

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS RADIOGRÁFICOS PARA LA
LOCALIZACIÓN DE TUBOS DE PVC EN ESTRUCTURAS DE
CONCRETO.**

**Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela**

Por la bachiller:

Siddhartha Rodríguez Rivero

Para optar por el título de

Ingeniero Metalúrgico y

Ciencia de los Materiales

CARACAS, DICIEMBRE 2004

ACTA

Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para examinar el Trabajo Especial de Grado titulado:

“DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA LOCALIZACIÓN DE TUBOS DE PVC EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO, UTILIZANDO LA TÉCNICA DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL”

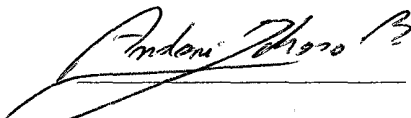
Presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela por la bachiller Siddahrtha Rodríguez Rivero, deja constancia de lo siguiente:

Hemos leído este trabajo y participado en su discusión, encontrando que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los veintidós días del mes de Noviembre de dos mil cuatro.



Prof. Freddy Fraudita
Tutor



Prof. Andoni Ichaso
Jurado



Prof. Vicente Ignoto
Jurado

RESUMEN

RODRÍGUEZ RIVERO, Siddhartha

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS RADIOGRÁFICOS
PARA LA LOCALIZACIÓN DE TUBOS DE PVC EN
ESTRUCTURAS DE CONCRETO**

Tutor: Prof. Fraudita Freddy.

Tesis. Caracas. Universidad Central de Venezuela.

Facultad de Ingeniería

**Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los
Materiales**

Palabras claves: Localización de tubos de PVC, Radiografía Industrial en concreto, Diagrama de Exposición para concreto, Indicador de Calidad de Imagen (ICI) para concreto

En el presente trabajo se plantea el estudio de la aplicación de la técnica de la Radiografía Industrial, el cual es un método de Ensayo No Destructivo, para obtener la localización de tubos de PVC ubicados dentro de patrones de concreto. Para alcanzar este objetivo se prepararon patrones de concreto y se variaron parámetros como: los espesores de los patrones, tiempo, voltaje y amperaje, para así poder elaborar un diagrama de exposición para concreto y un sistema de calidad de imagen que nos permita la ubicación exacta de dichos tubos. Este tipo de trabajo ha adquirido gran importancia, debido a que en la actualidad los materiales no metálicos, tales como el PVC, están siendo utilizados cada vez más en el área de construcción y por lo tanto es necesaria su ubicación. Una vez que se

tiene la localización exacta de los tubos, es más rápido y sencillo realizar las renovaciones o reparaciones, ya que se evitaría una perforación innecesaria de dichos tubos y por ende se ahorraría tiempo y dinero.

El diagrama de exposición obtenido permite realizar los cálculos necesarios para lograr una radiografía adecuada para la ubicación de los tubos de PVC dentro del concreto. Es importante señalar que dentro de estos tubos se encuentran cables de electricidad, fibra óptica, etc., que pueden dañarse al realizar reparaciones o renovaciones en edificaciones donde ellas se utilizan, tales como bancos, edificios de telefónica, etc. En este sentido, el objeto del trabajo es determinar las condiciones para ubicar dichos tubos en el concreto y así evitar la destrucción de los elementos que se encuentran dentro de ellos.

Este trabajo permitió comprobar que dichos tubos colocados en concreto se pueden ubicar, a pesar de que ambos materiales, tanto el PVC como el concreto, tienen la misma capacidad de absorción de radiación. La localización de los tubos de PVC se realizan con valores de voltajes elevados, 180 y 220kV, ya que a valores inferiores es difícil distinguir con nitidez y precisión ubicación de los mismos.

Se elaboró un diagrama de exposición, con los valores obtenidos de la radiografía de los patrones de concreto sin tubos de PVC, el cual contribuyó a establecer los parámetros de las exposiciones en concreto, este diagrama de exposición es útil siempre y cuando se trabaje bajo las mismas condiciones señaladas en el presente trabajo.

Con la mezcla de concreto utilizada para la elaboración de los patrones se fabricó un indicador de calidad de imagen (ICI) de agujero, el cual nos permitió evaluar por comparación que la radiografía obtenida bajo la técnica aplicada fue satisfactoria.

Debido a la importancia de la Radiografía Industrial en construcciones este trabajo es un comienzo en el desarrollo de ésta técnica en la amplia área de obras civiles y poco a poco se harán nuevos descubrimientos que contribuyan al desarrollo de esta técnica y mejore los parámetros o las bases del trabajo ya preestablecido.

