- Espesor de la pared de la tubería (Ep): 3 mm
- Espesor de sobre monta de la soldadura (Sm): 1.5 mm

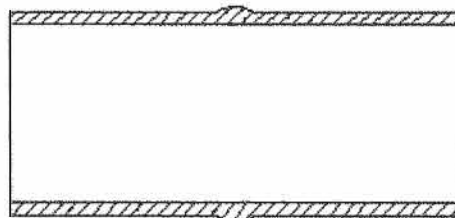


Figura 3.1. Tubería con sobre monta.



Datos del equipo de RX:

- Estos se mencionaron anteriormente en el capítulo 2 en el inciso 2.3.1.

Con estos datos podemos comenzar con la selección del ICI y del estuche de alambres para poder obtener imágenes claras, según la cantidad de alambres que se logren observar en la película.

Para obtener el espesor de material que se va a radiografiar se utiliza el siguiente cálculo:

$$e = (E_p + S_m) \dots\dots\dots (3.1)$$

Reemplazando datos de la tubería, obtenemos:

$$e = 3+2*1.5 = 6 \text{ mm} \dots\dots\dots (3.2)$$

Con esto vamos a la tabla 1.4 de selección de ICI y como sabemos 6 mm es 0.24 pulg, con esto seleccionamos el tipo de alambre, el cual estará del lado de la película en los ensayos (ver figura 3.1, ver foto 3.1).

Rango de espesor nominal – Pared simple, pulgadas	ICI					
	Lado de la fuente			Lado de la película		
	Designación del Tipo de agujero	Agujero esencial	Tipo de alambre	Designación del Tipo de agujero	Agujero esencial	Tipo de alambre
Hasta 0.25	12	2T	5	10	2T	4
0.25 a 0.375	15	2T	6	12	2T	5
0.375 a 0.50	17	2T	7	15	2T	6
0.50 a 0.75	20	2T	8	17	2T	7
0.75 a 1.00	25	2T	9	20	2T	8
1.00 a 1.50	30	2T	10	25	2T	9
1.50 a 2.00	35	2T	11	30	2T	10
2.00 a 2.50	40	2T	12	35	2T	11
2.50 a 4.00	50	2T	13	40	2T	12
4.00 a 6.00	60	2T	14	50	2T	13
6.00 a 8.00	80	2T	16	60	2T	14
8.00 a 10.00	100	2T	17	80	2T	16
10.00 a 12.00	120	2T	18	100	2T	17
12.00 a 16.00	160	2T	20	120	2T	18
16.00 a 20.00	200	2T	21	160	2T	20

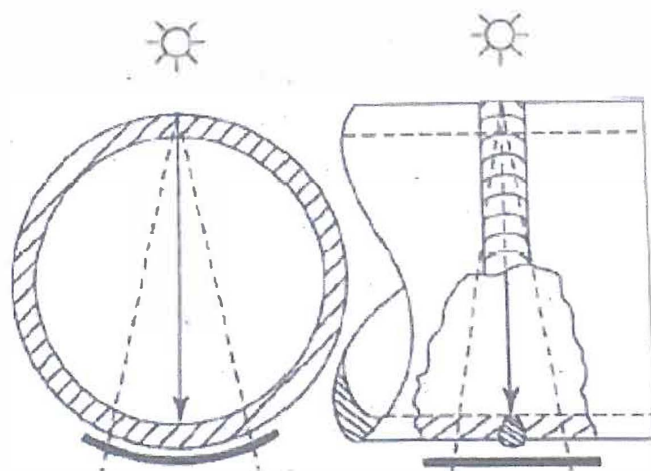


Figura 3.1. Posición de película e ICI.

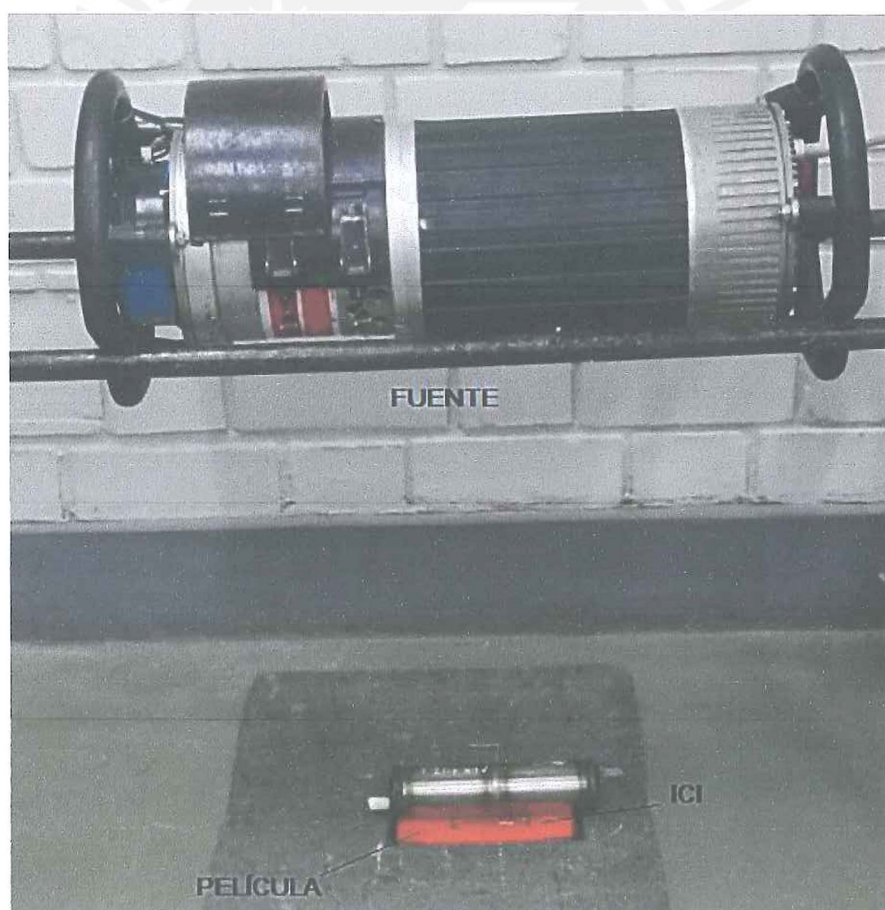


Foto 3.1. Posición real del ICI.

Como se puede observar, por el espesor del material, el tipo de alambre es el número 4. Con esto vamos a la tabla 1.3 y con esto seleccionamos el estuche que irá en la radiografía.

Estuche A			Estuche B		
Diámetro del alambre, pulg.	(mm)	Identidad del alambre	Diámetro del alambre, pulg.	(mm)	Identidad del alambre
0.0032	(0.08)	1	0.010	(0.25)	6
0.004	(0.10)	2	0.013	(0.33)	7
0.005	(0.13)	3	0.016	(0.41)	8
0.0063	(0.16)	4	0.020	(0.51)	9
0.008	(0.20)	5	0.025	(0.64)	10
0.010	(0.25)	6	0.032	(0.81)	11
Estuche C			Estuche D		
Diámetro del alambre, pulg.	(mm)	Identidad del alambre	Diámetro del alambre, pulg.	(mm)	Identidad del alambre
0.032	(0.81)	11	0.100	(2.54)	16
0.040	(1.02)	12	0.126	(3.20)	17
0.050	(1.27)	13	0.160	(4.06)	18
0.063	(1.60)	14	0.200	(5.08)	19
0.080	(2.03)	15	0.250	(6.35)	20
0.100	(2.54)	16	0.320	(8.13)	21

Al encontrarse el tipo de alambre en el primer recuadro, se selecciona el estuche A (ver foto 3.1).



Foto 3.2. Estuche A.

