



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN PARA
PELÍCULAS RADIOGRÁFICAS, UTILIZADAS EN ENSAYOS
REALIZADOS EN SISTEMAS DE TUBERÍA LLENA DE
PETRÓLEO O SUS DERIVADOS**

Enrique Alberto Gálvez Argueta

Asesorado por el Ing. Héctor Alfredo Alarcón Caceros

Guatemala, octubre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN PARA
PELÍCULAS RADIOGRÁFICAS, UTILIZADAS EN ENSAYOS
REALIZADOS EN SISTEMAS DE TUBERÍA LLENA DE
PETRÓLEO O SUS DERIVADOS.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE

LA FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ENRIQUE ALBERTO GÁLVEZ ARGUETA

ASESORADO POR EL ING. HÉCTOR ALFREDO ALARCÓN CACEROS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÒMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I:	Inga. Glenda Patricia García Sória
VOCAL II:	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III:	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV:	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V:	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR:	Ing. José Arturo Estrada Martínez
EXAMINADOR:	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
EXAMINADOR:	Ing. Héctor Alexander Juárez Reyes
SECRETARIO:	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN PARA PELÍCULAS RADIOGRÁFICAS, UTILIZADAS EN ENSAYOS REALIZADOS EN SISTEMAS DE TUBERÍA LLENA DE PETRÓLEO O SUS DERIVADOS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 20 de agosto de 2004.

Enrique Alberto Gálvez Argueta

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala, por habernos recibido cuando nos encontrábamos a la mitad de la carrera.

A mi Asesor

Ingeniero Héctor Alfredo Alarcón
Caceros por la asesoría brindada a mi
trabajo de graduación.

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS** por ser la fuente de inspiración en toda mi carrera, y además, por todas sus bendiciones.
- MIS PADRES** por todo su apoyo, amor y sacrificio
- MIS HERMANOS** por su apoyo, amor y cariño.
- MIS FAMILIARES** por la ayuda brindada en los momentos difíciles.
- MIS AMIGOS** por su amistad y apoyo brindado durante toda mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. GENERALIDADES	
1.1 ¿Qué es la radiografía industrial?	1
1.2 Principios físicos en los que se basa	3
1.2.1 Rayos X	6
1.2.1.1 Carcasa protectora	7
1.2.1.2 Envoltura de cristal o tubo	8
1.2.1.2.1 Cátodo	8
1.2.1.2.1.1 Filamento	8
1.2.1.2.1.2 Copa enfoque	9
1.2.1.2.2 Ánodo	10
1.2.1.2.2.1 Punto focal	10
1.2.1.2.2.2 Blanco	10
1.2.2 Rayos gamma	11
1.3 Tipos de radiografía industrial	12
1.4 La película radiográfica	14

1.5	Variables que inciden en la calidad de una radiografía	17
1.5.1	Selección de la película adecuada	17
1.5.1.1	La rapidez	18
1.5.1.2	El contraste	18
1.5.1.3	La densidad	18
1.5.2	Tipos de pantallas adecuadas para el tipo de película	19
1.5.2.1	Pantalla de hojas metálicas	19
1.5.2.2	Otras pantallas de materiales metálicos	21
1.5.2.3	Pantallas fluorescentes	21
1.5.3	Cuidado de las pantallas	21
1.5.4	Uso de indicadores de control de imagen adecuados	22
1.5.4.1	Indicadores de escalerilla	22
1.5.4.2	Indicadores de agujeros	23
1.5.4.3	Indicadores de hilos	23
1.6	Radiografía de uniones soldadas	24
1.6.1	Técnica de tercios	24
1.6.1.1	Marcado correcto de la tubería	24
1.6.1.2	Correcta colocación del cinturón	25
1.6.1.3	Centrado correcto del punto focal	25
1.6.1.4	Correcta exposición	26
1.6.2	Técnica de óvalos	26
1.6.2.1	Marcad de la tubería	26
1.6.2.2	Colocación y centrado de la fuente	27
1.6.2.3	Colocación y centrado del colimador	27
1.6.2.4	Exposición	28

		29
1.6.3	Técnica de placas	29
1.6.3.1	Marcado de las venas y placas soldadas	29
1.6.3.2	Colocación y centrado de la fuente	30
1.6.3.3	Colocación y centrado del colimador	30
1.6.3.4	Exposición	31
1.6.4	Técnica radial	31
1.6.5	Técnica alternativa diámetros pequeños	32
1.6.5.1	Colocación del cabezal	32
1.6.5.2	Fijación del colimador	
2.	LA RADIOGRAFÍA Y LA INDUSTRIA PETROLERA	
2.1	Usos comunes de la radiografía en la industria petrolera	33
2.2	Defectología buscada en elementos de transporte y almacenaje	35
2.3	Densidad de materiales y relación con absorción de la radiación	41
3.	PARTE EXPERIMENTAL	
3.1	Alcance	55
3.2	Normas de referencia para determinar calidad de una radiografía	56
3.3	Procedimiento	57
3.3.1	Determinación tiempo de exposición tubería vacía	57
3.3.2	Exposición en tubería sin producto	61
3.3.3	Resultados de exposición en tubería vacía	63
3.3.4	Cálculos en tubería con producto	68
3.3.5	Corrección de las exposiciones en tubería con producto	70
3.3.6	Resultados con exposiciones corregidas y tubería llena	72
3.3.7	Tablas y gráficos de factores de corrección	74
3.4	Análisis de resultados	78
3.4.1	Comparación de densidades obtenidas	78
3.4.2	Comparación de sensibilización obtenida	80
3.5	Conclusiones sobre el ensayo	84

CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Ondas de radiación electromagnética	4
2	Espectro electromagnético	4
3	Equipo de generación de rayos “X”	11
4	Generación de radiación gamma	12
5	Tabla para exposición con rayos gamma	58
6	Carta sencitométrica con curvas para varios tipos de películas	64
7	Factor de corrección para tubería que contiene petróleo	76
8	Factor de corrección para tubería que contiene aceite lubricante	76
9	Factor de corrección para tubería que contiene fuel oil medio	77
10	Factor de corrección para tubería que contiene agua	77
11	Diferencia de sensibilidades entre tubería vacía y llena de agua	80
12	Diferencia de sensibilidades entre tubería vacía y llena de fuel oil	81
13	Diferencia de sensibilidades entre tubería vacía y llena de aceite	82
14	Diferencia de sensibilidades entre tubería vacía y llena de petróleo	83

TABLAS

I	Características de las películas	18
II	Densidades de materiales involucrados en el ensayo	54
III	Tiempos de exposición para tubería vacía	62
IV	Resultados de Exposición en tubería vacía	63
V	Resultados con tiempos de exposición corregidos	67

VI	Resultados obtenidos con tubería llena de agua	68
VII	Resultados obtenidos con tubería llena de fuel oil medio (diésel)	69
VIII	Resultados obtenidos con tubería llena de aceite (SAE 30)	69
IX	Resultados obtenidos con tubería llena de petróleo	70
X	Exposiciones corregidas para tubería llena de agua	71
XI	Exposiciones corregidas para tubería llena de fuel oil medio	71
XII	Exposiciones corregidas para tubería llena de aceite	71
XIII	Exposiciones corregidas para tubería llena de petróleo	72
XIV	Resultados con exposiciones corregidas para tubería llena de agua	72
XV	Resultados con exposiciones corregidas para tubería llena de fuel oil medio	73
XVI	Resultados con exposiciones corregidas para tubería llena de aceite	73
XVII	Resultados con exposiciones corregidas para tubería llena de petróleo	73
XVIII	Factores de corrección para tubería utilizada en el ensayo	75
XIX	Comparación de densidades obtenidas con tubería vacía y llena de agua	78
XX	Comparación de densidades obtenidas con tubería vacía y llena de fuel oil	78
XXI	Comparación de densidades obtenidas con tubería vacía y llena de aceite	79
XXII	Comparación de densidades obtenidas con tubería vacía y llena de petróleo	79
XXIII	Diferencia de sensibilidad entre tubería vacía y llena de agua	80
XXIV	Diferencia de sensibilidad entre tubería vacía y llena de fuel oil	81
XXV	Diferencia de sensibilidad entre tubería vacía y llena de aceite	82
XXVI	Diferencia de sensibilidad entre tubería vacía y llena de petróleo	83

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Longitud de onda de las radiaciones electromagnéticas
Hz	Hertz
nm	Nanómetro
X	Radiación X
γ	Radiación Gamma
mm	Milímetro
KeV	Kilo electrón voltio
MeV	Mega electrón voltio
I	Intensidad flujo pasante
I_0	Intensidad flujo incidente
α	Espesor de material atravesado o coeficiente de absorción
α_L	Coefficiente lineal de absorción
Δ	Cambio o diferencia
ρ	Densidad
e	Exponencial
E_γ	Energía de fotón gamma
S_f	Sección eficaz para absorción
θ	Angulo de difusión
Ψ	Función de onda de Schrödinger
Ci	Curie
DR	Densidad Relativa
ε	Producto de la actividad de la fuente por el tiempo de exposición
"	Pulgadas
T	Tiempo de exposición

GLOSARIO

Densidad	Medida del ennegrecimiento de las películas. Es el logaritmo del cociente de la intensidad de luz, con la que se ilumina la película y la intensidad que pasa a través de ésta hasta el ojo del observador.
Exposición	Acción de poner en contacto la película radiográfica, con una intensidad suficiente de radiación para que el compuesto que recubre la película se sensibilice.
Fotón	Cantidad mínima de energía de la luz u otra radiación electromagnética.
Fuente radioactiva	Porción de material radioactivo que se utiliza para el trabajo de radiografía, el cual está almacenado dentro de un contenedor.
Gammagrafía	Técnica utilizada para la toma de radiografías que utiliza rayos gamma.
Indicador de control de calidad de imagen (ICI)	Dispositivo que se utiliza para demostrar que la radiografía obtenida es satisfactoria; se emplea como medio de control de la sensibilidad y el contraste obtenidos.

Pantallas

Hojas metálicas entre las que se encierra la película que se va a exponer, sirven de filtro para absorber la radiación dispersa.

Sensibilidad

La dimensión mínima de incremento o decremento en el espesor del material que será perceptible en la radiografía.

RESUMEN

El objetivo del trabajo de graduación es determinar de forma experimental, los factores de corrección para los tiempos de exposición a los que deberá ser sometida una película radiográfica, cuando la tubería en la que se está trabajando contenga algún fluido. El trabajo se ha enfocado principalmente en el análisis de sistemas de tuberías, que contengan alguno de los principales fluidos que son transportados por medio de tubería, en la industria petrolera y de hidrocarburos. Los fluidos con los que se trabajó fueron agua de proceso, fuel oil medio (diésel) y aceite (SAE 30).

En el capítulo uno se brinda una breve definición de lo que es la radiografía industrial, y cuales son sus principales características y beneficios, luego se aborda el tema de cuáles son los principios físicos en los que se basa el ensayo radiográfico y cuáles son los tipos de fuentes emisoras de radiación que se pueden utilizar para llevarlo a cabo; para terminar con este capítulo, se hace una breve descripción de los distintos campos en los que se utiliza la radiografía industrial, así como de las variables que inciden en la calidad de una radiografía, y de las distintas técnicas que se utilizan para la ejecución del ensayo, dependiendo de cuáles sean las condiciones en las que se esté llevando a cabo.

El capítulo dos trata acerca de las principales aplicaciones en las que se utiliza el ensayo radiográfico en la industria petrolera y de hidrocarburos, así como de la defectología que comúnmente se busca en sistemas de tubería nuevos y en uso. Luego de hablar de los temas anteriores, el capítulo se enfoca en lo que es la relación de la radiación con la materia (la forma en la que interactúa con ésta) y cómo la densidad de los distintos fluidos y materiales, está directamente relacionada con la capacidad de éstos para absorber la radiación.

La parte experimental es abordada en el capítulo tres, en el cual primeramente se describen los parámetros bajo los cuales se realizará el experimento y luego se desarrolla el mismo, construyéndose al final de esta sección las tablas para la determinación de los factores de corrección para los diferentes diámetros y fluidos que se analizaron. Al terminar se presentan algunas conclusiones acerca de los resultados del ensayo.

OBJETIVOS

General

Determinar el factor de corrección para el tiempo de exposición al que debe ser sometida la película radiográfica para exposiciones, que se realicen en tubería que se encuentre llena de producto.

Específicos

1. Describir los principios físicos en los que se basa la radiografía industrial.
2. Determinar la capacidad que poseen el agua, el petróleo y algunos de los principales hidrocarburos, según la densidad que presentan, de absorber la radiación.
3. Determinar el factor de corrección que se deberá aplicar al tiempo de exposición de la película radiográfica, en el caso que se esté trabajando con tubería que se encuentre llena de algún tipo de fluido.

INTRODUCCIÓN

La gammagrafía industrial es un tipo de ensayo no destructivo que se utiliza para obtener información acerca de la integridad de una pieza o soldadura. Este tipo de ensayo radiográfico, como su nombre lo indica, utiliza una fuente emisora de rayos gamma para exponer una película, la cual luego de ser expuesta a la radiación queda sensibilizada y al ser sometida a un proceso de revelado presentará una transparencia de la pieza que se está examinando, en la cual se podrá detectar cualquier defectología o anomalía interna que ésta posea.

En la industria petrolera y de hidrocarburos, es común que debido a las presiones con las que trabaja en los sistemas de tubería y a lo peligroso de algunos de los productos que se transportan en ellos, tanto para el medio ambiente como para los seres humanos, se haya vuelto una práctica común el que estas tuberías sean soldadas y que todas las soldaduras sean analizadas radiográficamente para garantizar la calidad de las mismas. Además, es práctica común el que este ensayo se utilice periódicamente cuando las tuberías estén en uso, con el fin de analizar la tubería y buscar en este caso señales de deterioro de la misma, debido a la corrosión. Es en este punto donde surge el motivo de este trabajo de graduación, ya que hasta el momento lo que se ha acostumbrado es que para ejecutar los ensayos radiográficos se drene el sistema de tubería o la sección a analizar de ésta. Lo anterior provoca que haya pérdida de tiempo y costos extras para la empresa, debidos a la ejecución del ensayo.

Es por lo anterior que se pensó que sería útil buscar la forma de poder radiografiar las tuberías sin necesidad de tener que sacarlas de servicio y drenarlas, para esto se partió de que el tiempo de exposición para tubería vacía es fácilmente obtenible y lo que había que hacer era obtener un factor de corrección por el que se pudiera multiplicar este tiempo, para obtener el adecuado para la tubería que contiene producto.

Para la obtención de estos factores de corrección se inició estudiando las distintas formas en las que la radiación interactúa con la materia, para luego realizar los ensayos respectivos en tuberías de diámetros comúnmente utilizados en la industria del petróleo y los hidrocarburos, las cuales se llenaron con algunos de los fluidos que son transportados ordinariamente por este medio. Con los resultados que se obtuvieron de estas pruebas se pudieron construir gráficas para cada uno de los fluidos con los que se trabajó (agua, diésel, aceite y petróleo), las cuales relacionan el diámetro de la tubería con el factor de corrección que le corresponde.

Al finalizar este trabajo se pudo concluir que aunque es factible el uso de los factores de corrección, ya que se obtienen radiografías con una densidad adecuada, hay que poner atención a qué defectología es la que se quiere detectar con este ensayo, en estas condiciones, ya que se presentan problemas como es la reducción de la sensibilidad en las placas.

1. GENERALIDADES

1.1 ¿Qué es la radiografía industrial?

La exploración radiográfica del cuerpo humano es de todos conocida, porque es la técnica física de mayor aplicación en medicina, y a todos nos han hecho radiografías de tórax, estómago, etc. En cuanto a la radiografía industrial, lo que se pretende es verificar, mediante rayos X o radiación gamma, la calidad de los componentes de los sistemas tecnológicos; se trata, como en el caso de la radiografía médica, de “ensayos no destructivos”, de modo que si la imagen radiográfica es satisfactoria, el componente pueda ser dado por bueno, sin haber sufrido daño alguno en su integridad física.

Los principios básicos en que se basan la radiografía médica y la radiografía industrial son, naturalmente, los mismos, pues las radiaciones X y gamma no distinguen en absoluto si se trata de materia viva perteneciente a un organismo o de materia inerte perteneciente a un componente metálico de un sistema. Quien es diferente es el especialista que solicita e interpreta la imagen radiográfica, que unas veces es un conocedor de la anatomía humana, y otras, un técnico especialista en construcciones metálicas; pero, ambos hacen uso del mismo principio fundamental, la diferencia de absorción que sufre todo haz de radiación en su trayectoria desde la fuente hasta el punto considerado de la placa radiográfica en función de la composición elemental y la cantidad de materia interpuesta.