INDICE

INDICE	5
INDICE DE FIGURAS	9
INTRODUCCIÓN	10
CAPITULO I.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Métodos de Ensayos No Destructivos.....	4
1.3 Tipos de Ensayos No Destructivos:	5
Tabla 2 Clasificación por aplicación de los END ⁽³⁾	11
1.4. Criterios de aplicación.	12
1.5. Elección del método y técnicas operatorias:	12
1.6. Importancia de los END	12
1.7. Historia de las Radiaciones	13
1.7.1 Naturaleza y propiedades fundamentales:.....	14
1.7.2 Naturaleza de los rayos X.....	15
1.7.3 Principales propiedades de los rayos X.....	15
1.7.4 Fuentes de rayos X.....	16
1.7.5 Fuentes radioactivas.....	16
1.7.6 Tubos de rayos X.....	17
1.7.7 Filtros	18
1.8 Radiografía Industrial	19
1.8.1 Absorción de radiación	19
1.9 Formación de la imagen radiográfica	20
1.9.1. Pantallas reforzadoras	20
1.10 Películas Radiográficas.....	21
1.10.1 Estructura de las películas radiográficas	22

1.10.2 Granularidad	23
1.10.3 Tipos de películas	23
1.10.4 Elección del tipo de película	24
1.10.6 Prueba de las luces de seguridad	25
1.11. Efectos Geométricos	26
1.11.1 Penumbra Inherente	26
1.11.2 Penumbra Geométrica	27
1.11.3 Penumbra Total	28
1.11.4 Elección de la distancia fuente-película	29
1.11.5 Ley de la inversa del cuadrado de la distancia	29
1.12 Proceso de películas radiográficas.	31
1.12.2 Proceso Manual	31
1.12.3 Efectos de la condición de revelado en la película	34
1.13 Curvas de las películas radiográficas	35
1.13.1 Curvas características	35
1.13.2 Contraste	37
1.13.3 Gradiente	37
1.13.4 Exposición	37
1.13.6 Elaboración de un diagrama de exposición	39
1.13.7 Construcción del diagrama de exposición	40
1.13.8 Calculo de la exposición	40
1.13.9 Utilidad del diagrama de exposición	43
1.14 Control de la calidad de imagen	43
1.14.1 Sensibilidad	44
1.14.2 Sensibilidad radiográfica (S)	44
1.14.4 Tipos de Indicadores de calidad de imagen	45
CAPITULO II	50
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	50
2.1 Organigrama del Trabajo	50
2.2 Material utilizad	51

2.3 Preparación de los Patrones.	51
2.4 Diseño de los Patrones	54
2.4.1 Volumen de los encofrados (V_e)	54
2.4.2 Cálculo del volumen del cilindro (V_c)	55
2.4.3 Cálculo del volumen total (V_T).....	55
2.5 Elaboración de la tabla de dosificación de mezcla	56
Dosis de cemento	56
Pesos de agregados	56
2.6 Diseño de Mezcla.....	56
2.7. Calculo de la Resistencia del concreto.	58
2.8 Elaboración del Diagrama de Exposición	61
2.8 Diseño y elaboración del ICI	66
3. RESULTADOS.....	68
3.1 Volumen total (V_T).....	68
3.2. Tablas de Dosificación de Mezcla.....	68
Dosis de cemento	69
Pesos de agregados.....	69
3.3 Resistencia del concreto.....	69
3.4 Curva de Calibración	70
3.5. Calculo del ICI.....	71
3.5.1. Indicador de Calidad de Imagen (ICI)	72
3.6. Radiografía de los patrones del grupo I	73
3.7 Diagrama de Exposición.....	74
3.8 Radiografías	76
3.8.1 Radiografía de los patrones para la realización del Diagrama de Exposición	76
3.8.2 Radiografía del ICI	77
3.8.3 Ubicación de los tubos	78
3.8.4 Tubo PVC con cableado eléctrico	81
3.8.5 Efecto de Rebote	82
CAPITULO IV	83

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	83
CAPITULO V	87
5.CONCLUSIONES.....	87
CAPITULO VI	88
6. RECOMENDACIONES	88
CAPITULO VII	89
7. BIBLIOGRAFÍA	89

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Estructura de una película radiográfica	22
Fig. 2. Penumbra Geométrica	28
Fig. 3. Ley de la inversa del cuadrado de la distancia	30
Fig. 10 Patrones utilizados para la elaboración del Diagrama de Exposición	52
Fig. 11 Patrones con los tubos PCV	52
Fig. 14 Máquina de ensayos de compresión	59
Fig. 15 Ensayo de compresión	60
Fig. 16 Cilindros fracturados	60
Fig. 17 Equipo de Rayos X.....	61
Fig. 18 Montaje de la película y patrón de concreto.....	62
Fig. 19 Tablero de control del Equipo de Rayos X.	63
Fig. 20 Horno de Mufla	64
Fig. 21 Densitometro.....	65
Fig. 22 Curva de Calibración del equipo	65
Fig. 23 y Fig. 24 Indicador de calidad de Imagen	67
Fig. 25 Radiografía de patrón de 8cm de espesor	76
Fig. 26 Radiografía de patrón de 14cm de espesor	76
Fig. 27 ICI en un bloque de 10cm de espesor	77
Fig. 28 ICI de un bloque de 8cm de espesor	77
Fig. 29 Bloque de 12cm de espesor , 180kV	78
Fig. 30 bloque 12 cm de espesor, 220kV	78
Fig. 31 Bloque de 16cm de espesor, 180kV	79
Fig. 32 Bloque 16cm de espesor, 220kV	79
Fig. 33 Bloque de 20cm de espesor, 180kV	80
Fig. 34 Bloque 20cm de espesor, 220kV	80
Fig. 35 Bloque de 12cm de espesor con cableado eléctrico, 180kV	81
Fig. 36 Bloque de 12cm de espesor con cableado eléctrico, 220kV	81
Fig. 37 Bloque de 20cm de espesor, 180kV	82
Fig. 38 Bloque 16cm de espesor, 150kV	82