Al tener seleccionado todo esto, se dispondrá a seleccionar el tiempo al que debe estar expuesta la tubería vacía a los rayos X. Para esto utilizamos la gráfica del equipo SMART200PC (ver figura 3.2).

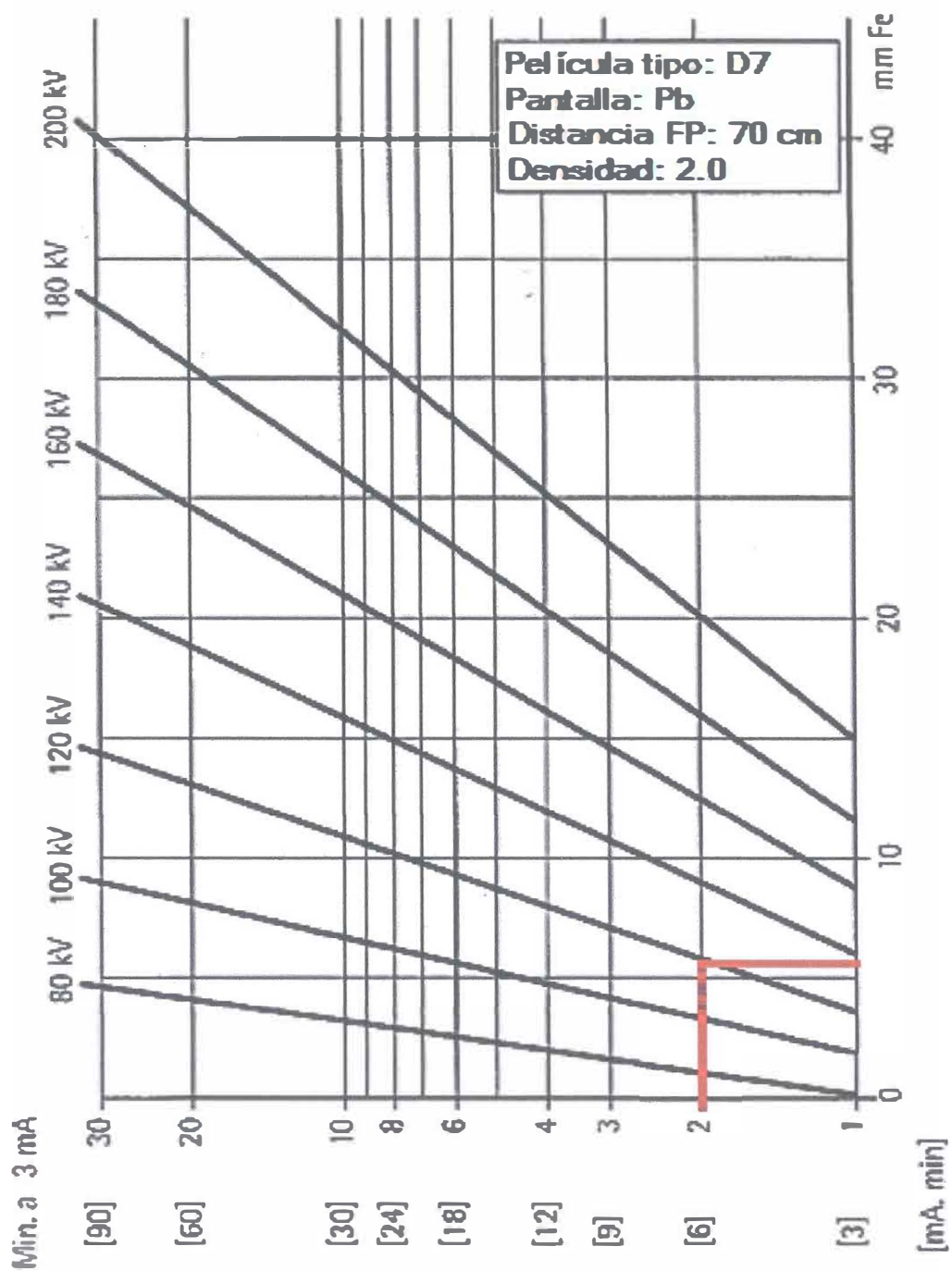


Figura 3.2. Diagrama de exposición.  
Fuente: YXLON User Manual (Modificada).



Como podemos observar el tiempo de exposición será de 2 min por 3 mA a 120 Kv, entonces el valor de la exposición, reemplazando los valores en la ecuación 1.4 es:

$$E = 2 * 3 = 6 \text{ mA} \cdot \text{min} \dots\dots\dots (3.3)$$

El equipo se va a programar para que trabaje a estos valores y se obtenga una buena calidad de imagen (ver foto 3.3).

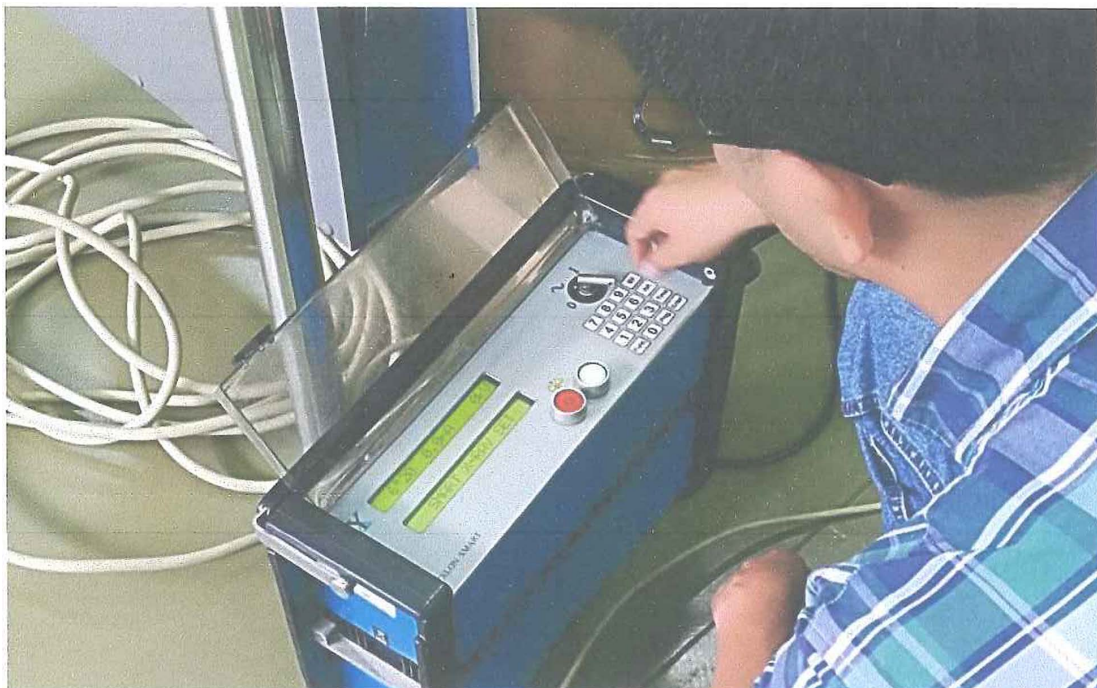


Foto 3.3. Programación del equipo.

Antes de poder empezar con los ensayos, se toman las medidas del caso, que son (ver foto 3.4 y 3.5):

- Armado y ubicación de la fuente de rayos X.
- Luz roja intermitente.
- Precalentamiento del tubo de rayos X.
- Colocación de la película y el ICI en su lugar.