Una diferencia, no obstante, es digna de mención: mientras que el paciente “va” a la sala de rayos X para la exploración médica, no siempre es posible llevar el componente del sistema tecnológico al laboratorio de radiografía industrial, por su inamovilidad; y entonces cobra excepcional importancia el uso de las fuentes gammagráficas, que son fácilmente transportables al lugar de emplazamiento del proyecto (oleoducto, puente, presa, central térmica o nuclear, etc.), para verificar en el sitio la calidad de su construcción. La movilidad de las fuentes, y su adaptabilidad a las más diversas circunstancias, son sus cualidades más apreciadas en las modernas aplicaciones tecnológicas.

En la actualidad es imposible pensar en la práctica industrial sin que en ella exista un control de calidad, y es por esto que la radiografía industrial ha tomado tanta importancia, ya que la misma asegura la calidad y la integridad de diversas estructuras, soldaduras y equipos. Esta diversidad incluye tanto soldaduras automáticas importantes para la seguridad en los vehículos, partes vitales de los sistemas de frenos de estos, soldaduras de recipientes a presión, calderas o soldaduras en tuberías en las cuales serán aplicadas altas presiones en el transporte de líquidos o gases.

1.2 Principios físicos en los que se basa

Como se ha mencionado en la sección anterior, existen dos tipos principales de fuentes de radiación para poder llevar a cabo el trabajo de radiografía a nivel industrial, estos dos tipos de fuentes son: Las de Rayos “X” y las de Rayos Gamma; siendo la principal diferencia entre ambas que una necesita de una fuente externa de energía (rayos X) para producir la radiación que sensibiliza la película, lo cual dificulta su uso en el campo, mientras que el otro tipo (rayos gamma) no necesitan de ninguna fuente externa de energía para generar la radiación necesaria para sensibilizar la película.

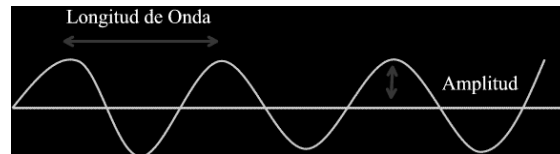
Los 2 tipos de fuentes tienen en común el que ambas generan algún tipo de radiación electromagnética para lograr la sensibilización de la película, pudiéndose definir a estos tipos de radiación de la siguiente forma:

Las cargas eléctricas estacionarias producen campos eléctricos, las cargas eléctricas en movimiento producen campos eléctricos y magnéticos. Los cambios cíclicos en estos campos producen **radiación electromagnética** de esta manera la radiación electromagnética consiste en una oscilación perpendicular de un campo eléctrico y magnético. La radiación electromagnética transporta energía de un punto a otro, esta radiación se mueve a la velocidad de la luz (siendo la luz un tipo de radiación electromagnética).

Las ondas de radiación electromagnética se componen de crestas y valles (convencionalmente las primeras hacia arriba y las segundas hacia abajo). La distancia entre dos crestas o valles se denomina **longitud de onda** (λ). La **frecuencia** de la onda está determinada por las veces que ella corta la línea de base en la unidad de tiempo (casi siempre medida en segundos), esta frecuencia es tan importante que las propiedades de la radiación dependen de ella y está dada en Hertz. La **amplitud de onda** está definida por la distancia que separa el pico de la cresta o valle de la línea de base (A). la energía que transporta la onda es proporcional al cuadrado de la amplitud. La

unidad de medida para expresar semejantes distancias tan pequeñas es el nanómetro (10^{-9} metros).

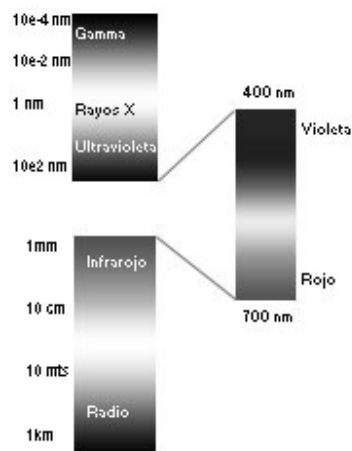
Figura 1. Ondas de Radiación Electromagnética



La luz visible, es decir las ondas electromagnéticas para las cuales el ojo humano esta adaptado se encuentran entre longitudes de onda entre los 400 nm y 700 nm. Como lo predijeron las ecuaciones de Maxwell existen longitudes de onda por encima y por debajo de estos limites.

Estas formas de "luz invisible" se han encontrado y organizado de acuerdo a sus longitudes de onda en el espectro electromagnético, en el cual en un extremo tenemos las ondas más largas (longitudes desde metros a kilometros), como en el caso de las ondas de radio, y las más cortas en el otro (con longitudes de onda de una billonésima de metro) como sería el caso de la radiación gamma.

Figura 2. Espectro Electromagnético



Luz Visible. Isaac Newton fue el primero en descomponer la luz visible blanca del Sol en sus componentes mediante la utilización de un prisma. La luz blanca esta constituida por la combinación de ondas que tienen energías semejantes y es debido a que ninguna de estas predomine sobre las otras. La radiación visible va desde 384×10^{12} hasta 769×10^{12} hz. Las frecuencias mas bajas de la luz visible (Longitud de onda larga se perciben como rojas y las de mas alta frecuencia (longitud corta) aparecen violetas.

Rayos infrarrojos. La radiación infrarroja fue descubierta por el astrónomo William Herschel (1738-1822) en 1800, al medir la alta temperatura mas allá de la zona roja del espectro visible. La radiación infrarroja se localiza en el espectro entre 3×10^{11} hz. hasta aproximadamente los 4×10^{14} Hz. La banda infrarroja se divide en tres secciones próxima (a lo visible. 780 - 2500 nm), intermedia (2500 - 50000 nm) y lejana (50000 - 1mm). Toda molécula que tenga un temperatura superior al cero absoluto (-273° K) emite rayos infrarrojos y estos serán mayores entre mas temperatura tenga el objeto.

Microondas. La región de las microondas se encuentra entre los 10^9 hasta aproximadamente 3×10^{11} Hz (con longitud de onda entre 30 cm a 1 mm).

Ondas de Radio. Heinrich Hertz (1857-1894), en el año de 1887, consiguió detectar ondas de radio que tenían una longitud del orden de un metro. La región de ondas de radio se extiende desde algunos Hertz hasta 10^9 Hz con longitudes de onda desde muchos kilómetros hasta menos de 30 cm.

Rayos X. En 1895 Wilhelm Röntgen invento una máquina que producía radiación electromagnética con una longitud de onda menor a 10 nm a los cuales debido a que no conocía su naturaleza las bautizó como X.

Radiación Ultravioleta. Sus longitudes de onda se extienden entre 10 y 400 nm mas cortas que las de la luz visible.

Rayos Gamma. Se localizan en la parte del espectro que tiene las longitudes de onda mas pequeñas entre 10 y 0.01 nm.

A continuación se hará una descripción de los principios físicos en los que se basa cada una de estas fuentes para producir la radiación electromagnética necesaria para el trabajo de radiografía.

1.2.1 Rayos X

Se trata de una radiación electromagnética penetrante, producida bombardeando un blanco —generalmente de wolframio— con electrones de alta velocidad. Los rayos X fueron descubiertos de forma accidental en 1895 por el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen mientras estudiaba los rayos catódicos en un tubo de descarga gaseosa de alto voltaje. A pesar de que el tubo estaba dentro de una caja de cartón negro, Roentgen vio que una pantalla de platinocianuro de bario, que casualmente estaba cerca, emitía luz fluorescente siempre que funcionaba el tubo. Tras realizar experimentos adicionales, determinó que la fluorescencia se debía a una radiación invisible más penetrante que la radiación ultravioleta. Roentgen llamó a los rayos invisibles "rayos X" por su naturaleza desconocida. Posteriormente, los rayos X fueron también denominados rayos Roentgen en su honor.

Como ya se ha mencionado los rayos X son radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda va desde unos 10 nm hasta 0,001 nm (1 nm o nanómetro equivale a 1×10^{-9} m). Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayores son su energía y poder de penetración. Los rayos de mayor longitud de onda, cercanos a la banda ultravioleta del espectro electromagnético, se conocen como rayos X blandos; los de menor longitud de onda, que están más próximos a la zona de rayos gamma o incluso se solapan con ésta, se denominan rayos X duros. Los rayos X formados por una mezcla de

muchas longitudes de onda diferentes se conocen como rayos X ‘blancos’, para diferenciarlos de los rayos X monocromáticos, que tienen una única longitud de onda. Tanto la luz visible como los rayos X se producen a raíz de las transiciones de los electrones atómicos de una órbita a otra. La luz visible corresponde a transiciones de electrones externos y los rayos X a transiciones de electrones internos. Los rayos gamma, cuyos efectos son similares a los de los rayos X, se producen por transiciones de energía en el interior de núcleos excitados.

Los rayos X se producen siempre que se bombardea un objeto material con electrones de alta velocidad. Gran parte de la energía de los electrones se pierde en forma de calor; el resto produce rayos X al provocar cambios en los átomos del blanco como resultado del impacto. Los rayos X emitidos no pueden tener una energía mayor que la energía cinética de los electrones que los producen. La radiación emitida no es monocromática, sino que se compone de una amplia gama de longitudes de onda, con un marcado límite inferior que corresponde a la energía máxima de los electrones empleados para el bombardeo.

Los componentes básicos necesarios para que un dispositivo emita rayos X se describen a continuación:

1.2.1.1 Carcasa Protectora

El tubo de rayos X, siempre está montado en una carcasa protectora, formada de plomo, y diseñada para controlar los serios peligros que afectaron a la radiología en sus principios, (exposición excesiva a la radiación, descarga eléctrica). La carcasa protectora proporciona también un soporte mecánico al tubo de rayos X, y lo protege frente al posible daño producido por la manipulación descuidada. Cuando se producen, los rayos X son emitidos con la misma intensidad en todas las direcciones, pero nosotros solo empleamos los emitidos a través de una sección especial del tubo de rayos X, llamada ventana.

Los rayos X emitidos a través de la ventana se conocen como haz útil, los restantes que se escapan a través de la carcasa protectora son, la radiación de fuga.

La carcasa protectora, alrededor de algunos tubos de rayos X, contiene aceite que actúa como aislante térmico y refrigerador.

1.2.1.2 Envoltura de cristal o Tubo

El de rayos X, es un tipo especial de tubo al vacío, los componentes del tubo se encuentran dentro de una envoltura de cristal. Esta envoltura, que debe de ser fabricada de un vidrio que pueda soportar el tremendo calor generado, mantiene el vacío, lo cual hace posible una producción mas eficaz de rayos X, y prolonga la vida del tubo. Si estuviera lleno de gas, disminuiría el flujo de electrones que van del cátodo al ánodo, se producirían menos rayos X y se crearía mas calor. La ventana del tubo es de un cristal mas fino que deja filtrar los rayos X. Es un segmento que permite una máxima emisión de rayos X con absorción mínima por la envoltura de cristal. Dentro de la envoltura de cristal del tubo se pueden encontrar los siguientes elementos:

1.2.1.2.1 Cátodo

Parte negativa del tubo de rayos X, tiene dos partes principales: el filamento y la copa de enfoque.

1.2.1.2.1.1 Filamento

Es una espiral de alambre que emite electrones al ser calentado. Cuando la corriente que atraviesa el filamento es lo suficientemente intensa, de aproximadamente 4 a 5 amperios o

superior, los electrones de la copa externa del filamento entran en ebullición y son expulsados del filamento, este fenómeno se conoce como emisión termoiónica. Los filamentos suelen estar formados por Tungsteno Tórico, el Tungsteno proporciona una emisión termoiónica mayor que otros metales. Su punto de fusión es de 3410 °C, de forma que no es probable que se funda con el calor, además no se vaporiza, puesto que si lo hiciera el tubo se llenaría rápidamente de gas. La adición de un 1 a un 2 por ciento de Torio al filamento de Tungsteno, incrementa la eficacia de la emisión de electrones y prolonga la vida del tubo.

1.2.1.2.1.2 La copa de enfoque

Es un refuerzo metálico del filamento, condensa el haz de electrones en un área pequeña del cátodo. La efectividad de la copa de enfoque depende de tres factores:

- 1- La corriente del filamento que regula la cantidad de rayos X de salida.
- 2- El tamaño del filamento impone el tamaño del foco efectivo que se produce en el ánodo. Los tubos de rayos X suelen llevar dos filamentos de diferente tamaño, que proporcionan dos puntos focales; el punto focal de tamaño pequeño se asocia con el filamento menor y se emplea cuando se necesitan imágenes de alta resolución. El punto focal de tamaño grande se asocia con el filamento mayor y se emplea cuando se necesitan técnicas que produzcan gran cantidad de calor.
- 3- La situación de uno u otro suele hacerse con el selector que se encuentra en la consola de control.

1.2.1.2.2 Ánodo

Es el lado positivo del tubo de rayos X, existen dos tipos de estos: Los llamados estacionarios y los llamados rotatorios. El ánodo tiene tres funciones en el tubo de rayos X:

- 1- Es el encargado de la conducción de la energía eléctrica.
- 2- Proporciona el soporte mecánico necesario al blanco.
- 3- Debe ser un buen conductor térmico, cuando los electrones chocan con el ánodo, más del 99% de su energía cinética se convierte en calor, que debe ser eliminado rápidamente antes de que pueda fundir el ánodo. El cobre es el material más utilizado en el ánodo. El ánodo está compuesto de las siguientes partes:

1.2.1.2.2.1 Punto focal

Es el área del blanco desde la que se emiten los rayos X. Constituye la fuente de radiación.

1.2.1.2.2.2 Blanco

Es el área del ánodo con la que chocan los electrones procedentes del cátodo. En los tubos de ánodo estacionario, el blanco consiste en una pequeña placa de tungsteno que se encuentra encastrado en un bloque de cobre. En los tubos de ánodo rotatorio, el disco que gira es el blanco, normalmente está formado por una aleación de Tungsteno mezclada con Torio, que proporciona una resistencia adicional para soportar el esfuerzo de la rotación rápida. El Tungsteno es el material elegido para el blanco. En la figura 3 se observa un ejemplo de un dispositivo utilizado para la realización de la práctica radiográfica.

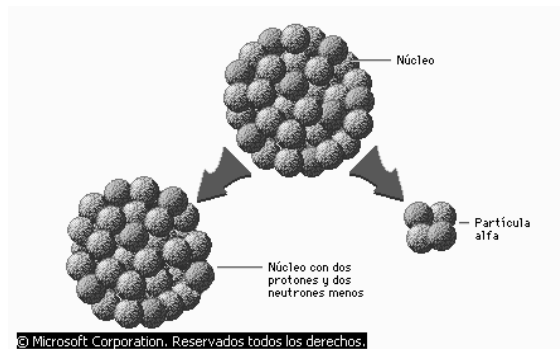
Figura 3. Equipo de generación de rayos X



1.2.2 Rayos Gamma

Las emisiones alfa y beta suelen ir asociadas con la emisión gamma. Los rayos gamma no poseen carga ni masa; por tanto, la emisión de rayos gamma por parte de un núcleo no conlleva cambios en su estructura, sino simplemente la pérdida de una determinada cantidad de energía radiante. Con la emisión de estos rayos, el núcleo compensa el estado inestable que sigue a los procesos alfa y beta. La partícula alfa o beta primaria y su rayo gamma asociado se emiten casi simultáneamente. Sin embargo, se conocen algunos casos de emisión alfa o beta pura, es decir, procesos alfa o beta no acompañados de rayos gamma; también se conocen algunos isótopos que emiten rayos gamma de forma pura. Esta emisión gamma pura tiene lugar cuando un isótopo existe en dos formas diferentes, los llamados isómeros nucleares, con el mismo número atómico y número másico pero distintas energías. La emisión de rayos gamma acompaña a la transición del isómero de mayor energía a la forma de menor energía. Un ejemplo de esta isomería es el isótopo protactinio 234, que existe en dos estados de energía diferentes, y en el que la emisión de rayos gamma indica la transición de uno al otro. En la figura 3 se observa la generación de radiación gamma.

Figura 4. Generación de Radiación Gamma



1.3 Tipos de radiografía industrial

La radiografía, en la actualidad, se utiliza en los mas diversos campos de la industria, ya que es un tipo de ensayo que nos da varias facilidades para poder utilizarlo, como serían: Es un tipo de prueba que se puede realizar en el sitio en el que se están llevando a cabo los trabajos, se obtienen los resultados rápidamente y al finalizar las pruebas queda un registro (que serían las placas radiográficas) de los resultados que se obtuvieron.

Uno de los principales campos en los que se utiliza la radiografía industrial es en el de la evaluación de la calidad de los trabajos de soldadura, ya que es la manera más confiable de asegurar que las soldaduras han sido realizadas con la calidad necesaria. Otros campos en los que se utiliza la radiografía industrial son por ejemplo: La evaluación y detección del armado de la estructura de columnas de concreto en edificios, certificación de maquinaria y equipos, detección de defectos en piezas fundidas, etc.