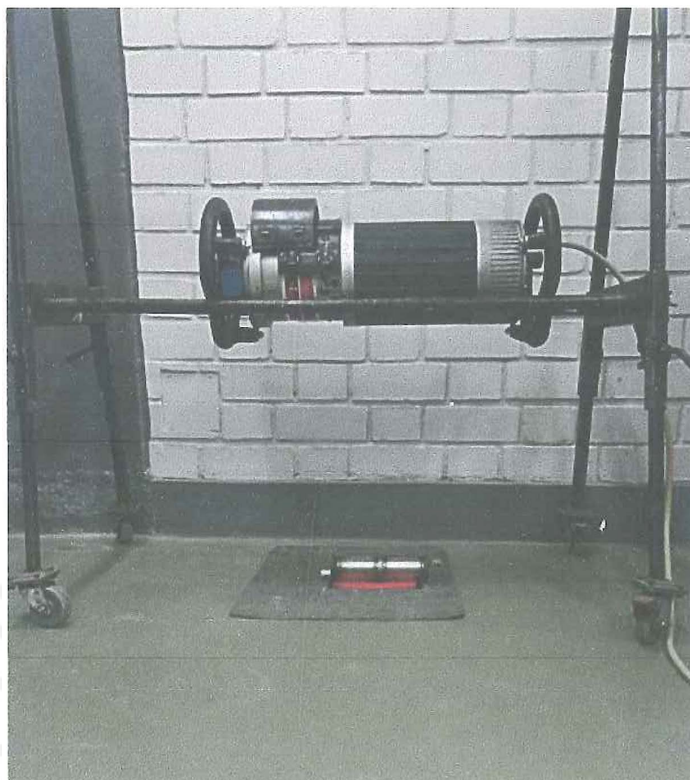


Foto 3.4. Armado de la fuente.



Foto 3.5. Instrumentos de seguridad y alerta.

### 3.1 Ensayo a la tubería de acero inoxidable vacía

Con los preparativos, procedimientos y valores obtenidos con los cálculos anteriores, se procede a realizar el ensayo a la tubería de acero inoxidable estando vacía.

Entonces, los valores para este ensayo según la figura 3.2 del diagrama de exposición son:

- Voltaje: 120 Kv
- Amperaje: 3 mA
- Tiempo: 2 min

Para poder tener una lectura clara la densidad de las zonas más importantes de la placa, en este caso el cordón de soldadura, debe estar entre los valor de 2 a 4 mm.



Figura 3.3. Fotos de la densidad de la placa vacía.

Como podemos observar la densidad de la placa en el cordón de soldadura tiene los valores de 2.79 y 2.75 mm (ver figura 3.3) que cumplen con lo recomendado. Se utiliza la pantalla intensificadora para poder observar el cordón de soldadura a lo que se obtuvo la siguiente imagen (ver foto 3.6):



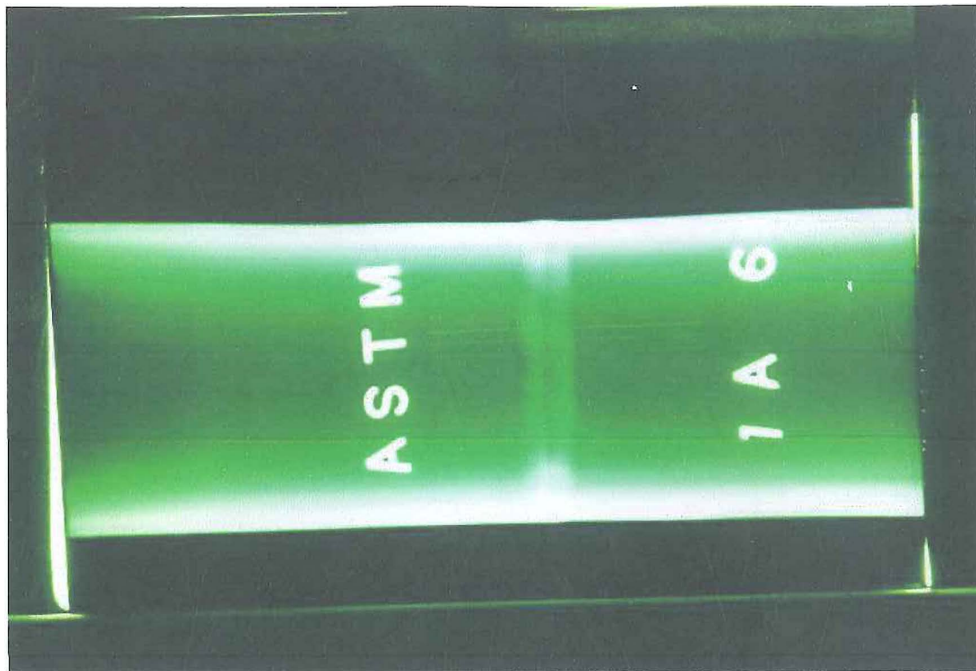


Foto 3.6. Placa vacía.

Para poder ver mejor los hilos se le tomo otra imagen a la placa (ver foto 3.7).

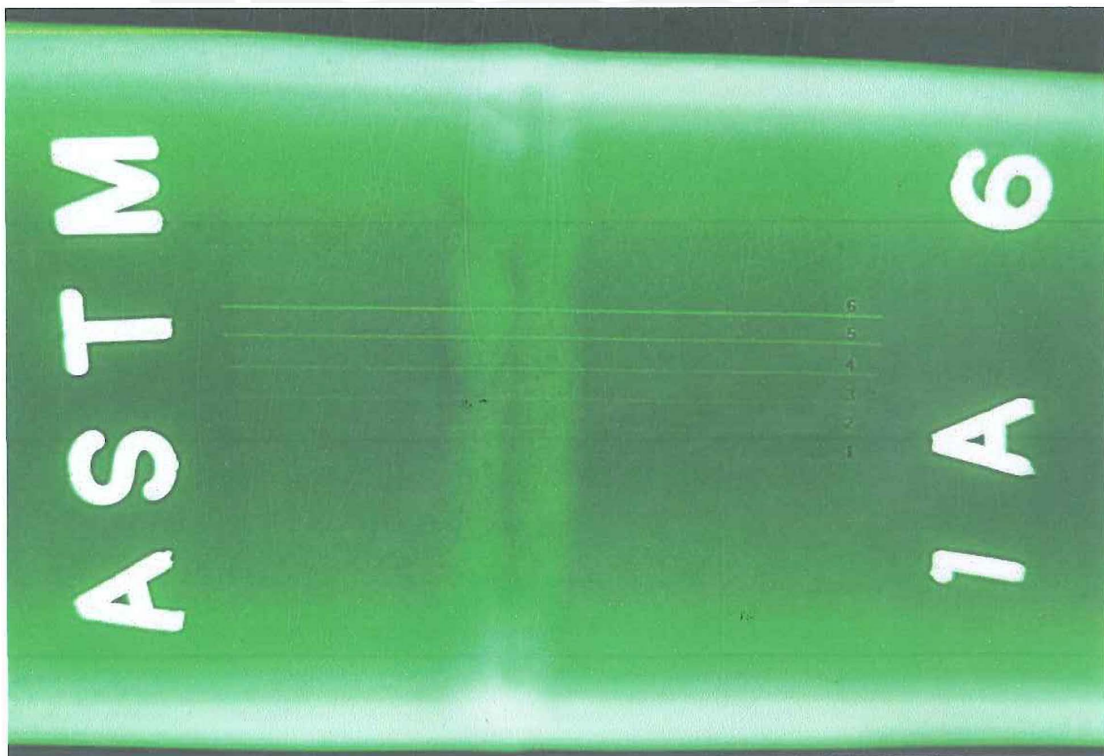


Foto 3.7. Hilos de alambre del estuche A (modificada).

Como se puede observar, se confirma que la placa cumple con el requisito de densidad y se logran ver los 6 hilos del penetrámetro. Por lo que se concluye que se tiene una imagen clara y bien definida para su evaluación.

De ahora en adelante, esta placa nos servirá de guía para los ensayos con la tubería llena de agua.

### **3.2 Ensayo a la tubería de acero inoxidable con agua**

Para los siguientes ensayos, tomaremos tiempos que sean múltiplos del tiempo cuando la tubería se encuentra vacía. Estos se usarán para exponer la tubería con agua a los rayos X.

Los múltiplos que tomaremos serán de 1.5, 2, 2.5, 3. Estos serán aplicados al tiempo de 2 minutos.

#### **PRIMERO ENSAYO (múltiplo de 1.5):**

- Voltaje: 120 Kv
- Amperaje: 3 mA
- Tiempo: 3 min

Como en el caso de la placa de la tubería vacía, la densidad de las zonas más importantes de la placa, deben estar entre los valores 2 a 4 mm.



Figura 3.4. Fotos de la densidad de la placa al factor 1.5.

Como podemos observar la densidad de la placa en el cordón de soldadura tiene los valores de 3.04 y 3.08 mm (ver figura 3.4). Se utiliza la pantalla intensificadora para poder observar el cordón de soldadura a lo que se obtuvo la siguiente imagen (ver foto 3.8):

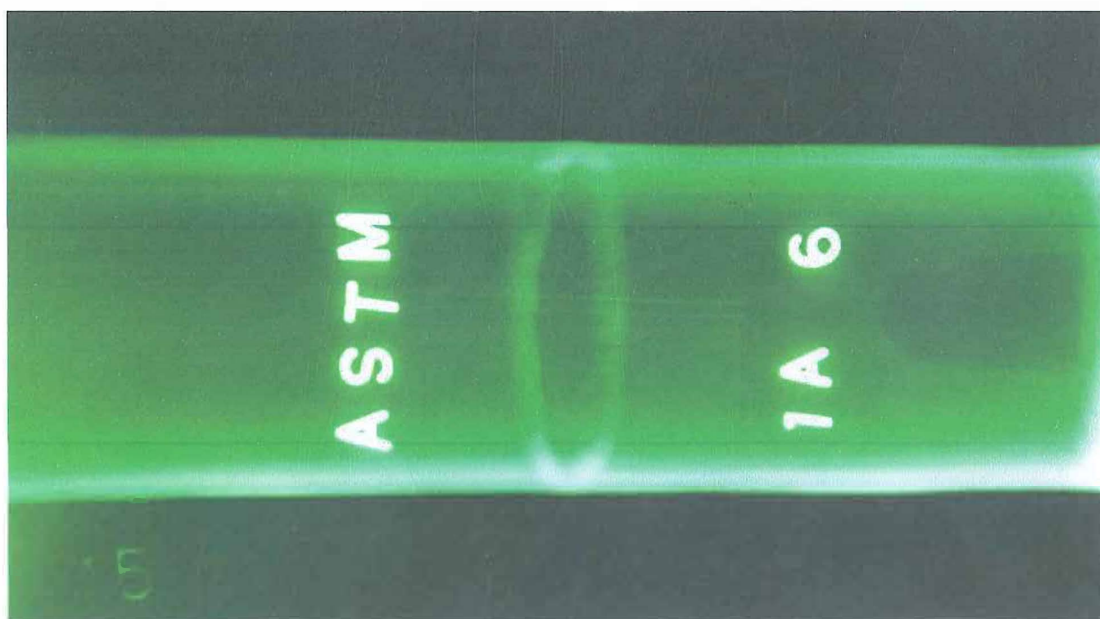


Foto 3.8. Placa al factor 1.5.

Para poder ver mejor los hilos se le tomo otra imagen a la placa (ver foto 3.9).

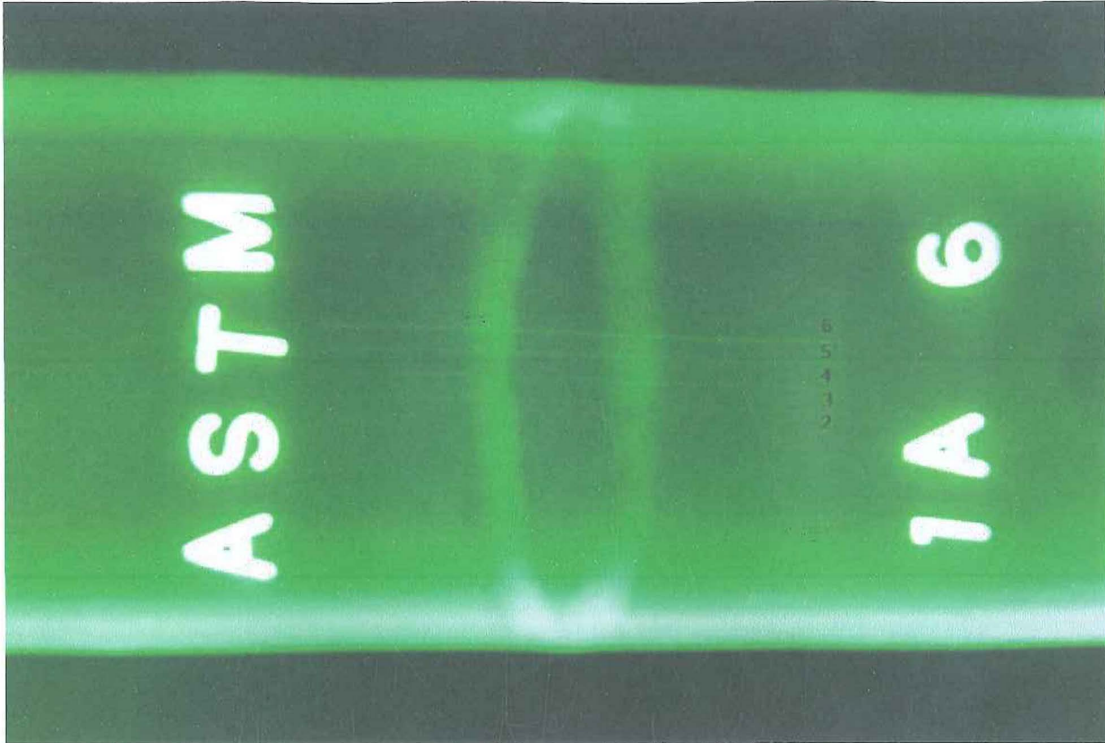


Foto 3.9. Hilos de placa al factor 1.5 (modificada).

Como se puede observar, se confirma que la placa cumple con el requisito de densidad y se logran ver 5 hilos del penetrámetro.

**SEGUNDO ENSAYO (múltiplo de 2):**

- Voltaje: 120 Kv
- Amperaje: 3 mA
- Tiempo: 4 min

Como en el caso de la placa de la tubería vacía y el primer ensayo, la densidad de las zonas más importantes de la placa, deben estar entre los valores 2 a 4 mm.





Figura 3.5. Fotos de la densidad de la placa al factor 2.