Ahora bien, como se menciona en el párrafo anterior, su principal campo de aplicación es el de la evaluación de soldaduras, siendo, en las siguientes aplicaciones, en las que más se utiliza: Uniones soldadas en estructuras metálicas, juntas soldadas en tuberías, juntas soldadas en tanques, calificación de procedimientos de soldadura y de soldadores.

La radiografía de estructuras metálicas se usa para comprobar la calidad de los trabajos de soldadura que se están efectuando en la construcción de los distintos elementos metálicos que serán parte de techos, columnas o elementos estructurales de una edificación dada. Según sea el nivel de control que se este llevando en un proyecto, así será el numero de placas radiográficas que se sacaran en relación al numero total de soldaduras que se realicen. Comúnmente para la inspección del control de calidad de este tipo de trabajos, así como para la interpretación radiográfica hay que basarse en lo que se indica en la norma AWS D1.1.

En el caso de la radiografía de juntas soldadas en tubería, al igual que en el caso anterior, dependerá, del nivel de control que se este llevando, el número de radiografías que se tomen. La interpretación radiográfica deberá de llevarse a cabo según lo que se indique en la norma que corresponda al tipo de trabajo de tubería que se este realizando. De esta forma se tiene que por ejemplo, para tubería de potencia se debe utilizar la norma ANSI 31.1B; para tubería que transportara petróleo o alguno de sus derivados se utiliza la norma API 1104; para las tuberías que van dentro de una caldera se utiliza la norma ASME Sección I; para tubería de presión se utiliza la norma ASME Sección VIII.

Para las radiografías en tanques de almacenamiento, el trabajo radiográfico se basa en lo que indica la norma API 650 (para la construcción de tanques nuevos) o la API 653 (para el mantenimiento, reparación, cambio de servicio o desarmado, traslado y armado de tanques ya existentes), estas normas coinciden en que no se deben de radiografiar el 100% de las soldaduras que se realizan en los tanques, sino que se debe de escoger al azar un cierto porcentaje de las soldaduras, el cual será el que se radiografie. El porcentaje que se escoja para ser radiografiado dependerá de varios factores como son el número de anillos que componen el tanque, el diámetro del mismo, la cantidad de uniones verticales que posee el tanque, la cantidad de soldadores que están participando en la obra, etc.

En el caso de la calificación de procedimientos de soldadura y calificación de soldadores, para estas tareas lo que se hace es el radiografiar probetas que han sido especialmente preparadas para este fin siguiendo el procedimiento que se utilizara en el montaje real de la obra, y dependiendo de que se trate así será la norma en la que se debe de basar el análisis radiográfico, tanto para la interpretación, como para determinar a cuantas probetas se les debe de efectuar la prueba.

1.4 La película radiográfica

Una de las grandes ventajas del ensayo radiográfico esta en el hecho de que nos proporciona documentos permanentes del examen realizado. Este documento es la película radiográfica de uso industrial.

Una película radiográfica se compone de:

- 1) Un soporte de triacetato de celulosa o poliéster.
- 2) Ambos lados del soporte están provistos de:
 - a) Una capa de gelatina endurecida que protege la emulsión.
 - b) Una capa de emulsión.
 - c) Una capa muy delgada llamada substrato, que asegura la adherencia de la capa de emulsión al soporte.

La emulsión fotográfica, sensible a la luz y a las radiaciones “X” y “ γ ”, que cubren las películas, está constituida por una mezcla de gelatina y cristales de halogenuro de plata microscópico. Antes del proceso de revelado y fijado, la capa de emulsión de una película radiográfica presenta un tono verde claro.

Entre las propiedades de una película radiográfica se encuentran las siguientes:

- 1) Presenta dos capas de emulsión, una por cada lado del soporte, lo que permite reducir los tiempos de exposición y obtener una imagen más contrastada.
- 2) La acción de la radiación electromagnética sobre la película da lugar a la formación de la imagen latente, la cual es puesta de manifiesto por el tratamiento de revelado y fijado adecuado.
- 3) La emulsión es sensible a las radiaciones electromagnéticas.

En el mercado existen varios tipos de película, que generalmente, proporcionan resultados óptimos para las diferentes clases de trabajo en la radiografía de producción. Sin embargo, no pueden formularse reglas definidas en la selección de películas, puesto que ello depende de los requisitos específicos del usuario tales como: nivel de calidad radiográfico, y el tiempo de exposición máximo económicamente permisible.

Ahora que ya se han dado las características principales de las películas radiográficas, se hablara acerca de cómo es que esta debe ser manejada y utilizada antes, durante y después de ser expuesta a la fuente de radiación.

Las películas no expuestas, deben almacenarse de tal forma que sean protegidas de los efectos: de la luz, presión, calor excesivo, humedad excesiva, vapores de gases o radiación penetrante.

Las películas deben manejarse bajo las condiciones de luces de seguridad recomendadas por el fabricante.

La limpieza es el más importante de los requisitos para obtener una buena radiografía. Deben mantenerse limpios el chasis y las pantallas, no sólo porque la humedad retenida pueda causar exposición o afectar el procesado de la radiografía, sino porque también la suciedad puede ser transferida a la mesa de carga y subsecuentemente a otra película o pantalla. Debe mantenerse limpia la superficie de la mesa de carga. Es necesario tener un cuarto oscuro, en el cual se tenga la mesa de trabajo en un lado y en otro lado las tinas de revelado. Con esto se evita la contaminación química.

Las películas deben manejarse sólo por sus orillas, con las manos limpias y secas, o bien con guantes de algodón; de no ser así quedarán impresas huellas digitales. Debe evitarse el doblado y la presión excesiva y un manejo brusco.

Con igual cuidado se deberán de manejar las películas durante el proceso de revelado, ya que de nada sirve el haber aplicado una técnica impecable en el proceso de carga y toma de las películas, si cuando se están revelando éstas, no se observan las medidas de seguridad necesarias, como son: Asegurarse que el cuarto en el que se está efectuando el revelado este totalmente oscuro, que las luces negras que se utilizan en el mismo sean las adecuadas, que los líquidos del proceso de revelado sean los adecuados y que se encuentren limpios y en buenas condiciones, que las películas no se dañen (se doblen o se ensucien) al momento de sacarlas de los portapelículas y colocarlas en la canasta de revelado o en el reel de revelado, asegurarse que los tiempos que se mantendrán las películas en cada uno de los líquidos son los adecuados en relación a la temperatura de estos que se tiene y manipularlas con cuidado al momento de colocarlas a secar.

La película ya revelada e interpretada deberá almacenarse empleando el mismo cuidado que para cualquier otro registro valioso. Deben preferirse sobres que tengan una costura en la orilla, en lugar de los que tienen una costura en el centro, y unido con un adhesivo no higroscópico, dado que, el desteñimiento y las manchas de la imagen son causados por ciertos adhesivos empleados en la fabricación del sobre.

1.5 Variables que inciden en la calidad de una radiografía

Para obtener una radiografía de óptima calidad hay que tomar en cuenta varios factores, aparte del manejo cuidadoso de la película, que se menciono en la sección anterior. Entre estos factores se pueden mencionar:

1.5.1 Selección de la película adecuada:

Escoger, según sean los requerimientos del trabajo, la película con las características adecuadas:

Como ya se menciono, en la sección anterior, la emulsión fotográfica (foto sensible o radio sensible), que cubre las películas radiográficas esta constituida por una mezcla de gelatina y microscópicos cristales de halogenuro de plata, generalmente bromuros. El tamaño de estos cristales, determina el tamaño de grano de las películas y éste a su vez la calidad de la imagen obtenida. A menor tamaño de grano, mayor calidad.

Las películas radiográficas industriales se clasifican de acuerdo con la norma ASTM E-94 – 68, en cuatro grandes grupos o tipos, en función de su rapidez, contraste y tamaño de grano. En la siguiente tabla se da la clasificación de las distintas películas radiográficas industriales:

Tabla I. Características de las películas

<i>Película Tipo</i>	<i>Características</i>		
	<i>Rapidez</i>	<i>Contraste</i>	<i>Tamaño de Grano</i>
1	Lenta	Muy alto	Muy Pequeño
2	Media	Alto	Pequeño
3	Alta	Media	Grande
4 (a)	Muy Alta (a)	Muy Alto (a)	(b)
(a) Película para ser utilizada con pantallas reforzadas fluorescentes. Cuando estas películas se exponen directamente o con pantallas de plomo, su rapidez, contraste y tamaño de grano son medios.			
(b) El tamaño de grano depende de las características de las pantallas fluorescentes utilizadas.			

1.5.1.1 La rapidez

Se define como la velocidad a la cual la película se ennegrece cuando es sometida a una exposición.

1.5.1.2 El contraste

Es el grado de diferencia entre dos campos o zonas contiguas de una radiografía que presentan diferentes densidades.

1.5.1.3 La densidad

Se define como el grado de ennegrecimiento de una película expuesta a la acción de la radiación.

La comparación cuantitativa de estas características de las películas se presenta en las curvas sensitométricas o curvas H-D (Hurter-Driffield) que relacionan la exposición aplicada a una película con la densidad resultante, obtenidas en condiciones de procesado de las películas previamente establecidas y normalizadas.

Si se observan estas curvas, se aprecia en primer lugar que ninguna de ellas comienza en la densidad cero. Esto se debe a que toda película presenta una pequeña densidad inherente o “velo”, que puede ser medida sobre una película que no haya sido expuesta y que se ha procesado en condiciones normales. La aparición de este velo se debe fundamentalmente a dos causas: En primer lugar a la absorción de la luz por el soporte o base y en segundo lugar a la aparición del velo químico como consecuencia de la acción ejercida por los reactivos químicos utilizados en los baños de revelado y fijado sobre la emulsión.

1.5.2 Tipo de pantallas adecuadas para el tipo de película y técnica que se esta utilizando

Existen diferentes tipos de pantallas dependiendo del material con el que están fabricadas, estas se utilizan dependiendo del tipo de película, técnica y aplicación que se esté usando. A continuación se hará una descripción de las diferentes pantallas que se utilizan:

1.5.2.1 Pantallas de hojas metálicas

Comúnmente las pantallas de hojas de plomo son usadas en contacto directo con las películas y, dependiendo de su espesor y composición del material de la probeta, exhibirá una acción intensificante a diferencias de potencial tan bajos como 90 KV. Además, cualquier pantalla usada enfrente de la película actúa como un filtro, para absorber, básicamente, la radiación dispersada que surge de la probeta, mejorando la

calidad radiográfica. La selección del espesor de la pantalla de plomo o de otro metal está sujeto a las siguientes consideraciones: Material que va a radiografiarse, espesor del material que va a radiografiarse, variación del espesor del material que va a radiografiarse, espectro de energía de la radiación usada y el mejoramiento deseado (incremento o decremento del contraste). Las pantallas de plomo pierden la dispersión alcanzada en la película, sin tomar en cuenta si la pantalla permite una disminución o necesita un aumento en la exposición radiográfica. Para evitar obtener imagen deformada debido a las pantallas, debe haber contacto íntimo entre la pantalla de plomo y la película, durante la exposición.

Deben usarse las pantallas de hoja de plomo de espesor apropiado, siempre y cuando mejoren la calidad radiográfica o la sensibilidad del indicador de calidad de imagen o ambos. El espesor de la pantalla de plomo frontal debe seleccionarse con cuidado, para evitar filtración excesiva en la radiografía de materiales delgados o ligeramente aleados, particularmente a bajos kilovoltios. En general no hay ventajas de exposición al colocar las pantallas de plomo a 0.127 mm enfrente y atrás, abajo de 125 kilovoltios en la radiografía de acero con espesor de 6.35 mm o menos. Dado que la diferencia de potencial (KV) se aumenta para penetrar secciones de acero más gruesas, de todas maneras existe una ventaja de exposición significativa. Además, para intensificar la acción las pantallas de plomo de atrás, son usadas como protección contra la radiación reflejada y su espesor es únicamente importante para esta función. Como la energía de exposición se aumenta para penetrar espesores más gruesos de un material dado, generalmente se aumenta el espesor de la pantalla de plomo. Para radiografías usando fuentes radiactivas, el espesor mínimo de la pantalla de plomo frontal debe ser de 0.13 mm para iridio-192 y 0.25 mm para cobalto 60.

1.5.2.2 Otras pantallas de materiales metálicos

Las pantallas de óxido de plomo trabajan en una forma similar a las pantallas de hojas de plomo (las cuales son generalmente de una aleación de plomo con 3 a 5% de antimonio), excepto que su equivalencia en espesor con respecto a las hojas de plomo es aproximadamente de 0.013 mm.

Las pantallas de cobre tienen menos absorción e intensificación que las fabricadas con plomo, pero pueden proporcionar mejor sensibilidad radiográfica con energías superiores a 1 mega - volt.

Pueden usarse las pantallas de oro, tantalio o algún otro metal pesado, en aquellos casos en que las pantallas de plomo no son recomendables.

1.5.2.3 Pantallas fluorescentes

En general, para una fuente de radiación determinada, las pantallas fluorescentes deben utilizarse únicamente cuando el tiempo de exposición, sin éstas, es excesivamente largo; en aquellos casos en los cuales se usan las pantallas fluorescentes, debe asegurarse de obtener el nivel adecuado de calidad de imagen. Es esencial un buen contacto entre la pantalla y la película para el uso eficiente de las pantallas fluorescentes.

1.5.3 Cuidado de las pantallas

Todas las pantallas deben manejarse cuidadosamente para evitar: rayas, marcas, suciedad o grasa en las superficies que están en contacto con la película. Debe quitarse con un solvente la grasa y pelusa de la pantalla de plomo. Las pantallas fluorescentes deben limpiarse siguiendo las indicaciones del fabricante. Deben descartarse aquellas pantallas que muestren o que tengan algún daño físico.

1.5.4 Uso de los indicadores de control de imagen adecuados

El indicador de la calidad de imagen es un dispositivo empleado para demostrar que la radiografía obtenida bajo la técnica empleada fue satisfactoria. Se emplea como un control de la sensibilidad y contraste alcanzados en la película; sirve como un control de la calidad radiográfica que se está obteniendo. No se emplea para evaluar el tamaño de las discontinuidades o establecer límites de aceptación del material o producto.

El indicador de la calidad de imagen es de un material radiográfico similar al objeto que está siendo inspeccionado y su espesor es generalmente del 2% del espesor del objeto.

Hay varios tipos de indicadores de control de imagen, los cuales se agrupan en tres tipos principales: Indicadores de escalera, indicadores de agujeros e indicadores de alambre.

1.5.4.1 Indicadores de escalerilla

Todos ellos, como su nombre lo indica, consisten en gradas o escaleras talladas en un material que tenga una absorción, frente a los rayos "X" o gamma, semejante a la que posee el material del objeto que se radiografía. Es esencial conocer con exactitud la altura o el espesor de los escalones para evaluar, posteriormente, la calidad de la imagen. Como se puede comprender, con ésta disposición se pretende tener una escala de valores de espesores que se traduzcan, sobre la imagen, en una escala de grises. Para la evaluación de la calidad se determina cual es el escalón más delgado todavía visible en la imagen del control de imagen y se calcula, con este dato la sensibilidad de detección que le corresponde.

1.5.4.2 Indicadores de Agujeros

Consisten en plaquitas planas, cuyo espesor esta perfectamente determinado, en las que se han taladrado varios orificios de diámetro creciente, siendo el más pequeño, generalmente, de diámetro igual al espesor de la placa. El diámetro de los orificios guarda una relación 1T, 2T y 4T con respecto al espesor del indicador de la calidad de imagen "T". La mayor parte de los indicadores de control de imagen de las normas ASME pertenecen a este tipo.

1.5.4.3 Indicadores de hilos

Son colecciones de hilos de material semejante al del objeto que se radiografía, montadas sobre caucho, plástico, etc. Los diámetros de los hilos varían de acuerdo con una cierta progresión característica del indicador de control de imagen. La lectura se realiza sobre el diámetro del hilo más fino todavía visible en la imagen, deduciéndose, como siempre, la sensibilidad de detección que le corresponde.

1.6 Radiografía de uniones soldadas

La radiografía de las uniones soldadas, cualquiera que sea su tipo, se obtendrá por el método de transparencia, situando la unión a radiografiar entre la película y la fuente de radiación.

De acuerdo con esta disposición y la imagen radiográfica obtenida sobre la película, los tipos de radiografía que se pueden considerar son:

- a) De una sola pared con interpretación de una sola pared.
- b) De doble pared con interpretación de la imagen de las dos paredes atravesadas por la radiación.
- c) De doble pared con interpretación de una sola pared.

Estos tipos de radiografía se pueden dividir a su vez en varios tipos de técnicas dependiendo de factores tales como el diámetro de la tubería que se esta radiografiando, la accesibilidad que haya para trabajar sobre la junta de interés o el espesor de material que se pretende atravesar. Por lo amplio de este tema nos centraremos en lo que son las técnicas para la radiografía de tubería. Estas técnicas se describen a continuación:

1.6.1 Técnica de tercios

Esta técnica se utiliza e tuberías de diámetros mayores de 10 cm. (3½”) hasta tuberías de diámetros de 18” y consiste en lo siguiente:

1.6.1.1 Marcado correcto de la tubería

- a) Se marca el número de la secuencia de la junta o unión.
- b) Se hace una línea de referencia en forma de flecha en la parte superior del tubo indicando el sentido del avance de la obra o sentido del fluido a conducir.

- c) A partir de esta línea de referencia se marcan otras dos en forma de flecha a ambos lados del cordón de soldadura indicando estas el sentido de la graduación de la soldadura.
- d) Se mide el perímetro, se divide en tres partes marcando así la dimensión de cada tercio, que se enumeran siguiendo el sentido de las líneas de referencia como tercios 1, 2, 3 o A, B, C.

1.6.1.2 La correcta colocación del cinturón

- a) Se coloca el cinturón de números centrando la línea de referencia de la tubería con respecto a la línea de referencia de la graduación del cinturón colocando el cinturón a un lado del cordón de soldadura del lado del avance de la obra.

1.6.1.3 Centrado correcto del punto focal

- b) Se traslada el cabezal hasta la tubería y se coloca en la parte superior, centrando el punto focal (marcado) en el cabezal con la línea de referencia y a una distancia de 2 a 3 cm atrás de la orilla del cordón de soldadura.
- c) Terminada la exposición se retira el cabezal, colimador o extremo del tubo guía y se desliza hacia el lado opuesto y se centra en el punto focal en la siguiente marca de la división de los tercios para tomar el siguiente.
- d) Terminada la exposición se retira el cabezal y se regresa a la posición inicial y a continuación se desliza el cabezal hacia el lado contrario al anterior y se centra el punto focal en la marca del otro tercio y de esta forma se hace la siguiente exposición completando así la exposición total del perímetro de la soldadura.

- e) Terminando la tercera exposición se retira el cabezal, y se desconecta y recoge el cable de alimentación, además de recoger el cinturón de números se traslada en forma manual el equipo a la siguiente junta o unión.

1.6.1.4 La correcta exposición

- a) En el caso de los rayos X el tiempo de exposición dependerá del tiempo que tarda en uniformizar el haz de radiación al miliamperaje requerido mediante la perilla variadora de corriente, deberá ser de 10 segundos máximo (movimiento uniforme). Este miliamperaje se mantendrá durante el tiempo requerido de exposición, el cual empezara a contar desde el momento en que parte de cero la perilla variadora de corriente. En el caso de los rayos gamma el tiempo de exposición empezará a contar a partir de que la fuente de radiación llegue al punto seleccionado de exposición.

1.6.2 Técnica de Óvalos

Esta técnica se utiliza para la toma de radiografías en tuberías de diámetros pequeños, inferiores a los 10 cm (3½”) y consiste en lo siguiente:

1.6.2.1 Marcado de la tubería

- a) Se identifica el número de junta.
- b) Se traza una línea de referencia en forma de flecha en la parte superior de la tubería indicando así el avance de la obra o secuencia de las juntas.
- c) A partir de esta línea de referencia se marcará otra línea en forma de flecha a uno y otro lado del cordón de soldadura que indicaran la secuencia de las placas 2 o 3 según las exposiciones.

- d) Si la toma se realiza en 2 exposiciones, se mide el perímetro del tubo y se divide entre 4 esta dimensión, se marcará a uno u otro lado de la línea de referencia para 2 exposiciones, o sea a un ángulo de 90° de la línea de referencia de la segunda exposición. Si la toma se realiza en 3 exposiciones 100%, se mide el perímetro de la soldadura y se divide entre 6 y esta dimensión se marcará a uno y otro lado de la línea de referencia a 60°, de esta, a uno y otro lado de la misma.

1.6.2.2 Colocación y centrado de la fuente

- a) La distancia fuente-película se tomara como mínimo de 5 veces el diámetro exterior y como máximo de 7 veces el mismo, esto con rayos gamma o rayos X, y a una separación del cordón de soldadura de medio diámetro. Esto con el fin de que la abertura del óvalo no sea mayor de 1/16".
- b) El centrado de la fuente se hace con respecto a las marcas de la tubería dependiendo si la toma se realizara al 66% o al 100%, se centrara en dos o tres exposiciones, respectivamente.

1.6.2.3 Colocación y centrado del cabezal, colimador o extremo del tubo guía

- a) La colocación del cabezal podrá ser en dos posiciones:
- El cabezal longitudinal a la soldadura.
 - El cabezal longitudinal a la tubería.

El centrado del cabezal será con respecto a las marcas de la identificación y también con respecto a la orilla del penetrametro, este debe ir siempre del lado de la fuente a orillas del cordón de

soldadura y centrado con respecto al tubo, debiendo chequear que el chasis quede perpendicular al punto focal en cada una de las exposiciones realizadas, se harán 2 tomas cuando se radiografie al 66% y 3 tomas cuando se radiografie al 100%.

1.6.2.4 Exposición

- b) En el caso de exposiciones con máquinas de rayos “X”, se debe procurar que el movimiento de la perilla sea lo más uniforme posible y lento, al estar llegando a la graduación del miliamperaje requerido y como el tiempo de exposición empieza a contar a partir del momento en que la perilla variadora de corriente empieza a girar, se debe procurar que este movimiento no tarde más de 8 segundos, del tiempo total que dure la exposición.

- d) Con los rayos gamma se debe procurar que no haya dobleces en la extensión o guía de la fuente o en el reel lográndose así un movimiento y desplazamiento de la fuente rápido y seguro por medio de la manivela del maneral, procurando siempre, que antes de llegar la cápsula al tope de la extensión, la velocidad de movimiento disminuya lo suficiente como para no golpear bruscamente el tope de la punta de exposición, lo mismo hay que hacer cuando la cápsula regrese al contenedor, la velocidad debe disminuirse al acercarse la cápsula al contenedor.

1.6.3 Técnica de Placas

Esta técnica se utiliza para soldaduras que unen placas para formar tanques esféricos, verticales, horizontales, etc., y consiste de los siguientes pasos:

1.6.3.1 Marcado de las venas y placas soldadas (tanques esféricos)

- a) Se hace la división del tanque en tres partes:
 - La parte superior (hemisferio superior).
 - La parte central (ecuador).
 - La parte inferior (hemisferio inferior).
- b) A las uniones de placas se les llamará vena de soldadura de la parte donde se encuentren, enumerándose también en número consecutivo de venas.
- c) La vena se marcará en tramos (placas) de 40 cm., para dejar traslape, y en cada una de las marcas que limitan una placa de otra, se alargarán hacia ambos lados de la vena con el fin de colocarles una línea en forma de flecha, indicando el avance de la graduación de las placas en cada una de las venas.

1.6.3.2 Colocación y centrado de la fuente

- a) La colocación del punto focal con una máquina de rayos “X” o de rayos gamma será a una altura de 50 a 80 cm. de la superficie de la vena de soldadura, utilizando un equipo auxiliar que consiste en un “burro” con 4 patas para el equipo de rayos “X”, que se sostiene por medio de una polea y cables, y un tripie de varilla que se sostiene por medio de imanes, en las 3 patas, para las maquinas de rayos gamma.

- b) El centrado del punto focal será con respecto del tramo inspeccionado y perpendicular al cordón de soldadura.

1.6.3.3 Colocación y centrado del cabezal, colimador o extremo del tubo guía

El cabezal se colocara, sobre su soporte, en el tramo marcado en el lado opuesto al punto focal por la parte interna o externa del tanque, según la colocación del punto focal.

- a) Este cabezal deberá de sujetarse a la base que deberá a su vez colocarse y sujetarse al tramo marcado por medio de imanes o algún otro método.
- b) La base a la que se sujetara el cabezal deberá estar en intimo contacto con el cordón de soldadura y paralelo al mismo.
- c) El centrado de la base del cabezal se hará con respecto a las marcas del tramo de la identificación y la marca central de la identificación que deberá quedar encima del cordón de soldadura.
- d) El centrado de la base del cabezal se hará de acuerdo a las marcas de la longitud de la placa en la identificación y el espacio central de la identificación deberá quedar encima del cordón de soldadura quedando la boca de la base y la punta de la identificación hacia el avance de las marcas de la vena de la soldadura que se está inspeccionando.

1.6.3.4 Exposición

- a) Esta se realiza de la misma forma en la que se realiza la exposición en la técnica de óvalos descrita anteriormente.

1.6.4 Técnica radial

Esta técnica difiere de las demás en que la fuente de radiación va colocada en el centro del tubo y con una sola exposición se saca todo el perímetro de la soldadura.

Tiene ciertas limitaciones, si la toma se hace con rayos "X", ya que el cabezal debe ser de tipo radial, y el tubo debe de ser de un diámetro donde quepa el equipo y puede ser impulsado el cabezal.

Si la toma es con rayos gamma el diámetro del tubo deberá ser suficiente para que el operador quepa en el.

La soldadura a inspeccionar debe quedar en un tramo corto de tubo, en caso contrario el operador se tendrá que desplazar por el interior del tubo con las incomodidades del caso.

1.6.5 Técnica alternativa para la inspección de tubería de diámetros pequeños

En diámetros pequeños se puede usar una técnica consistente en colocar la fuente a una distancia de 4 veces el diámetro, para rayos "X", o de 6 veces el diámetro para rayos gamma, de la superficie del tubo, como mínimo, pero en este caso la fuente si se encuentra en el plano de la soldadura y el cordón superior se proyecta sobre el cordón inferior. Cuando se use esta técnica, se deberán tomar por lo menos tres exposiciones desplazando la fuente 60° a uno y otro lado de la primera exposición. Esta técnica se usa principalmente en forma óptima para la detección de posibles grietas.

1.6.5.1 Colocación del cabezal (Existen 2 opciones)

- a) Colocar la base del cabezal transversalmente al tubo, o sea, a lo largo de la soldadura.
- b) Colocar la base del cabezal longitudinalmente al tubo, o sea, transversal a la soldadura.

La segunda opción sólo se puede aplicar cuando se trata de tubos cuyo diámetro exterior sea como máximo de 2 3/8", ya que en diámetros mayores la imagen quedaría fuera de la película. En la primera opción, la base del cabezal no se coloca con la soldadura a su centro.

1.6.5.2 Fijación del cabezal, colimador o extremo del tubo guía

En los tanques la base del cabezal se fija por la parte interior del tanque usando imanes. La base debe quedar con el cordón exactamente al centro y su exceso de longitud debe quedar igualmente distribuido en ambos extremos del tramo marcado. En los tubos, la base puede sujetarse con una cuerda que abraza el tubo, la cual posea ganchos en sus extremos, o con un resorte para que se haga tensión, este tipo de agarre se debe colocar de manera que la soldadura quede exactamente al centro de la base del cabezal y rebasando las marcas del tercio en ambos extremos.

2 LA RADIOGRAFÍA Y LA INDUSTRIA PETROLERA

2.1 Usos comunes de la radiografía en la industria petrolera

Debido a que la petrolera es una industria en la cual hay una gran cantidad de trabajos que se realizan utilizando soldadura, la radiografía se ha vuelto de uso común en ella, ya que es un tipo de ensayo que permite de forma segura detectar cualquier defecto interno o superficial que se haya dejado al momento de realizar una soldadura, además de que como se ha mencionado, la radiografía tiene la gran ventaja de que luego de que se ha tomado nos deja una muestra física de los resultados que se obtuvieron durante el desarrollo de la prueba, la cual es la placa radiográfica.

Hay que hacer la aclaración que la radiografía se puede utilizar no sólo para la inspección y control de calidad de elementos que se están montando o construyendo, sino que también se puede utilizar para la inspección periódica de ciertos elementos soldados, que como parte de su mantenimiento predictivo, sea necesario el inspeccionar como se encuentran internamente las soldaduras, esto debido a que son elementos críticos en la operación y que por los usos que se les dan corren el riesgo de ser atacados por sustancias corrosivas o sufrir esfuerzos muy altos que puedan causar en cierto momento que las uniones soldadas lleguen a fallar por fatiga. Ahora bien, este tipo de inspecciones de las que se está hablando llevan consigo un problema adicional, el cual es que muchas veces los equipos tendrán que ser inspeccionados mientras aún están operando o si se han detenido se tendrá que tomar en cuenta a la hora de la inspección el que los mismos no se encuentran totalmente limpios sino que tendrán todavía restos de las sustancias que se transportaban o se almacenaban en ellos, lo cual forzara a recalcular los tiempos de exposición de la película radiográfica debido a que la radiación ya no tiene que atravesar solamente el acero sino que además tendrá que atravesar la sustancia que se está transportando o almacenando en el dispositivo a inspeccionar.

Ya que se ha hablado de cuáles son los motivos por los que se usa la inspección radiográfica en la industria del petróleo, ahora toca mencionar más exactamente cuáles son las aplicaciones en las que se utiliza, en esta industria, la soldadura y por lo tanto la inspección radiográfica, así como las normas de interpretación que se utilizarán para cada caso, ya sea para equipos nuevos o en uso, estas aplicaciones son las siguientes:

- Construcción de tanques de almacenamiento tanto de petróleo como de sus derivados. La construcción de los tanques se debe realizar siguiendo lo que establece la norma API 650 para la construcción de tanques de almacenamiento. La inspección de los trabajos de montaje de los tanques por lo tanto, así como también la inspección radiográfica de los mismos se debe de regir por la misma norma.
- Para la reparación, mantenimiento, desmontaje, montaje de tanques usados o inspección por cambio de servicio de los mismos, se deben hacer los trabajos guiados por lo que establece la norma API 653, la cual es la que establece cuáles son los procedimientos adecuados para realizar los trabajos así como para llevar a cabo la inspección radiográfica de los mismos.
- Para la construcción de líneas de tubería nueva o para realizar mantenimiento o modificaciones en líneas de tubería ya existentes, tanto en las que son parte del oleoducto, como para las que son tuberías auxiliares, se debe usar como base para los trabajos como para la inspección radiográfica lo que es la norma API 1104, la cual es la que establece los procedimientos adecuados para los trabajos sobre sistemas de tuberías que transportaran petróleo o alguno de sus derivados.

2.2 Defectología que se busca generalmente en los elementos de transporte y almacenaje de petróleo y sus derivados

Los que se buscan detectar en una junta que pertenece a un sistema de tuberías de transporte de petróleo o sus derivados, serán básicamente los mismos defectos que se buscan en el análisis radiográfico de cualquier otro tipo de junta soldada, lo único que cambia es la norma en la que el radiólogo se basa para hacer la interpretación de la radiografía y la cual le indica a éste que tipo de discontinuidad será motivo de rechazo al aparecer en una placa radiográfica. Para el caso de las tuberías que transportan petróleo o alguno de sus derivados la norma de interpretación será la API 1104.

Los defectos o discontinuidades pueden ser causados por una técnica inapropiada para soldar, por una mala limpieza o preparación de la superficie sobre la que se trabaja o por una mala preparación de los electrodos, así como también por una mala conexión de la fuente de poder. Estas podrán ser encontradas en el metal de la soldadura, en la zona afectada por el calor o en el metal base de los elementos que se están soldando.

Las discontinuidades que comúnmente se buscan en las uniones soldadas de tubería de transporte son las siguientes:

- **Grietas.** Son discontinuidades de morfología bidimensional o laminar, que aunque regularmente salen a la superficie son difícilmente visibles a simple vista. Las grietas por su origen se pueden dividir en dos grandes grupos: Las frías o de tensión, producidas con el metal completamente solidificado y las calientes o de contracción que se forman con el metal aún en estado plástico, estas últimas pueden ser provocadas por la creación del arco sobre una de las paredes laterales de la tubería y luego moverlo dentro del área de soldadura, esto provoca un calentamiento y enfriamiento violento en la pequeña área de la tubería donde se forma el arco, lo cual a su vez provoca la aparición de esfuerzos internos dentro de la estructura cristalina del material, los cuales a su vez provocan que el

material vuelva quebradizo y en cierto momento pueda llegar a agrietarse, ya sea interna o superficialmente. Este tipo de defectos puede presentarse también dentro del bisel en casos en los cuales por accidente se golpeó con el arco las paredes del mismo.

- **Porosidades.** Este tipo de defecto puede aparecer en la superficie o cara de la soldadura o puede aparecer a través de la soldadura completa. Es provocado por los gases que quedan atrapados dentro de la soldadura que se solidifica. Estos tienen una apariencia esférica aunque a veces aparecen como pequeños y alargados agujeros sobre el cordón de soldadura (muchos de estos tienen la apariencia de los agujeros de termita que se presentan en la madera). La causa principal de los poros es la humedad, ya que la misma al quedar atrapada en el charco de soldadura, por ser más pesada que la atmósfera protectora, no puede escapar y forma los poros. Si este tipo de discontinuidad no es excesiva, la misma no tiene por que ser crítica; ahora si esta aparece en exceso, provocara zonas de concentraciones de esfuerzos, lo que puede causar que la soldadura sea rechazada. El exceso de porosidad es una señal de que los parámetros de soldadura, los materiales consumibles para la soldadura, o la preparación de la junta no están siendo debidamente controlados por el procedimiento de soldadura seleccionado, o el material base esta contaminado o su composición es incompatible con la del metal de los electrodos que se están usando. La concentración de poros puede llegar a provocar la aparición de una grieta.