Como podemos observar la densidad de la placa en el cordón de soldadura tiene los valores de 3.58 y 3.51 mm (ver figura 3.5). Se utiliza la pantalla intensificadora para poder observar el cordón de soldadura a lo que se obtuvo la siguiente imagen (ver foto 3.10):

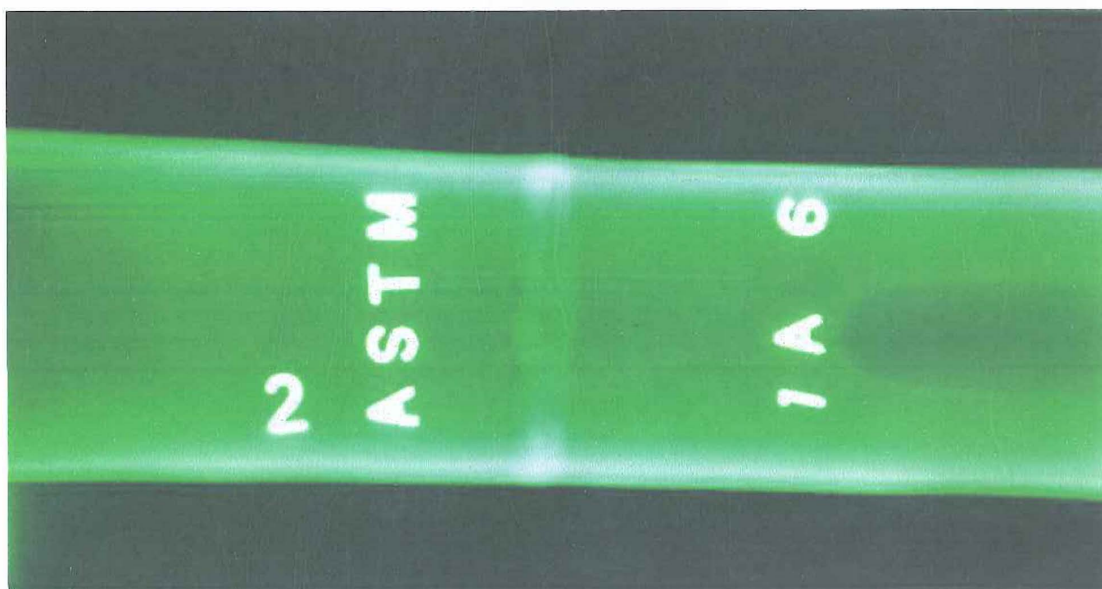


Foto 3.10. Placa al factor 2.

Para poder ver mejor los hilos se le tomo otra imagen a la placa (ver foto 3.11).

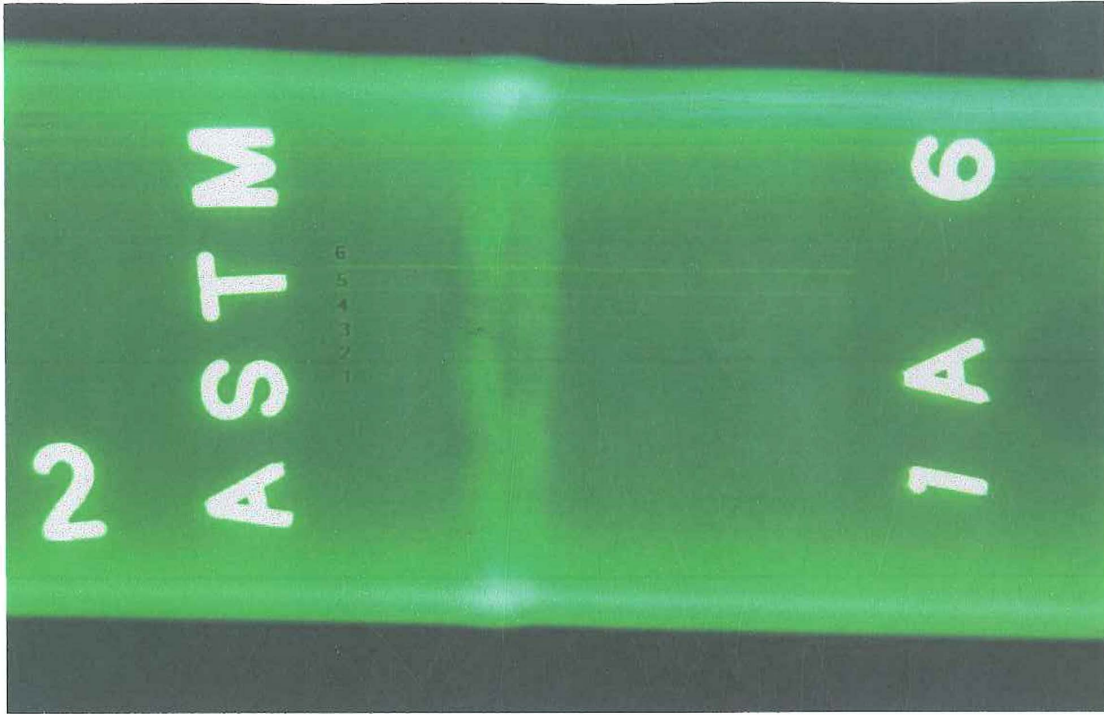


Foto 3.11. Hilos de placa al factor 2 (modificada).

#### TERCER ENSAYO (múltiplo de 2.5):

- Voltaje: 120 Kv
- Amperaje: 3 mA
- Tiempo: 5 min

Como en el caso de la placa de la tubería vacía y los ensayos ya realizados, la densidad de las zonas más importantes de la placa, deben estar entre los valores 2 a 4 mm.





Figura 3.6. Fotos de la densidad de la placa al factor 2.5.

Como podemos observar la densidad de la placa en el cordón de soldadura tiene los valores de 3.71 y 3.64 mm (ver figura 3.6). Se utiliza la pantalla intensificadora para poder observar el cordón de soldadura a lo que se obtuvo la siguiente imagen (ver foto 3.12):

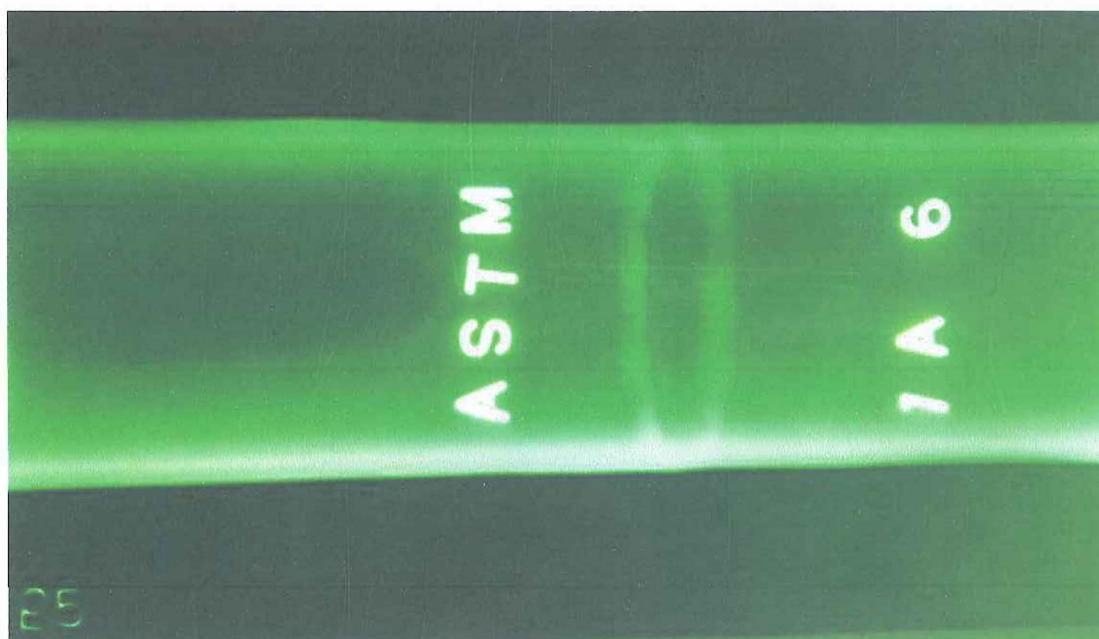


Foto 3.12. Placa al factor 2.5.

Para poder ver mejor los hilos se le tomo otra imagen a la placa (ver foto 3.13).