- **Porosidad agrupada.** Esta es una agrupación de poros en una determinada zona del cordón de soldadura. Es el resultado de una mala técnica de inicio o de fin del arco de la soldadura.
- **Porosidad alineada.** Estos son una serie de poros los cuales están alineados, este tipo de poros ocurren casi siempre en el pase de relleno del cordón o cerca del pase de raíz del mismo y son causados por la contaminación causada en estas zonas por la evolución de los gases de la soldadura en estas zonas.
- **Poros Túnel.** Este es un tipo de poro alargado provocado por los gases que quedan atrapados dentro del charco de material fundido. En algunos casos el mismo parte del pase de raíz de la soldadura y llega hasta la superficie de la misma. Cuando uno o más poros de esta clase son vistos en la superficie de una soldadura, hay que tomar las precauciones del caso, ya que los mismos pueden ser la señal de una mayor concentración de porosidad en el interior del cordón. Muchos de los poros túnel encontrados en las soldaduras no se extienden por todo el espesor de las mismas, y algunos no llegan a la superficie.
- **Inclusiones de escoria.** Estos son materiales sólidos no metálicos atrapados entre el metal de la soldadura o entre el metal de ésta y el metal base. Estas podrán ser encontradas en soldaduras hechas por varios tipos de procesos de soldadura. Por lo general las inclusiones de escoria son el resultado de una falla en las técnicas de soldadura, una falla en el diseño para permitir el acceso apropiado a la junta, o a una inapropiada limpieza de la soldadura entre pases. Normalmente la escoria fundida flota sobre a soldadura, pero la que queda entre los pases de soldadura es la causa de que aparezca la escoria ya que la misma queda atrapada dentro del metal fundido de la soldadura.

- **Inclusiones de tungsteno.** Estas son partículas de tungsteno atrapadas en el metal de la soldadura y aparecen en las soldaduras hechas en procesos de soldadura con protección de gas tungsteno. En estos procesos, un electrodo no consumible de tungsteno es utilizado para establecer el arco de soldadura entre el electrodo y el material base a soldar. Si este electrodo de tungsteno es hundido dentro del metal fundido, o si la corriente es demasiado alta, entonces se depositaran gotas de tungsteno, las cuales darán como resultado las inclusiones de tungsteno. Estas inclusiones aparecerán en una placa radiográfica como marcas claras o blancas, debido a que el tungsteno es más denso que el acero o el aluminio, por lo que absorbe mayor cantidad de radiación. La mayoría de las demás discontinuidades que se pueden observar en una radiografía aparecerán en la misma como áreas oscuras sobre la misma.
- **Falta de Fusión o Fusión Incompleta.** Es el resultado de una mala técnica de soldadura, una inapropiada preparación del material base, o un inapropiado diseño de la junta. Otras deficiencias que causan faltas de fusión incluyen la falta del calor al realizar la soldadura o la falta de acceso a todas las caras que se deben fusionar. La adhesión de óxido a la soldadura interferirá también con la adecuada fusión, aunque esta se puede evitar aplicando a la soldadura el calor adecuado y permitiendo el acceso adecuado a todas las áreas a soldar.
- **Falta de penetración o penetración incompleta de la junta.** Este defecto ocurre cuando el metal de la soldadura falla al penetrar la junta. El área que no se penetra, y que por lo tanto, no se fusiona, es la discontinuidad que se describe como falta de penetración. Este defecto puede ser el resultado de la insuficiente aplicación de calor a la soldadura, a un mal diseño de la junta, a un espesor demasiado grande para penetrar con el arco o a un inapropiado control del arco de soldadura. Algunos procesos de soldadura tienen mayor habilidad para penetrar que otros. Para juntas soldadas por ambos lados, se recomienda que

antes de aplicar el pase de soldadura por el otro lado, hay que asegurar que no existen faltas de penetración. La soldadura sobre tubería es especialmente susceptible a este tipo de discontinuidades, ya que el interior de la tubería, es por lo general inaccesible.

- **Socavaduras.** Son generalmente asociadas con una inapropiada técnica de soldadura o una corriente excesiva para la soldadura, o ambas. Las socavaduras son canales de material que se fundió del metal base que está adyacente a la soldadura o a la raíz de ésta. Estos canales forman depresiones que forman zonas de concentraciones de esfuerzos. Cuando las socavaduras son controladas bajo los límites de las especificaciones del trabajo que se este realizando, y cuando las mismas no sean demasiado profundas, las mismas no son consideradas como defectos.
- **Concavidades.** Es una depresión sobre la superficie de la soldadura o en la raíz de ésta, la cual se extiende por debajo de la superficie adyacente del metal base. Es el resultado de una falla del soldador en lograr el relleno de la junta que se esta soldando.
- **Penetración excesiva.** Es una protuberancia del metal de aporte de la soldadura, la cual puede aparecer frente al borde de la presentación de la soldadura o en la raíz de la misma. Esta puede darse como resultado de una falta de control del proceso de soldadura, una mala elección de los materiales de la soldadura, o una inapropiada preparación del metal base. Si hay restos de óxidos adheridos sobre el metal base, estos interfieren con la fusión adecuada de los materiales base y de aporte, lo que da como resultado una penetración excesiva.

Todos los defectos descritos hasta el momento, son defectos que se buscan cuando una tubería está siendo montada (o sea, es tubería nueva), pero al estar esta ya en operación, y suponiendo que la soldadura de la misma fue supervisada por medio de radiografía, ya no serán estos los defectos que se busquen en la tubería, sino que en ese caso se aparece una nueva defectología, que será la que se quiere detectar, la cual es:

- **La corrosión.** Esta se puede definir como desgaste total o parcial que disuelve o ablanda cualquier sustancia por reacción química o electroquímica con el medio ambiente. El término corrosión se aplica a la acción gradual de agentes naturales sobre los metales. En el caso de líneas de tubería que transportan petróleo o alguno de sus principales derivados, la corrosión representa usualmente un serio problema el cual lleva a las empresas a invertir muchos recursos anualmente para tratar de mitigarlo. Comúnmente en este tipo de líneas de tubería la corrosión se presenta debido a tres mecanismos principalmente, el ácido sulfhídrico, el dióxido de carbono y el oxígeno, todos los cuales provocan corrosión en el material al estar en contacto con este y en combinación con agua. Cada uno de estos mecanismos puede llegar a actuar de forma individual, pero en la mayoría de los casos lo que se presenta como corrosión es el resultado de la combinación de varios de estos actuando sobre el metal. Para lograr combatir adecuadamente el problema de la corrosión, primeramente habrá que determinar cuáles son las causas de que la misma se este dando y cuáles son las zonas más afectadas, con este fin se han ideado, o aplicado, gran cantidad de métodos, entre los que se cuenta a la radiografía y/o gammagrafía industrial, la cual a dado excelentes resultados en la detección de este tipo de problemas. En este caso en la radiografía se buscaran zonas en las que su densidad sea mayor, ya que donde el ennegrecimiento de la película sea más grande, quiere decir que el material tiene menos espesor, y que por lo tanto lo ha atravesado mayor cantidad de radiación, y esto indica que el material en esta zona esta siendo afectado por la corrosión. Con este análisis se puede determinar la profundidad que ha alcanzado la

corrosión en el material, y esto se hace utilizando un densitometro (instrumento que mide el nivel de ennegrecimiento de una película) como parte del equipo de análisis de la radiografía. El análisis densitométrico de la película es un proceso en el que la densidad de la película expuesta es comparada con las densidades obtenidas de radiografiar una escala metálica, la cual aparece en la misma placa, ya que esta se coloca sobre la tubería antes de que la radiografía sea tomada.

2.3 Densidad de los materiales y su relación con la absorción de radiación

Al radiografiar sistemas de tubería que se encuentran en operación, como por ejemplo, oleoductos, gasoductos, etc., es muy importante el entender las razones por las cuales estos no se pueden inspeccionar de igual forma que una tubería que se encuentra vacía.

Cuando se radiografian sistemas de tubería que se encuentran en operación, que por lo general poseen diámetros menores o iguales a las 24", se hace necesario el atravesar 2 veces el espesor del acero de los tubos y el correspondiente espesor del fluido contenido en la tubería, el cual equivale al 100% del diámetro interno de la misma. Es por esta razón el que se hace necesario el estudiar como interactúa la radiación con los distintos materiales y cual es la intensidad de flujo de radiación necesaria para llevar a cabo este procedimiento.

Cuando la radiación atraviesa un material, la absorción depende del espesor del material, de su naturaleza y de la longitud de onda de la radiación según la ley de Lambert-Bauer.

Sea I_0 la intensidad del flujo incidente, I la del flujo pasante, a el espesor atravesado y α_L el coeficiente lineal de absorción del medio. Entonces, se tiene que:

$$\frac{I_0 - I}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0} = -\alpha_L \Delta a$$

$$\Delta I \rightarrow 0 \frac{dI}{I} = -\alpha_L da$$

la cual integrada, conduce a:

$$\log I = -\alpha_L a + c$$

Para evaluar “c” debe notarse que:

Si $a = 0$, $c = \log I_0$; así:

$$\log I = -\alpha_L a + \log I_0$$

o bien:

$$I = I_0 e^{-\alpha L}$$

Esta ecuación sólo considera la absorción en función del recorrido de la radiación en el medio absorbente, siendo, por tanto, variable para un mismo espesor con el estado físico del mismo. Es por tanto más útil el calcular un valor de α que, en vez de depender de la longitud recorrida por la radiación en el medio, lo haga de la cantidad

(masa) de materia atravesada. Esto se consigue dividiendo el coeficiente de absorción lineal por la densidad (ρ) del medio:

$$\alpha = \frac{\alpha_L}{\rho}$$

de donde, sustituyendo en la ecuación general de la absorción, se tiene que:

$$I = I_0 e^{-\alpha \rho x}$$

α expresa lo que absorbe una unidad de masa del material, independientemente de estado físico o químico. Es por esto que en radiología se emplea, preferentemente, α en tanto que en óptica tiene más interés α_L ; ya que la absorción de la luz sí es influida por aquellos factores, contrariamente a lo que, como acabamos de indicar, ocurre con los rayos X o gamma.

En realidad, α representa un coeficiente global, que puede descomponerse en tantos sumandos como mecanismos hay por los que la radiación es absorbida.

Las interacciones posibles de un fotón con la materia son:

- 1) Interacción básica con electrones atómicos.
- 2) Interacción con nucleones.
- 3) Interacción con los campos electromagnéticos que rodean las partículas.
- 4) Interacción con los campos mesónicos del núcleo.

Por otro lado, los mecanismos por los cuales estas interacciones pueden ocurrir son:

- a) Absorción.
- b) Difusión coherente.
- c) Difusión incoherente.

De la combinación de las interacciones con los mecanismos, se deducen diversos efectos, de los cuales los que presentan mayor interés son los siguientes:

(1-a) Efecto Thompson o efecto fotoeléctrico.

(1-c) Efecto Compton.

(4-a) Producción de pares.

(1-b) Efecto Rayleigh.

(2-b) Efecto fotoeléctrico nuclear.

En radiografía convencional, la absorción propiamente dicha ocurre a causa de los efectos fotoeléctricos y Compton y, en menor escala y para energías de más de 1.022 MeV, el de producción de pares.

Puede pues repartirse α en tres coeficientes parciales de absorción $\alpha = \alpha_f + \alpha_c + \alpha_p$ que corresponden, respectivamente, a las absorciones fotoeléctricas, Compton y de producción de pares.

El efecto Rayleigh no representa propiamente una absorción, sino una difusión, ya que no es causa de la desaparición de fotones, ni de cambios en su longitud de onda. Es por todo lo anterior por lo que nos concentraremos en los tres primeros efectos:

- **El efecto Thompson o efecto fotoeléctrico:**

Este efecto es conocido también como “conversión externa”, y la evaluación exacta de la absorción debida a este efecto resulta un tanto difícil. Por lo regular se ha estudiado en el rango comprendido entre los 0.35 y los 2 MeV. Por encima o por debajo de estos valores se hacen necesarias diversas simplificaciones e hipótesis adicionales. No obstante, la siguiente fórmula, obtenida experimentalmente, puede considerarse lo suficientemente exacta:

$$S_f = \frac{1}{E_\gamma^4} * Z^5$$

$$(E_\gamma = \text{Energía Foton } \gamma)$$

siendo S_f la sección eficaz para la absorción fotoeléctrica.

El fotón es absorbido completamente, emitiéndose a continuación un electrón cortical de energía $E = E_\gamma - b$, siendo E_γ la energía del fotón gamma y “b” la de ligadura del electrón a su capa. Como la cantidad de movimiento debe conservarse en el proceso, este solo puede ocurrir cuando está presente, por lo menos, una tercera partícula capaz de compartir la cantidad de movimiento con el fotón y el electrón. Según esto, el efecto fotoeléctrico es una interacción con todo el átomo y no puede tener lugar con los electrones libres.

Como el fotón debe ceder toda su energía al electrón, si dicha energía es superior a la necesaria para arrancarlo, no interacciona; lo cual se traduce en una brusca disminución del coeficiente de absorción del material para esa energía. Esto constituye un valor umbral o borde de absorción, existiendo tantos bordes como capas electrónicas. Sin embargo, el más importante, a efectos radiológicos, es el correspondiente a la capa “K”.

El reajuste electrónico, subsiguiente a la expulsión de un electrón cortical, provoca la emisión de rayos “X” característicos del elemento que no pueden ser absorbidos por conversión externa, ya que su energía es inferior a la correspondiente al borde de absorción. En ciertos problemas de radiografía, puede sacarse partido de estos fenómenos.

- **El efecto Compton:**

De todos los mecanismos por los que se produce la difusión y por consiguiente la absorción por degradación energética de los fotones, este es el más importante en el intervalo de las energías utilizadas en la radiología industrial.

En el efecto Compton, el fotón es desviado al interactuar con un electrón, libre o ligado, si bien, en este último caso, la energía de ligadura suele ser muy pequeña en comparación con la del fotón. Cuando la energía del fotón es comparable a la de ligadura del electrón, entonces el efecto Compton no es apreciable; así pues, puede considerarse libre, energéticamente hablando, al electrón que interactúa con el fotón según este mecanismo.

Compton demostró, que el fotón se comporta en la interacción como si se tratara de una pequeña esfera que choca con otra. Sin embargo, hay que tener presente que junto con el aspecto corpuscular del fotón, existe, según lo que ha estudiado la Mecánica Ondulatoria, su aspecto vibratorio. Esto hace que aunque el fotón se comporta como una esfera hasta el momento del choque, posteriormente se comporta de forma distinta. Así como la esfera al chocar se desviaría y perdería velocidad, de acuerdo con la cantidad de

movimiento comunicada al electrón, el fotón puede desviarse, pero no perder velocidad, puesto que la radiación electromagnética, como ya se menciono, se propaga siempre con una velocidad constante “C”.

Esto obliga al fotón, que comunica parte de su energía al electrón, a perderla de único modo posible para un fotón, esto es, alargando su longitud de onda. De acuerdo con la ecuación de Planck aplicada al fotón, antes y después del choque se tiene que:

$$\frac{E}{E'} = \frac{\lambda'}{\lambda}$$

siendo λ y λ' las longitudes de onda de E y E' las energías del fotón antes y después, respectivamente, de la interacción.

Si se expresa la energía del fotón difundido en función de la del incidente y del ángulo “ θ ” de difusión, se tiene que:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{M_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

en la cual, M_e es la masa del electrón en reposo.

Según la ecuación anterior, cuando el ángulo de dispersión es de 180° , la degradación del fotón es máxima.

Por otra parte, la energía del electrón, E_e , después de la colisión, puede deducirse aplicando el principio de conservación de la energía:

$$E_e = E - E'$$

En la realidad del trabajo radiológico, el efecto Compton se manifiesta como el resultado de múltiples interacciones individuales fotón-electrón. Los fotones difundidos son, por una parte, menos penetrantes, ya que su longitud de onda es mayor y, por otra, pueden sufrir nuevas interacciones Compton o Thompson, con la consiguiente degradación rápida y absorción definitiva por el material. El resultado es que sobre la película radiográfica, además de la radiación primaria formadora de la imagen, se superponen los fotones dispersos pasantes, los cuales afectan desfavorablemente a la calidad de la imagen radiográfica que se obtiene.

- **La producción de pares:**

Si bien este efecto tiene una plena importancia en el trabajo que se efectúa con rayos X a muy altas tensiones, en los que llega a ser predominante sobre cualquier otro, en los trabajos de radiología convencionales sólo tiene cierto interés a partir, exactamente, de los 1.022 MeV, ya que la sección eficaz del átomo, para la producción de pares, es nula por debajo de este valor.

En efecto, la mecánica ondulatoria enseña que un objeto cuántico, tal como el fotón, sólo puede ser descrito si se supone que es, a la vez, onda y partícula. Llamando A y B a estos estados, la existencia del fotón puede expresarse como:

$$\psi = \sqrt{C_A} \cdot \psi(A) + \sqrt{C_B} \cdot \psi(B)$$

en la que Ψ , es la función de onda de Schrödinger; C_A y C_B , las probabilidades respectivas de que, en cierto instante, el fotón se manifieste como cuanto de radiación o como partícula.

No es posible, con certeza, saber de cuál de estos dos modos, como partícula o como onda, va a manifestarse la radiación. Como en física no tiene sentido un tiempo nulo, ni siquiera un tiempo infinitamente breve, que son sólo abstracciones matemáticas, hay que admitir un intervalo de duración muy corta, pero finita, en el que coexistan ambos estados. El científico Heissenberg demostró que para fotones de energía equivalente a la masa del electrón, el tiempo de incertidumbre es del orden de 1×10^{-22} segundos.

Para cualquier fenómeno o interacción inferior a este tiempo, el fotón puede manifestarse como una pareja electrón-positrón. Precisamente es de ese orden el tiempo que tarda la luz en atravesar un átomo, lo que permite suponer que el fotón en ese intervalo puede interaccionar con el átomo en forma de pareja virtual. En tal situación, la presencia del campo eléctrico nuclear actúa como catalizador, desdoblado al fotón en el electrón negativo, que es atraído y el positivo, que es repelido hasta una distancia que le permita aparecer en el universo. Esto es:

$$\gamma = e^+ + e^-$$

La energía total de los dos electrones viene dada por:

$$E_\gamma - 2M_e c^2 = E_e^+ + E_e^-$$

La energía puede distribuirse de todos los modos posibles entre los dos electrones, aunque, estadísticamente, es menor para los positrones repelidos por el núcleo, que para los electrones que son atraídos por éste.

Una vez separados, el electrón “corriente” creado queda atrapado en el universo, en tanto que el positrón, que pertenece al antiuniverso, tiene una existencia muy precaria, ya que no tarda en caer en un “agujero”, que es como los científicos denominan, comúnmente, para estos casos, para él, cualquier electrón negativo, sumergiéndose ambos en la nada. Este proceso inverso a la materialización antes considerada, no ocurre instantáneamente, sino que, durante 1×10^{-7} segundos, se forma una pareja o “positronio” en la que ambos coexisten. Finalmente, la aniquilación material origina dos rayos gamma, de energía $M_e c^2 = 0.511 MeV$, dirigidos en sentidos opuestos.

El resultado de este proceso es una degradación de la energía de los fotones que sufren esta interacción, si bien el número de los fotones creados duplica el número de los primitivos. Además, los nuevos fotones son difusos, esto es, tienen direcciones diferentes de la primitiva del haz.

De todo lo anterior se puede sacar que si bien la difusión de la radiación y su absorción por la materia son hechos de gran importancia en la radiografía, resulta difícil su evaluación teórica, por lo que a continuación se presentan algunas conclusiones prácticas, las cuales serán útiles a la hora de realizar los ensayos radiográficos y ayudaran a entender mejor el efecto de la cantidad de radiación que necesita una película radiográfica para poder dar información adecuada de una junta o elemento de tubería que ya se encuentre en operación.

- a) Para una misma fuente y un mismo espesor de material, la absorción crece rápidamente, aproximadamente, con la cuarta potencia del número atómico del material.
- b) Para un mismo material y espesor constante, la absorción varía, aproximadamente, en proporción inversa al cubo de la longitud de onda de la radiación.
- c) Como resultado de las interacciones de la radiación con la materia, se produce radiación difusa que, superponiéndose al haz primitivo, disminuye la calidad de la imagen, pudiendo llegar a emborronarla completamente.
- d) Aunque no puede eliminarse totalmente la difusión, puede atenuarse su efecto mediante la filtración a través de hojas metálicas adecuadas (Capítulo 1, sección 1.5, inciso b). El efecto beneficioso de la filtración se debe a que, como hemos visto, la mayor parte de los fotones difundidos tienen longitudes de onda mayores que las de los primitivos, por lo que resultan mas fácilmente absorbidos.
- e) La relación entre la radiación total que pasa a través del material (formada por la primaria no absorbida, I_D , más la difusa I_d) y la primaria no absorbida es:

$$\frac{I_D + I_d}{I_D} = 1 + \frac{I_d}{I_D}$$

esta relación recibe el nombre de factor “build up” que tiene importancia especial en el cálculo de blindajes y protecciones contra la radiación.

- f) Deberá cuidarse de los efectos de difusión inducidos por los objetos próximos al radiografiado (suelos, paredes, etc). Este efecto es siempre nocivo y debe ser evitado cubriendo con plomo los puntos convenientes y colimando el haz.

Aún existe otro tipo de difusión de gran importancia que no es debido a la interacción de la radiación con la materia del objeto, sino con la emulsión fotográfica. Esto ocurre cuando, en algún punto de la película, incide un elevado número de fotones de altas energías. Ello provoca una liberación de fotoelectrones cuya dispersión en el seno de la emulsión produce, después del proceso de revelado, un intenso ennegrecimiento en zonas a las que no ha llegado la radiación directa. El resultado es una pérdida de la definición y una falta de calidad de la imagen en los bordes del objeto.

Para atenuar estos efectos, es recomendable filtrar la radiación y “enmascarar”, o sea, tapar aquellos puntos en que la radiación incide directamente sobre la película. Para este fin pueden utilizarse hojas de plomo, perdigones o alguna pasta opaca a base de ceras que contengan algún compuesto de plomo o bario.

Operando con rayos “X”, el efecto de la difusión en la película se puede observar a partir de los 90 KeV, siendo, a partir de estas tensiones, recomendable el filtrado de la radiación y el enmascarado de la muestra que se radiografía. Por encima de los 200 KeV el efecto es tan obvio que las radiografías llegan inutilizarse completamente si no se toman las precauciones que se han mencionado. Para tensiones superiores al millón de voltios el efecto decrece, obteniéndose excelentes imágenes sin necesidad de enmascarar las muestras. En gammagrafía la difusión, aunque perceptible, puede, en general, tolerarse.

Luego de haber comentado cuales son los principios físicos que determinan el nivel de absorción de radiación de una sustancia ahora hablaremos de lo que es la densidad en los materiales y sustancias, lo cual nos será útil luego para poder determinar que relación tiene ésta con la cantidad de radiación que es absorbida por estos.

Primero que todo debemos empezar por aclarar algunos conceptos como lo son: Densidad y Densidad relativa de un material o sustancia.

La densidad (ρ) es una propiedad de las sustancias la cual se define como la masa por unidad de volumen:

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

La densidad relativa de una sustancia a su vez está definida como un numero adimensional que viene dado por la relación del peso o la densidad de una sustancia al peso o densidad de un volumen igual de una sustancia que se toma como referencia. Para determinar las densidades relativas de sólidos y líquidos se utiliza como fluido de referencia al agua, mientras que para los gases se utiliza al aire.

$$DR = \frac{\text{PesoSust.}}{\text{PesoIgualAgua}}$$

$$DR = \frac{\text{DensidadSust.}}{\text{DensidadAgua}}$$

Ya que se ha definido que es la densidad y la densidad relativa de una sustancia, se pueden presentar, en la siguiente tabla, las densidades de algunas de las sustancias que más comúnmente, en la industria, se transportaran por medio de tuberías, además se incluye la densidad del acero, ya que la mayoría de redes de tubería se fabrican de este material, y la radiación también interactúa con él cuando se esta realizando un análisis radiográfico. Estas densidades nos servirán para calcular el nivel de absorción de radiación:

Tabla II. Densidades de materiales involucrados en el ensayo

Sustancia	Densidad Relativa	Densidad (Kg/m³)
Aceite Lubricante SAE 30	0.890	890
Fuel Oil Medio	0.852	852
Fuel Oil Pesado	0.906	906
Agua Ácida	0.994	994
Petróleo	0.8894	889.4
Acero al Carbón (ASTM A-36)	7.86	7860

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Alcance

Luego de haber abordado en los capítulos anteriores lo que son los principios físicos de la radiografía y su relación con la materia, ahora toca entrar de lleno a lo que es el fin de este estudio, o sea, la creación de las tablas y/o graficas que permitan conocer los factores de corrección para el tiempo de exposición de una película en el caso en el que se estén radiografiando tuberías llenas de algún producto.

Debido a que la cantidad y clase de productos que se mueven por medio de tuberías en la industria es muy amplio, para la realización de este estudio se decidió el enfocarnos principalmente en aquellos fluidos que son transportados por medio de tuberías en lo que es la industria petrolera y de hidrocarburos, lo cual también ayudo a delimitar los diámetros de tubería con los que se trabajará, ya que se utilizaran únicamente los que en estas industrias son más frecuentes.

Por todo lo anteriormente mencionado, el experimento quedo delimitado de la siguiente manera:

- **Elementos radiografiados:** Tubería de 1.5, 3, 6, 8, 10 y 12 pulgadas de diámetro, todas de acero al carbón (API 5L S2).
- **Fluidos contenidos dentro de la tubería durante el experimento:** Agua, diesel (fuel oil medio), aceite (SAE 30) y Petróleo.

3.2 Normas de referencia para determinar la calidad de una radiografía

Para poder definir si la calidad de un trabajo radiográfico es la adecuada hay necesidad de referirse a una norma que nos brinde los parámetros necesarios para poder calificar como aceptable o inaceptable una radiografía. La norma que se ocupa de este punto es la norma ASME (para recipientes a presión) que en su sección numero 5, trata acerca de todos los ensayos no destructivos que se pueden llevar a cabo en trabajos de soldadura y de cuales son los pasos que se deben seguir en cada uno de ellos para ejecutarlos de la forma correcta.

Para el caso de la radiografía, esta sección se ocupa de describir desde que parámetros son los que se deben evaluar para escoger una película radiográfica de forma correcta, pasando por una descripción de las principales técnicas radiográficas que se utilizan, dependiendo de que es lo que se quiere radiografiar, hasta describir los parámetros que se deben de tener en cuenta al momento de evaluar una imagen radiográfica.

Para la evaluación de la calidad de una imagen radiográfica, la sección 5 del código ASME describe que la misma debe estar libre de manchas producidas química o mecánicamente o de cualquier otra marca que pueda llegar a enmascarar un defecto o a confundirse con uno dentro del área de interés de la radiografía. Luego de estos parámetros plantea que las radiografías deben de tener una densidad que debe estar alrededor de 2. También establece que siempre que se tome una radiografía, sobre la parte a radiografiar se deberá de colocar un indicador de control de imagen (ICI, también conocido como penetramento), el cual podrá ser de cualquiera de las clases que se describen en el capítulo 2.

La finalidad del uso del penetrámetro es el de determinar cual es la sensibilidad alcanzada en la radiografía, o en otras palabras, cual es la dimensión mínima de incremento o decremento en el espesor del material, que será perceptible en la radiografía. De esta forma este valor mínimo representará un cierto porcentaje del espesor total del objeto, o sea, una sensibilidad de detección. Si “E” es el espesor total de la pieza y “e” el del indicador de control de imagen, en las condiciones límite, la calidad de la imagen será:

$$\frac{e}{E} \times 100\%$$

A este porcentaje se le llama “calidad ICI” o “calidad de penetrámetro” de la radiografía, siendo claro que cuanto menor sea este valor, mejor será la calidad de la imagen.

3.3 Procedimiento

3.3.1 Determinación del tiempo de exposición en tubería vacía

Para la determinación del tiempo de exposición en un tubo que se encuentra sin producto son 4 los factores que se deben de tomar en cuenta:

- La densidad que se desea obtener en la película.
- La actividad de la fuente (esto únicamente en el caso de la gammagrafía).
- El espesor de material que la radiación tendrá que atravesar.
- La distancia a la que quedarán separadas la fuente y la película.

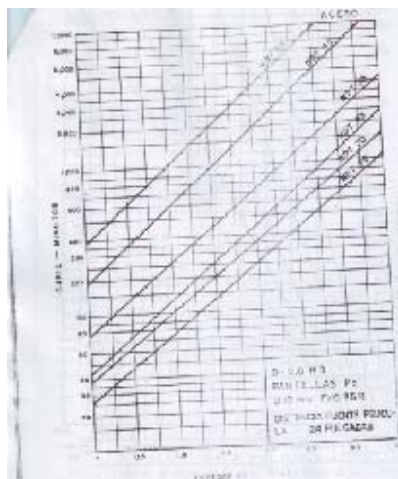
Existen varias formas para relacionar los factores anteriores y obtener el tiempo de exposición. El primero de ellos sería utilizando lo que se conocen como graficas de exposición, las cuales se trazan tomando en cuenta las siguientes condiciones:

- a) Tipo de película.
- b) Material que se radiografiara.
- c) Pantallas que se utilizaran.
- d) Tipo de radiación (rayos "X" o gamma).
- e) Distancia de la fuente (o punto focal) a la película.

Como se puede deducir de los incisos anteriores existen diferentes graficas de exposición dependiendo de cómo cambien las variables que las componen, o si se esta trabajando con rayos X o con rayos gamma. En este caso nos ocuparemos únicamente de cómo se manejan las graficas para rayos gamma.

Las graficas para rayos gamma están compuestas de la siguiente forma:

Figura 5. Tabla para exposición con rayos gamma



En la escala horizontal de estas gráficas está trazado el espesor total que tendrá que atravesar la radiación.

En la escala vertical está marcada la exposición necesaria en curies-minuto (Ci-min). Las líneas inclinadas corresponden a cada tipo de película (velocidades), se considera una distancia fuente-película constante, lo cual hay que corregir, si hay variaciones, como sucede en los distintos diámetros de tubería. Se considera también una densidad fija, usualmente de 2.

Para calcular el tiempo de exposición con estas graficas se procede de la siguiente forma:

- 1) Se localiza en el eje horizontal el espesor total que se atravesará con la radiación.
- 2) Se traza una línea vertical hasta que cruce con el tipo de película que se está utilizando.
- 3) Se sigue una línea horizontal hasta llegar al eje vertical.
- 4) Ahí se lee la exposición necesaria en curies-minuto (Ci-min).
- 5) Se hace la corrección por distancia y la corrección por densidad.

Para el último inciso se utilizarán una serie de tablas que regularmente acompañan a las gráficas. Primeramente habrá que buscar en las tablas de distancia fuente-película el factor por el que hay que multiplicar la exposición, el cual dependerá del diámetro de tubería con el que se está trabajando y la técnica que se está utilizando. Luego se procede a buscar en una tabla de densidades el factor por el que habrá que multiplicar el producto de la exposición por la distancia, si se desea una densidad en la película diferente a 2, ya que todo el procedimiento anteriormente mencionado está hecho para obtener placas con densidad 2.

El otro método que existe para relacionar todos los factores que determinan el tiempo de exposición, es mediante el uso de una regla de cálculo, la cual viene diseñada para un tipo de material radioactivo en particular y tiene la gran ventaja de que arroja inmediatamente el tiempo de exposición, sin que haya necesidad de ir a tablas para buscar factores de corrección para el mismo. Esta regla se utiliza de la siguiente manera:

- 1) Primeramente se relaciona la densidad que se quiere obtener en la película con los días que han transcurrido desde que inició la vida de la fuente.
- 2) Seguidamente se relaciona la actividad que la fuente posee (en la fecha en la que se está realizando el cálculo) con el espesor de acero que se va a atravesar.
- 3) Luego se hace coincidir la marca del visor que posee la regla con la distancia fuente-película que habrá en la exposición y luego de haber hecho esto, esta misma línea del visor se sigue hasta la siguiente escala que es la que nos indica el tiempo de exposición (en segundos, minutos u horas) necesario para las condiciones dadas.

3.3.2 Exposición en tubería sin producto

Para realizar el experimento que nos servirá de base para la construcción, posteriormente, de las tablas y/o gráficas que nos darán los factores de corrección para las tuberías llenas de producto, primeramente hubo la necesidad de calcular el tiempo de exposición que se necesita para radiografiar estas tuberías vacías y verificar que el mismo nos estuviera produciendo placas radiográficas con una densidad que se encuentre entre 1.8 y 2.5.

Para el cálculo de estos tiempos de exposición se utilizó la regla de cálculo que se menciona en la sección anterior. Luego de calculados los tiempos de exposición, de esta forma, se procedió a tomar una serie de placas, las cuales, luego de reveladas, se evaluaron con un densitometro electrónico, el cual nos indicó si el ennegrecimiento de las placas estaba dentro del intervalo de densidades que se puede considerar como aceptable.