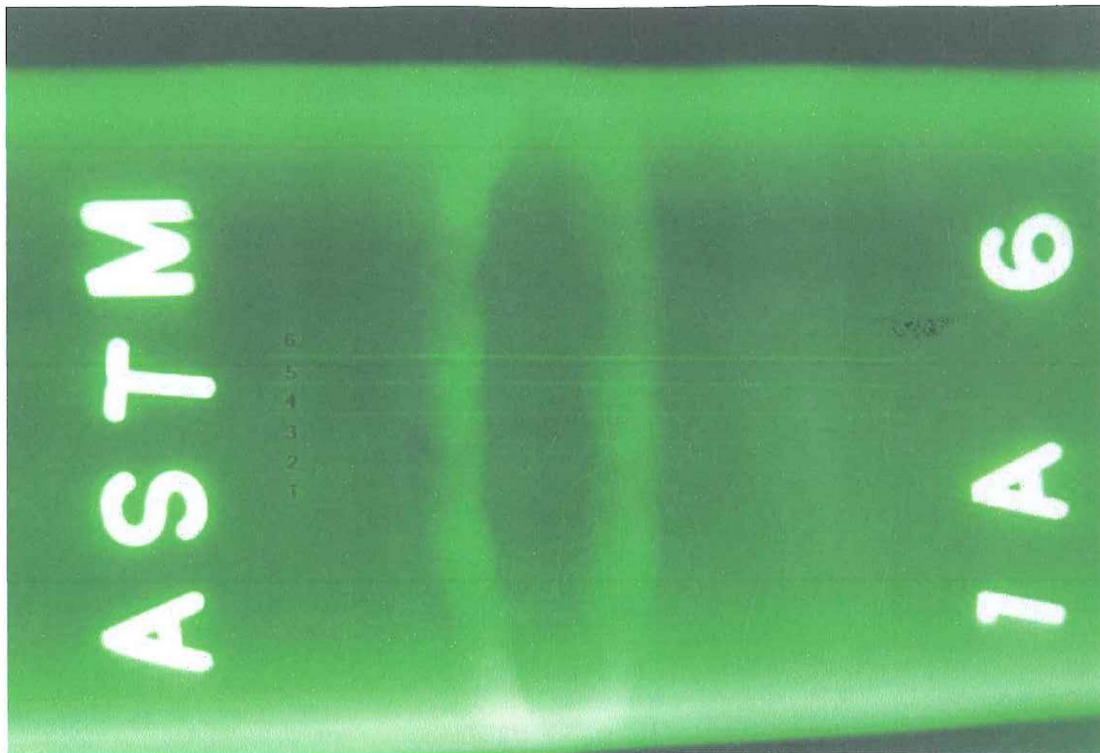


Foto 3.13. Hilos de placa al factor 2.5 (modificada).

**CUARTO ENSAYO (múltiplo de 3):**

- Voltaje: 120 Kv
- Amperaje: 3 mA
- Tiempo: 6 min

Como en el caso de la placa de la tubería vacía y los ensayos ya realizados, la densidad de las zonas más importantes de la placa, deben estar entre los valores 2 a 4 mm.



Figura 3.7. Fotos de la densidad de la placa al factor 3.

Como podemos observar la densidad de la placa en el cordón de soldadura tiene los valores de 3.67 y 3.68 mm (ver figura 3.7). Se utiliza la pantalla intensificadora para poder observar el cordón de soldadura a lo que se obtuvo la siguiente imagen (ver foto 3.14).

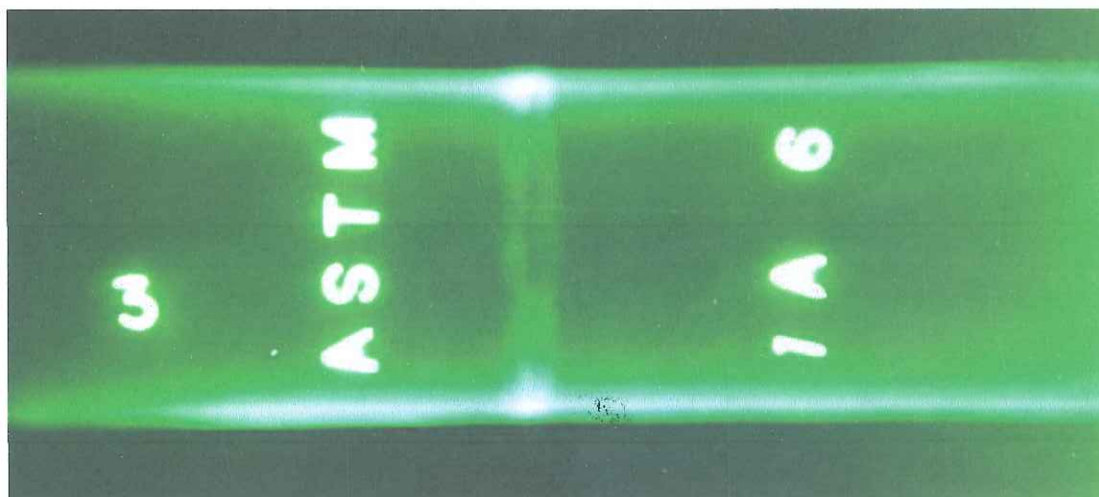


Foto 3.14. Placa al factor 3.

Para poder ver mejor los hilos se le tomo otra foto a placa (ver foto 3.15).

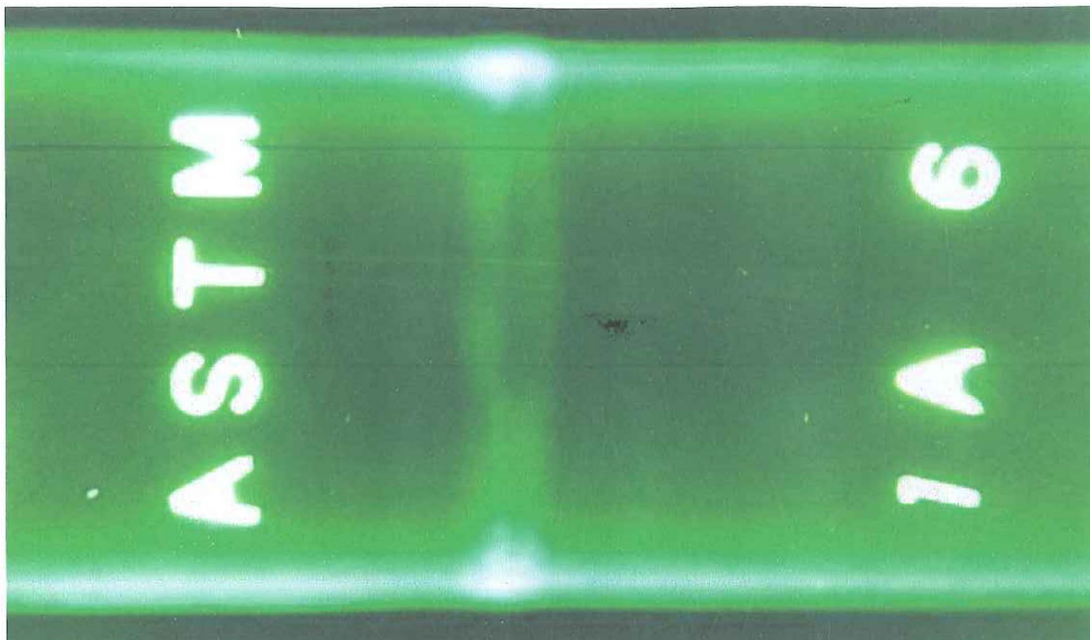


Foto 3.15. Hilos de placa al factor 3.