Los tiempos de exposición que primeramente se obtuvieron para la tubería vacía se muestran en la siguiente tabla:

Tabla III. Tiempos de exposición para tubería vacía

Diámetro de tubería	Actividad de la fuente radioactiva	Espesor del material a atravesar	Distancia fuente-película	Tiempo de exposición
1.5"	91 Ci	1/4"	19 1/4"	1 min 12 seg
3"	87 Ci	1/4"	19 1/4"	1 min 20 seg
6"	50 Ci	5/8"	6 5/8"	12 seg
8"	85 Ci	5/8"	8 5/8"	23 seg
10"	91 Ci	1/2"	10 3/4"	28 seg
12"	39 Ci	1/2"	12 1/2"	1 min 8 seg

Hay que aclarar que los tiempos de exposición en tuberías de diámetros menores a las 3.5" son mayores a los otros tiempos de exposición debido a la técnica que se utiliza (técnica de doble pared doble imagen), ya que en esta la distancia fuente película es mayor.

3.3.3 Resultados de exposición tubería vacía

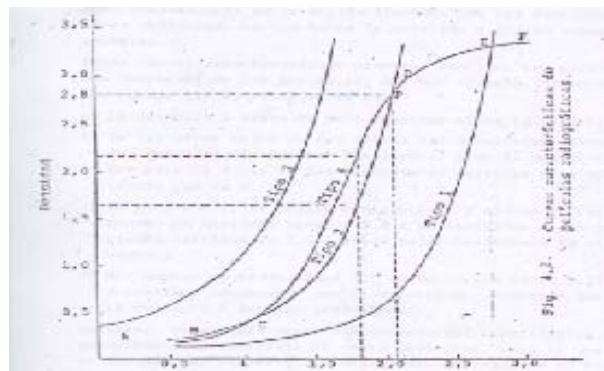
Tabla IV. Resultados de la exposición en tubería vacía

Díámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenida
1.5"	2.83	5 alambres	5.2%
3"	2.54	5 alambres	5.2%
6"	2.5	5 alambres	2.08%
8"	2.36	5 alambres	2.08%
10"	2.47	5 alambres	2.6%
12"	2.35	5 alambres	2.6%

Como se puede observar en los resultados que se obtuvieron de las exposiciones realizadas, hubo algunas en las cuales la densidad que se obtuvo fue superior al máximo aceptable, por lo que hubo la necesidad de repetir las, con el fin de obtener un valor de ennegrecimiento que estuviera dentro del intervalo.

Para hacer la corrección en el tiempo de exposición se utilizó la que se conoce como carta sensitométrica (es una carta de densidad contra cantidad de radiación por unidad de tiempo), la cual es específica para el tipo de película que se está utilizando.

Figura 6. Carta sensitométrica con curvas para varios tipos de película



Además, para relacionar todos los factores que están involucrados también se utilizaron las siguientes formulas:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 10^{(\text{exposicionrelativa2} - \text{exposicionrelativa1})}$$

donde

$$\varepsilon = \text{actividad de la fuente} * \text{tiempo de exposición}$$

Lo anterior se aplico en los casos de la tuberías de 1.5” y de 3” de diámetro, utilizándose el siguiente procedimiento:

- Tubería de 1.5” de diámetro:

Tiempo de exposición 1: 1.2 minutos

Densidad obtenida en exposición 1: 2.83

De la carta sencitometrica, para la densidad de 2.83, se obtuvieron los siguientes datos:

Exposición relativa 1: 1.4

Exposición 1: $\varepsilon_1 = T_1 * Actividadfuente = 1.2 * 91 = 109.2Ci * min$

Para una densidad de 2, que es lo que se espera en la segunda exposición, los datos obtenidos de la carta sencitometrica son:

Exposición relativa 2: 1

Utilizando la formula que se menciono, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 10^{\exp rel2 - \exp rel1}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 * 10^{\exp rel2 - \exp rel1}$$

$$\varepsilon_2 = 109.2 * 10^{1-1.4} = 43.47Ci \cdot min$$

Conociendo la exposición 2, se procedió a obtener el tiempo 2, de la siguiente forma:

$$\varepsilon_2 = T_2 * actividadfuente$$

$$T_2 = \frac{\varepsilon_2}{actividadfuente}$$

$$T_2 = \frac{43.47}{91} = 0.477 \text{ min} = 30 \text{ seg}$$

- Tubería de 3" de diámetro:

Tiempo de exposición 1: 1.3 minutos

Densidad obtenida en exposición 1: 2.54

De la carta sencitometrica, para la densidad de 2.54, se obtuvieron los siguientes datos:

Exposición relativa 1: 1.28

Exposición 1: $\varepsilon_1 = T_1 * Actividadfuente = 1.3 * 87 = 113.1 \text{ Ci} * \text{min}$

Para una densidad de 2, que es lo que se espera en la segunda exposición, los datos obtenidos de la carta sencitometrica son:

Exposición relativa 2: 0.98

Utilizando la formula que se menciona, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 10^{\text{exp rel2} - \text{exp rel1}}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 * 10^{\text{exp rel2} - \text{exp rel1}}$$

$$\varepsilon_2 = 113.1 * 10^{0.98 - 1.28} = 56.6842 \text{ Ci} \cdot \text{min}$$

Conociendo la exposición 2, se procedió a obtener el tiempo 2, de la siguiente forma:

$$\varepsilon_2 = T_2 * \text{actividadfuente}$$

$$T_2 = \frac{\varepsilon_2}{\text{actividadfuente}}$$

$$T_2 = \frac{56.6842}{87} = 0.6515 \text{ min} = 39.09 \text{ seg}$$

Teniendo los nuevos tiempos de exposición, se procedió a tomar nuevamente las placas radiográficas, habiéndose obtenido los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla V. Resultados con tiempos de exposición corregidos

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
1.5"	2.05	5	5.2%
3"	2.3	5	5.2%

Habiendo obtenido con lo anterior los tiempos exactos para obtener placas radiográficas con densidad 2 en tubería que se encuentra sin producto, se procedió, en base a esto, a llevar a cabo las pruebas con el tubo lleno.

3.3.4 Cálculos en tubería con producto

Para iniciar con las pruebas en tubería con producto lo primero que se hizo fue tomar una serie de placas con la tubería llena de los diferentes fluidos, pero con el tiempo de exposición usado cuando la tubería está vacía. Los resultados de estas exposiciones se muestran en las siguientes tablas:

- Agua

Tabla VI. Resultados obtenidos con tubería llena de agua

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
1.5"	2.05	5	5.2%
3"	1.8	5	5.2%
8"	0.87	0	0%
10"	0.84	0	0%

- Fuel oil medio (Diesel):

Tabla VII. Resultados obtenidos con tubería llena de fuel oil medio (diesel)

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
1.5"	2.01	4	6.4%
3"	1.89	4	6.4%
8"	1.09	1	5.12%
10"	1.15	0	0%

- Aceite (SAE 30):

Tabla VIII. Resultados obtenidos con tubería llena de aceite (SAE 30)

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
1.5"	2.04	5	5.2%
3"	1.83	4	6.4%
8"	1.17	1	5.12%
10"	0.74	0	0%

- Petróleo:

Tabla IX. Resultados obtenidos con tubería llena de petróleo

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
6"	1.44	3	4%
12"	0.5	0	0%

3.3.5 Corrección de las exposiciones en tubería con producto

Debido a que como se puede observar en la sección anterior, la mayoría de exposiciones presentan porcentajes de sensibilidad muy reducidos, además que las densidades obtenidas están muy lejos de los valores aceptables, se procedió al recalcu de los tiempos de exposición, utilizando para esta tarea la ayuda, nuevamente, de la carta sencitometrica y sus respectivas fórmulas.

El procedimiento que se siguió para el recalcu de los tiempos de exposición fue el mismo que se uso cuando se recalcularon los tiempos para tubería sin producto, por lo que en esta sección no ahondaremos en detalles acerca de cómo se llevo a cabo el cálculo del nuevo tiempo de exposición, sino que bastara decir que luego de halladas, en la carta sencitometrica, tanto la densidad obtenida como la que se desea obtener (que es de 2), así como sus respectivas exposiciones relativas, se procedió a sustituir estos valores en la formula del antilogaritmo de las exposiciones relativas, con lo que se obtuvo el valor de la segunda exposición que se debería de efectuar y ya conociendo este valor se pudo calcular el tiempo necesario para la segunda exposición.

Luego de haber realizado lo que se describe en el párrafo anterior, los resultados que se obtuvieron, para los tiempos de exposición corregidos fueron:

- Agua:

Tabla X. Exposiciones corregidas para tubería llena de agua

Diámetro de tubería	Actividad de la fuente radioactiva	Espesor del material a atravesar	Distancia fuente-película	Tiempo de exposición corregido
8"	85 Ci	5/8"	8 5/8"	1 min 21 seg
10"	87 Ci	1/2"	10 1/2"	1 min 44 seg

- Fuel oil medio (Diesel):

Tabla XI. Exposiciones corregidas para tubería llena de fuel oil medio

Diámetro de tubería	Actividad de la fuente radioactiva	Espesor del material a atravesar	Distancia fuente-película	Tiempo de exposición corregido
8"	85 Ci	5/8"	8 5/8"	1 min 4 seg
10"	87 Ci	1/2"	10 1/2"	1 min 10 seg

- Aceite SAE 30:

Tabla XII. Exposiciones corregidas para tubería llena de Aceite

Diámetro de tubería	Actividad de la fuente radioactiva	Espesor del material a atravesar	Distancia fuente-película	Tiempo de exposición corregido
8"	85 Ci	5/8"	8 5/8"	56.45 seg
10"	87 Ci	1/2"	10 1/2"	1 min 56 seg

- Petróleo:

Tabla XIII. Exposiciones corregidas para tubería llena de Petróleo

Diámetro de tubería	Actividad de la fuente radioactiva	Espesor del material a atravesar	Distancia fuente-película	Tiempo de exposición corregido
6"	50	5/8"	6 5/8"	21.33 seg
12"	39 Ci	1/2"	12 1/2"	6 min 22 seg

3.3.6 Resultados de las exposiciones en tubería con producto con los tiempos de exposición corregidos

Luego de recalculados los tiempos de exposición, se volvió a radiografiar las mismas muestras de tubería, con los mismos productos que la vez anterior, pero con los nuevos tiempos que se obtuvieron, siendo los resultados de las radiografías los siguientes:

- Agua

Tabla XIV. Resultados con exposiciones corregidas para tubería llena de Agua

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
8"	2.05	4	5.2%
10"	1.89	4	5.2%

- Fuel oil medio (Diesel):

Tabla XV. Resultados exposiciones corregidas para tubería llena de fuel oil medio

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
8"	2.03	3	3.2%
10"	2.06	4	3.2%

- Aceite (SAE 30):

Tabla XVI. Resultados con exposiciones corregidas para tubería llena de Aceite

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
8"	2.06	4	2.5%
10"	2.04	4	3.2%

- Petróleo:

Tabla XVII. Resultados con exposiciones corregidas para tubería llena de petróleo

Diámetro de tubería	Densidad obtenida	Indicador de control de imagen	Porcentaje de sensibilidad obtenido
6"	2.2	5	2.08%
12"	1.95	4	3.2%

3.3.7 Construcción de tablas y graficas para factores de corrección del tiempo de exposición

Luego de que todo este trabajo fue realizado, y contando ya con los datos que se obtuvieron de los ensayos, se pudo proceder a determinar los factores de corrección que habrá que aplicar a los tiempos de exposición dependiendo del diámetro de la tubería y la capacidad de absorción de radiación que posea el producto que se encuentra dentro. Lo anterior se logro aplicando en cada caso la siguiente ecuación:

$$X = \frac{T_2}{T_1}$$

donde: “X” es el factor de corrección del tiempo de exposición

“T₁” y “T₂” son los tiempos de exposición para tubería vacía y tubería con producto respectivamente.

A continuación se presenta una tabla en la que se muestran los factores de corrección que se han obtenido dependiendo del diámetro de tubería y el producto que contenía, así como las graficas que a partir de estos datos se pudieron construir para poder calcular para un producto dado el factor de corrección para cualquier diámetro de tubería con el que se este trabajando, siempre y cuando se conozca el tiempo de exposición para este tubo vacío.

Tabla XVIII. Factores de corrección para tubería utilizada en el ensayo

Fluido	Densidad (kg/m³)	Diámetro de Tubería en In	Diámetro de Tubería en m	Volumen Tubería m³	Factor de corrección entre Tubería Llena y Vacía
Petróleo	889.4	6	0.15	0.914634146	1.75
		12	0.30	3.658536585	5.62
Aceite Lubricante SAE 30	890	1.5	0.04	0.057164634	1
		3	0.08	0.228658537	1
		8	0.20	1.62601626	2.45
		10	0.25	2.540650407	4.21
Fuel Oil Medio	852	1.5	0.04	0.057164634	1
		3	0.08	0.228658537	1
		8	0.20	1.62601626	2.81
		10	0.25	2.540650407	2.50
Agua	994	1.5	0.04	0.057164634	1
		3	0.08	0.228658537	1
		8	0.20	1.62601626	3.55
		10	0.25	2.540650407	3.70