### 3.3 Datos obtenidos en los ensayos

De los cuatro ensayos realizados anteriormente se puede observar que todos cumplen con el espesor de las placas, porque sus valores se encuentran entre los recomendados. Sin embargo, la visibilidad de los hilos no es total en todos los ensayos. Por lo que en el siguiente capítulo se escogerán solo los ensayos en los cuales se puedan observar los hilos en su totalidad como en el ensayo de la tubería vacía.



## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se procederá a presentar los resultados obtenidos y a brindar el factor de corrección en el tiempo de exposición que debe ser utilizado en tuberías que contienen agua.

#### 4.1 Identificación de los resultados

Según los ensayos realizados, el segundo y tercer ensayo cumplen con lo que se requiere en un ensayo de Radiografía Industrial y se tiene la misma cantidad de visibilidad de los hilos como el del ensayo en una tubería vacía. Estos se muestran a continuación (ver figura 4.1):

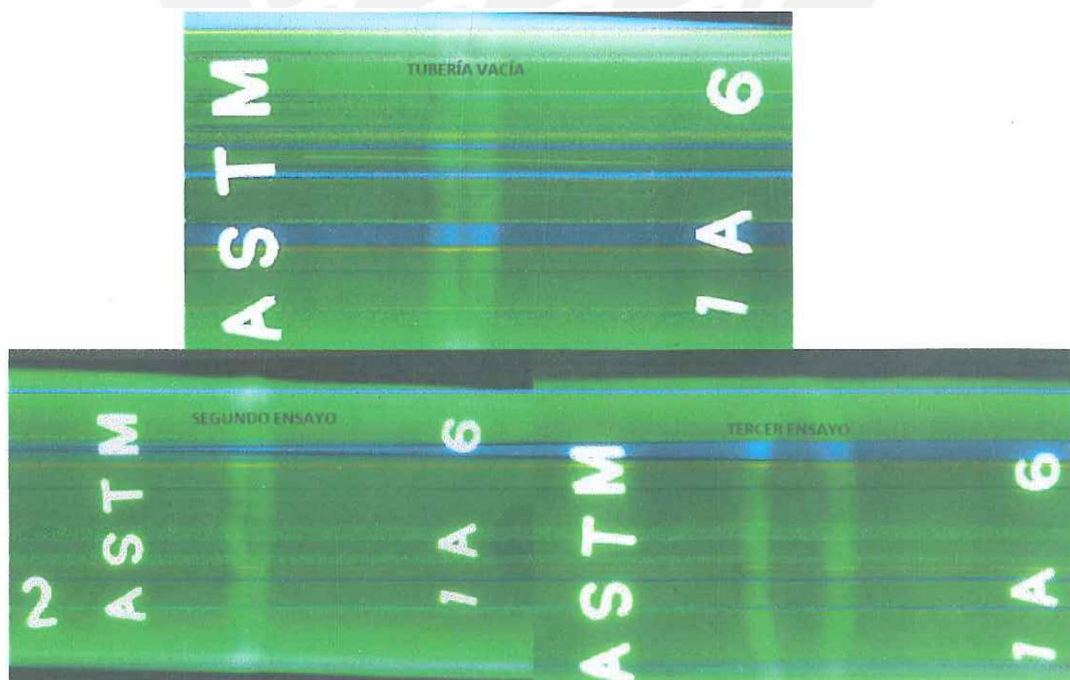


Figura 4.1. Misma cantidad de hilos en los ensayos.

Sin embargo, la densidad de la película varía en estos dos ensayos por lo que no se puede obtener la misma que en el ensayo de la tubería vacía (ver figura 4.2).

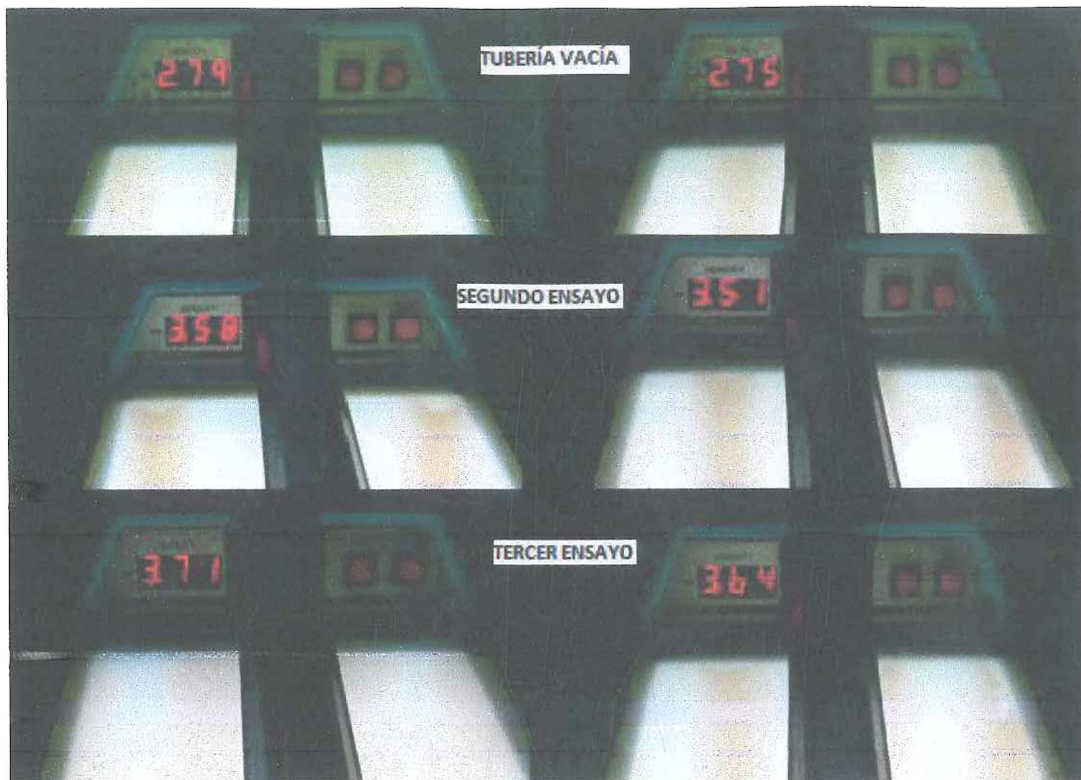


Figura 4.2. Comparación de las densidades.

#### 4.2 Discusión de los resultados

Al tener una comparación clara, podemos observar que en lo que es cantidad de hilos visibles y densidad de las placas radiográficas el segundo ensayo es el que más se asemeja al ensayo de la tubería vacía.

Sin embargo, al observar bien las placas radiográficas se puede observar que el hilo número 1 del segundo ensayo es menos notorio que el mismo hilo del tercer ensayo (ver figura 4.3).