Figura 7. Factor de corrección para tubería que contiene petróleo

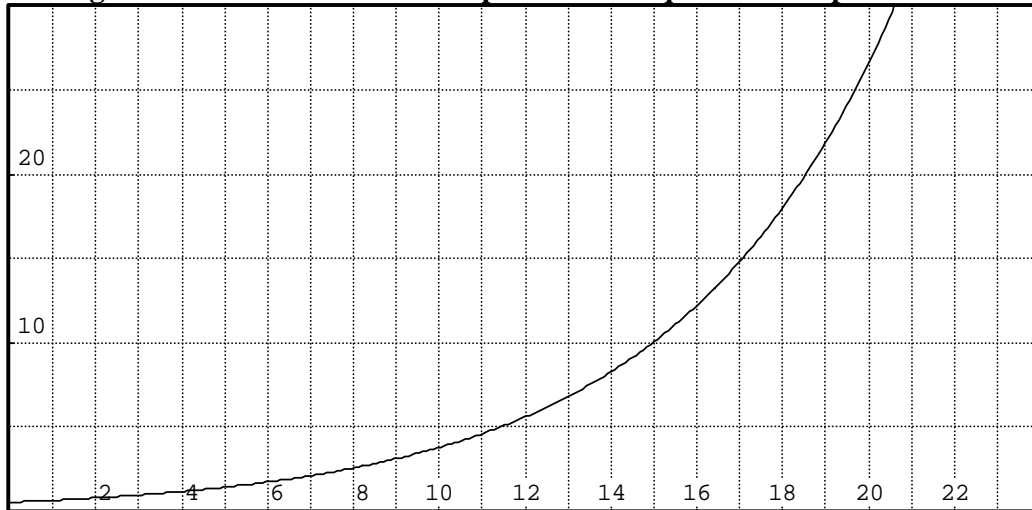


Gráfico donde X= diámetro de tubería y Y= factor de corrección

Figura 8. Factor de corrección para tubería que contiene aceite lubricante

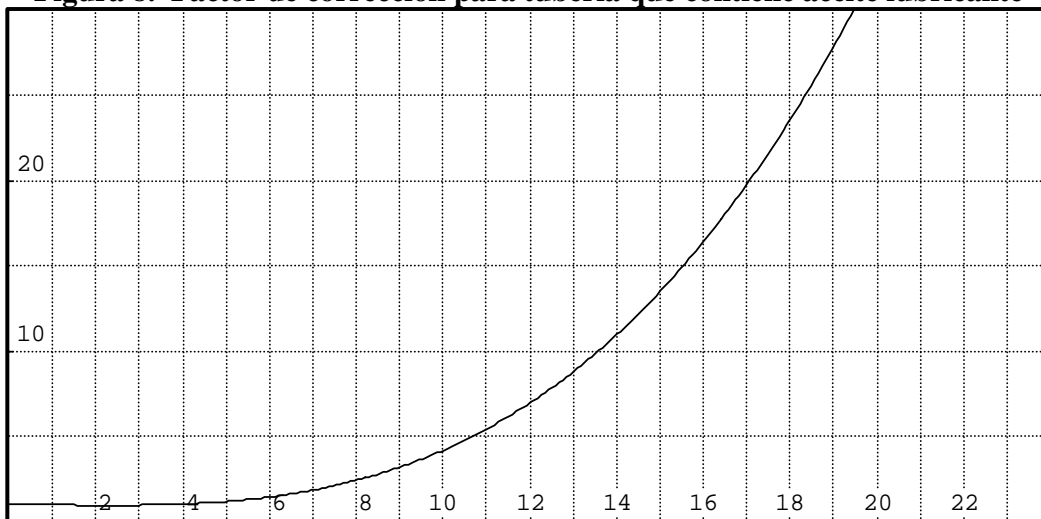


Gráfico donde X= diámetro de tubería y Y= factor de corrección

Figura 9. Factor de corrección para tubería que contiene fuel oil medio

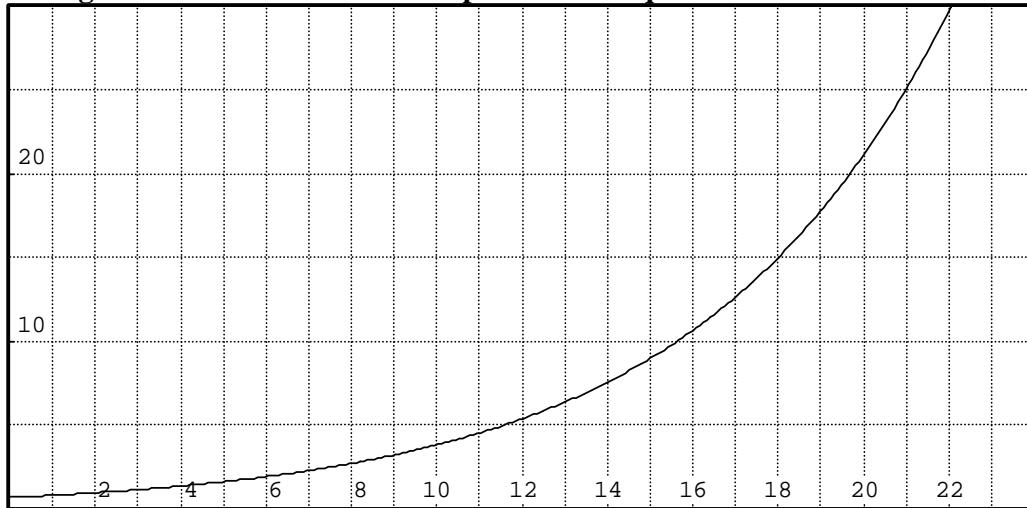


Gráfico donde X= diámetro de tubería y Y= factor de corrección

Figura 10. Factor de corrección para tubería que contiene agua

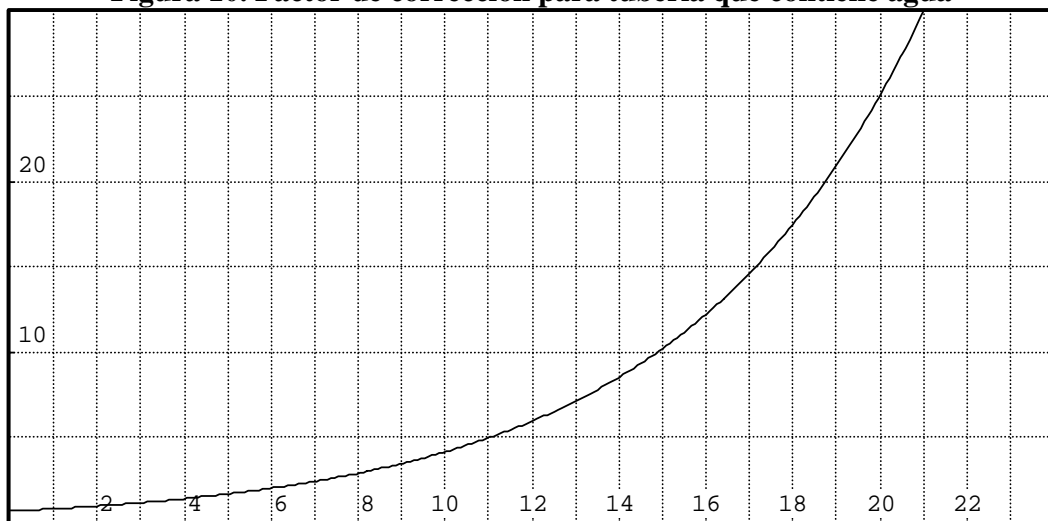


Gráfico donde X= diámetro de tubería y Y= factor de corrección

3.4 Análisis de resultados

3.4.1 Comparación de densidades obtenidas

- Tubería que se lleno con agua:

Tabla XIX. Comparación de densidades obtenidas con tubería vacía y llena de agua

Diámetro de la tubería en pulgadas	Densidad de la película tomada con la tubería vacía	Densidad de la película tomada con la tubería llena
1.5	2.05	2.05
3	2.3	1.8
8	2.36	2.05
10	2.47	1.89

- Tubería que se lleno con fuel oil medio (diesel):

Tabla XX. Comparación densidades obtenidas con tubería vacía y llena de fuel oil

Diámetro de la tubería en pulgadas	Densidad de la película tomada con la tubería vacía	Densidad de la película tomada con la tubería llena
1.5	2.05	2.01
3	2.3	1.89
8	2.36	2.03
10	2.47	2.06

- Tubería que se lleno con aceite lubricante (SAE 30):

Tabla XXI. Comparación densidades obtenidas con tubería vacía y llena de aceite

Diámetro de la tubería en pulgadas	Densidad de la película tomada con la tubería vacía	Densidad de la película tomada con la tubería llena
1.5	2.05	2.04
3	2.3	1.83
8	2.36	2.06
10	2.47	2.04

- Tubería que se lleno con petróleo:

Tabla XXII. Comparación densidades obtenidas tubería vacía y llena de petróleo

Diámetro de la tubería en pulgadas	Densidad de la película tomada con la tubería vacía	Densidad de la película tomada con la tubería llena
6	2.5	2.2
12	2.35	1.95

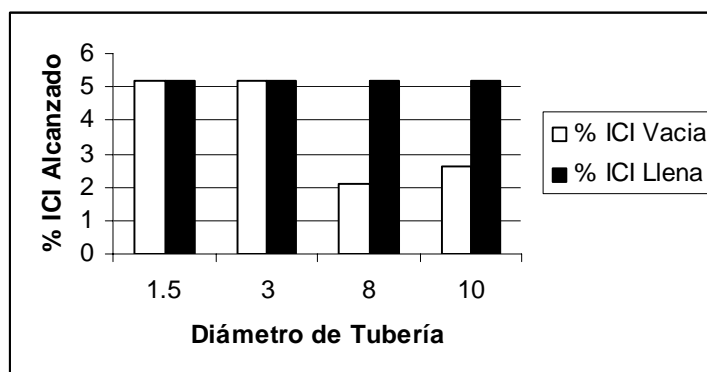
3.4.2 Comparación de sensibilización de la película por medio de los indicadores de control de imagen (ICI)

- Tubería que se lleno con agua:

Tabla XXIII. Diferencia de sensibilidad entre tubería vacía y llena de agua

Diámetro de la tubería en pulgadas	Porcentaje de sensibilidad alcanzada en la exposición con tubería vacía	Porcentaje de sensibilidad alcanzada en la exposición con la tubería llena	Diferencia
1.5	5.2%	5.2%	0%
3	5.2%	5.2%	0%
8	2.08%	5.2%	3.12%
10	2.6%	5.2%	3.12%

Figura 11. Diferencia de sensibilidades entre tubería vacía y llena de agua

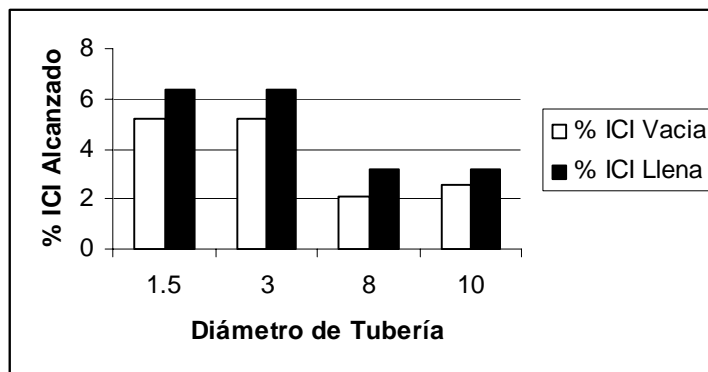


- Tubería que se lleno con fuel oil medio (diesel):

Tabla XXIV. Diferencia de sensibilidad entre tubería vacía y llena de fuel oil

Diámetro de la tubería en pulgadas	Porcentaje de sensibilidad alcanzada en la exposición con tubería vacía	Porcentaje de sensibilidad alcanzada en la exposición con la tubería llena	Diferencia
1.5	5.2%	6.4%	1.2%
3	5.2%	6.4%	1.2%
8	2.08%	3.2%	1.12%
10	2.6%	3.2%	0.6%

Figura 12. Diferencia de sensibilidades entre tubería vacía y llena de fuel oil

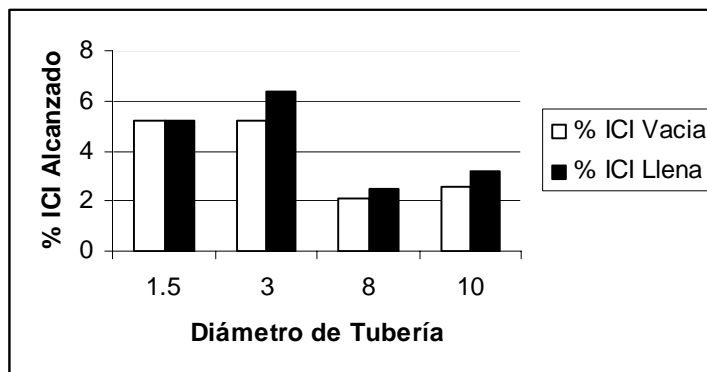


- Tubería que se lleno con aceite lubricante (SAE 30):

Tabla XXV. Diferencia de sensibilidad entre tubería vacía y llena de aceite

Diámetro de la tubería en pulgadas	Porcentaje de sensibilidad alcanzada en la exposición con tubería vacía	Porcentaje de sensibilidad alcanzada en la exposición con la tubería llena	Diferencia
1.5	5.2%	5.2%	0%
3	5.2%	6.4%	1.2%
8	2.08%	2.5%	0.42%
10	2.6%	3.2%	0.6%

Figura 13. Diferencia de sensibilidades entre tubería vacía y llena de aceite

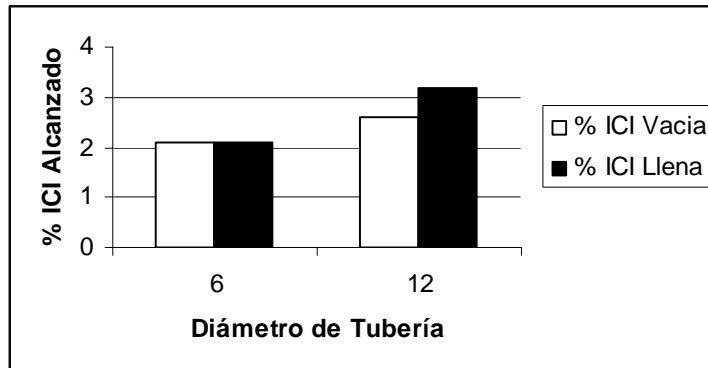


- Tubería que se lleno con petróleo:

Tabla XXVI. Diferencia de sensibilidad entre tubería vacía y llena de petróleo

Diámetro de la tubería en pulgadas	Porcentaje de sensibilidad alcanzada en la exposición con tubería vacía	Porcentaje de sensibilidad alcanzada en la exposición con la tubería llena	Diferencia
6	2.08%	2.08%	0%
12	2.6%	3.2%	0.6%

Figura 14. Diferencia de sensibilidades entre tubería vacía y llena de petróleo



3.5 Conclusiones sobre el ensayo

1. La sensibilidad que se mide (con la ayuda del ICI) en las radiografías tomadas con la tubería llena es menor que la que se alcanza con la tubería vacía (como se puede apreciar en las graficas), lo cual es un factor negativo, ya que hay defectología muy pequeña que al radiografiar con tubería llena no se distingue en las placas radiográficas.
2. La sensibilidad disminuye según aumenta el diámetro de la tubería, ya que para tuberías pequeñas la sensibilidad es casi la misma con producto que sin este.
3. El espesor del material base afecta, al momento de construir las graficas, ya que, especialmente para diámetros grandes y espesores de pared elevados, el espesor del material base provoca que se de un corrimiento en la grafica a la hora de construirla.
4. Para tubería de diámetros pequeños (del orden de 1" a 3") el volumen de fluido que puedan contener prácticamente no afecta a las exposiciones, ya que se con el mismo tiempo de exposición, para tuberías llenas y vacías, se consiguen densidades similares.
5. Con forme el diámetro de la tubería aumenta, y por consiguiente el volumen de fluido que contiene, el factor de corrección para el tiempo de exposición crece de forma exponencial, para todos los fluidos con los que se realizo el experimento, lo que confirma la teoría de de la absorción de la radiación en distintos materiales.

6. La pérdida de sensibilidad en radiografías de tubería llena, es básicamente igual, para diámetros iguales de tubería, no importando el fluido que contengan, según el experimento realizado, aunque hay que aclarar que todos los fluidos que se utilizaron tenían densidades parecidas.

7. Debido a que no todas las probetas radiografiadas tenían el mismo espesor, esto provocó que las gráficas en algunas ocasiones presentaran cierta desviación del comportamiento realmente exponencial que deben de tener, aunque esta desviación es tan pequeña que se puede considerar como despreciable.

CONCLUSIONES

1. El equipo y las técnicas que se utilizaron para llevar a cabo las pruebas radiográficas que eran necesarias para la ejecución de este trabajo, son las mismas que se utilizan comúnmente en la práctica, cambiando únicamente en cómo se calcularon los tiempos de exposición en el caso de la tubería que contenía producto.
2. Se pudo comprobar mediante las pruebas realizadas y la posterior construcción de las gráficas, para los factores de corrección, que efectivamente la absorción de la radiación por la materia se comporta de forma exponencial, dependiendo del diámetro de la tubería y la clase de fluido que ésta contenga.
3. Quedó comprobado mediante los resultados obtenidos que al radiografiar tuberías que contengan algún fluido y que tengan un diámetro de 1" a 3", utilizando los tiempos de exposición para tubería vacía, las densidades obtenidas serán prácticamente las mismas para ambos casos, pero la sensibilidad obtenida en las placas tomadas en la tubería llena será considerablemente menor. Para el caso de tubería de diámetro mayor a las 3" quedó comprobado que hay que aplicar un factor de corrección para poder obtener una densidad aceptable, pero que igualmente la sensibilidad para las placas tomadas en tubería llena será considerablemente menor.
4. Al concluir las pruebas se pudo comprobar que para diámetros iguales de tubería se obtienen sensibilidades similares, no importado el tipo de fluido que contenga la tubería, aunque esto se podría deber a que el agua, el petróleo, el lubricante y el hidrocarburo que se utilizó, todos poseen densidades que se encuentran en el mismo rango.

5. Aunque los tiempos de exposición, en tubería de diámetros mayores a las 3" aumenten considerablemente, siempre será más práctico, y se perderá menos tiempo, radiografiando con la tubería llena que teniendo que drenar y limpiar la tubería para que ésta sea radiografiada.

6. Debido a lo observado en los resultados del experimento, hay que aclarar que antes de decidir si se radiografía un sistema de tuberías que se encuentra lleno de producto, y en operación, o si éste se saca de operación y drena antes, hay que analizar cuál es el tipo de defectología que se quiere encontrar, ya que defectos como grietas pequeñas o corrosión leve, probablemente no se detectarán si el sistema se radiografía en operación, debido a que la sensibilidad de las placas radiográficas disminuye considerablemente a causa de la masa extra de fluido que tiene que atravesar, por lo que defectos pequeños o cuya profundidad en relación al espesor del material base, no sea considerable, no se podrán detectar.

RECOMENDACIONES

1. Realizar el experimento y la construcción de las gráficas y tablas de los factores de corrección para otros fluidos que se transporten mediante tuberías en la industria, ya que el presente trabajo únicamente se ocupó de tratar algunos de los fluidos con los que más comúnmente se trabaja en la industria petrolera y de hidrocarburos.
2. Llevar a cabo nuevamente las pruebas, pero esta vez construyendo un sistema de tuberías, para las mismas (no usando probetas como en este caso), con el fin de poder hacer circular el producto, para de esta forma poder determinar si el fluido en movimiento afecta de alguna manera los resultados obtenidos con el fluido estático.
3. Investigar más a fondo si la densidad de un fluido es un factor determinante para que la sensibilidad de las placas radiográficas disminuya, o si esto más bien tiene que ver con la composición química del fluido.

BIBLIOGRAFÍA

1. Lozano, Luis y Leyda Rojas. **Interpretación radiográfica**. Guyana: s.e., 1985.
162 pp.
2. Ramírez Gómez, Francisco. **Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de la calidad de los materiales**. Tercera edición. España: s.e., s.a. 213 pp.

Referencias Electrónicas

3. Página web: www.Ensayos_TP8_radiografia_gammagrafia_Monografias_com
(octubre 2004)
4. Página web: www.foronuclear.org/222/0_222.htm#cp7 (octubre 2004)
5. Página web: www.chemkeys.com/esp/md/ede_4/ede_4.htm (Julio 2005)
6. Página web: www.radiology.com.br (marzo 2004)