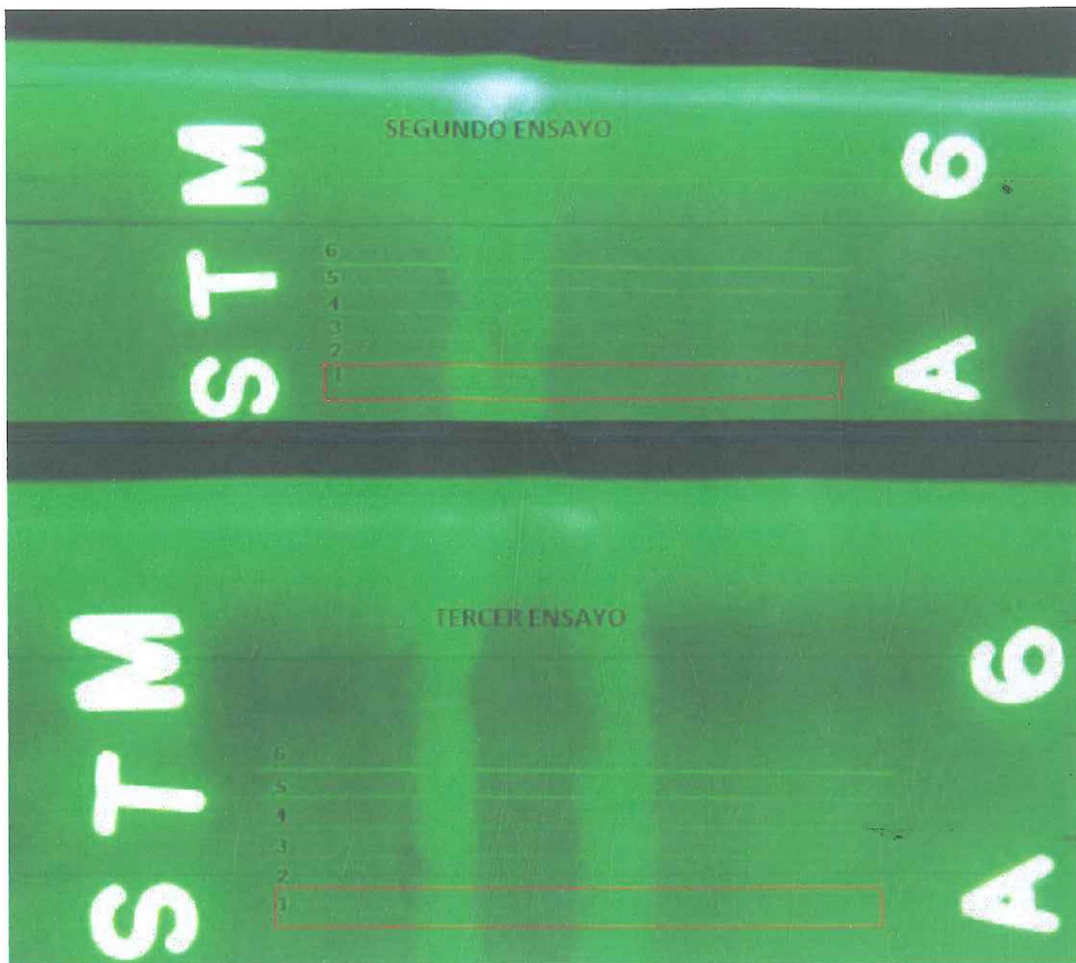


Figura 4.3. Visibilidad del primero hilo.

Por lo tanto, se pasará a seleccionar el tercer ensayo como el más semejante al ensayo de la tubería vacía. Cumpliendo lo que se pide para obtener una buena placa radiográfica.

#### 4.3 Resultado del análisis de los ensayos

Como se mencionó anteriormente, el tercer ensayo es el que más se asemeja al ensayo de la tubería vacía, por esto el factor que se utilizará de ahora en adelante para obtener placas radiográficas de buena calidad a pesar de que estas contengan agua será el valor de 2.5 multiplicado al tiempo que debe ser expuesta una tubería vacía.

## CONCLUSIONES

1. A lo largo del presente trabajo de investigación se logró comprobar que el método de Radiografía Industrial se puede utilizar en tuberías de acero inoxidable llenas de agua y obtener placas radiográficas comparables a las de una tubería de acero inoxidable vacía. Esto ayudaría mucho a realizar este tipo de ensayo a empresas que desean analizar las soldaduras de sus tuberías, con fácil accesibilidad, sin tener que parar el proceso y esperar que estas estén completamente vacías.
2. Mediante este método se logró demostrar que para poder hallar el factor de corrección se debe tener en cuenta una gran cantidad de variables que influyen en el resultado. Por esto, a pesar de tener un resultado con un valor fijo (2.5), el procedimiento a seguirse debe ser el correcto y no tratar de apurar las cosas. Como se sabe, el ensayo de Radiografía Industrial va de la mano con el tiempo que se mantiene en exposición la película radiográfica a los rayos X, así como el tiempo que esta debe estar en el cuarto de revelado.
3. En el resultado final del ensayo se logró comprobar que la densidad no influye mucho en la selección del factor de corrección, porque con que esta se encuentre en el rango de valores permitidos, la película radiográfica será aceptada.
4. Se determinó que es más importante la visibilidad de la película y la cantidad de hilos que se puedan observar en el resultado final, porque según el cálculo teórico se debió tener en los ensayos la visibilidad del cuarto alambre, en donde en todos se cumple esto. Sin embargo, se toma la decisión de un solo ensayo al verse con claridad todos los alambres del estuche como en el ensayo de la tubería vacía.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que los baños que se le realizan en el cuarto de revelado a los negativos de las placas radiográficas, deban estar totalmente nuevos y limpios. Porque, estos pueden ocasionar que la placa radiográfica se vea alterada y no se puedan apreciar bien las discontinuidades que puede presentar la soldadura.
2. Se recomienda seleccionar correctamente los parámetros a usar como el kilovoltaje y el mili amperaje, porque estos influyen directamente sobre el contraste de la imagen y este disminuirá si la película radiográfica es excesivamente clara u oscura. Será oscura, porque la densidad de la película será mayor y esto se debe a la poca absorción de radiación del material.
3. Se debe considerar para los ensayos de rayos X que, con un alto voltaje, se tiene una alta energía, por lo que la penetración es alta; cuando tenemos un foco óptico pequeño, se obtiene una alta nitidez y por último con una alta intensidad de corriente, se necesita un bajo tiempo de exposición.
4. Si bien la presente tesis, demostró que puede realizarse los ensayos de radiografía a tuberías de acero inoxidable que contienen agua. En futuras investigaciones sería interesante demostrar si este estudio, se puede realizar a otro tipo de material de tubería que transporta el mismo líquido o un fluido distinto a este.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] **2015 ASME Boiler & Pressure Vessel Code.**  
The American Society of Mechanical Engineers  
V Nondestructive Examination, Nonmandatory Appendix A, Article 2, 2015.
- [2] **Structural Welding Code – Steel (20<sup>th</sup> Edition).**  
American Welding Society  
Part E – Radiographic Testing, pp.215-218, Nov. 2005.
- [3] **Specification for the Qualification of Radiographic interpreters (2<sup>nd</sup> Edition).**  
American Welding Society  
AWS B5.15:2010, Oct. 2009.
- [4] **Radiographic Testing Classroom Training Book.**  
Jean Staton  
The Ocean Corporation, 2005.
- [5] **Acceptance Criteria for Welds and Examination Methods for Evaluating Weld imperfections.**  
The American Society of Mechanical Engineers  
ASME B31.3-2004, 2004.
- [6] **INGENIERÍA DE LA SOLDADURA – DISCONTINUIDADES Y DEFECTOS EN SOLDADURA.**  
Dr. Adán Vega  
Standard ASTM International. 2009.
- [7] **Industrial Radiography.**  
General Electric Company  
GE Inspection Technologies, 2007.
- [8] **The Fundamentals of Industrial Radiography.**  
FUJIFILM  
FUJIFILM Corporation, 2009.

**[9] INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.**

Capítulo III, RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL.

**[10] Radiografía Industrial.**

Ing. Daniel Merino Ponce – (ASNDT NDT LEVEL III – RT)

Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014 - II.

**[11] ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS COMO HERRAMIENTA PARA EL  
DIMENSIONAMIENTO DE DISCONTINUIDADES EN LA SUPERFICIE EXTERNA  
DE TUBERÍAS.**

Edward Yesith Mendoza Gonzáles, Luz Amparo Quintero Ortiz y Gerardo Santo  
Castañeda

Capítulo 3, 3.3 Radiografía, pp.175-177, 2010.