INTRODUCCIÓN

La ingeniería a través de los años se ha basado en el estudio de diversos procesos y componentes que pueden cubrir con las necesidades de la sociedad, rigiéndose bajo las normas de calidad industrial.

En los últimos años los Ensayos no Destructivos han adquirido gran importancia, ya que ésta técnica no solo se utiliza para determinar defectos del material sino que también se usa como método preventivo y de control de calidad sin necesidad de alterar las características y propiedades del componente.

La Radiografía Industrial con rayos X, se ha convertido en una técnica de gran importancia dentro de los Ensayos no Destructivos, porque no sólo se aplica a materiales metálicos sino que en los últimos tiempos se ha ido desarrollando dentro del área de los materiales no metálicos, contribuyendo así a un considerable avance sobre todo en el campo de obras civiles.

En nuestro país se ha realizado pocos estudios en lo referente a Radiografía Industrial en concreto, pero es evidente que se está tomando un estudio de gran interés ya que nos permite detectar fallas en componentes metálicos y no metálicos. En lo que respecta a los materiales no metálicos se puede verificar la posición y el estado de las cabillas en diversas estructuras de concreto. Así mismo, el contraste es la base de nuestro estudio, con el objeto de verificar la localización de tubos de plástico, si presenta alguna falla, algún deterioro y lo más importante se puede comprobar, si se trabaja con cableado eléctrico, si éstos presentan alguna imperfección o fractura.

A través del presente trabajo se quiere demostrar que los Ensayos no Destructivos están siendo utilizados para todo tipo de material, tanto metálico como no metálico. Y la aplicación de la Radiografía Industrial ha ido adquiriendo gran interés en el campo de obras civiles ya que nos permite determinar la ubicación de cabillas, cableados eléctricos y tubos de PVC. Inicialmente se comenzó a trabajar con materiales metálicos para la ubicación de cabillas y verificación de su estado, es decir, si hay presencia de fractura o corrosión; pero los últimos estudios se han concentrado en el análisis de rayos X aplicados a materiales no

metálicos, como es nuestro caso, que se trabajó determinando la ubicación de tubos PVC dentro del concreto, lo que nos permite realizar trabajos más precisos cuando se quiere verificar algún daño como es el caso de fracturas tanto del tubo como del cableado y cuando se realizan reparaciones o reconstrucciones de edificaciones. Utilizando la radiografía industrial en concreto para cualquiera de estas acciones se economiza tiempo y por ende dinero, al mismo tiempo nos permite realizar trabajos preventivos y de mayor calidad.

La aplicación de la Radiografía Industrial utilizando materiales no metálicos en concreto está adquiriendo cada día mayor importancia por las ventajas que ésta aporta tanto a los Ensayos no Destructivos como al área de obras civiles es por ello que éste trabajo es solo un comienzo de su amplio campo de investigación y que poco a poco se estudiarán nuevas aplicaciones, métodos y avances que contribuyan a su desarrollo.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

1.1.1 *John Forbis* ⁽¹⁾ () estudió el uso de la radiografía en la renovación de edificaciones, lo cual aporta valiosa información en la elaboración y evaluación de proyectos ingenieriles.

Un proyecto típico de renovación, requiere perforaciones a través de las láminas de concreto para conexiones de servicios útiles tales como: trabajos con tubos, líneas de comunicación y aseguramiento de pemos, tornillos o cabillas. El espesor de las láminas reforzadas y la información del uso que se les dará es muy importante en una renovación ingenieril, ya que esto permite establecer que la capacidad que tienen para soportar cierta cantidad de carga.

La selección de la fuente de radiación que se utilizará en los ensayos radiográficos, dependerá de la capacidad de completar una exposición tan rápida como sea posible, así como, la seguridad, el espesor y tamaño del concreto, el número de exposiciones de placas, acceso a los sitios y costo global.

Las fuentes utilizadas en este experimento fueron Ir-192 y Co-60. Cuando se trabajó con espesores de hasta 203mm se utilizó Ir-192 y para espesores de hasta 406mm se utilizó Co-60. Este tipo de fuente también es usada cuando se necesitan realizar varias exposiciones, debido a que el tiempo y el costo son menores, además de que poseen mayor disposición en lo que respecta a la distancia entre la fuente y la película, con lo cual se consigue una reducción de la distorsión de la imagen. De igual forma, Forbis estableció que el concreto es una variable de absorción de radiación, y que para establecer y mantener los tiempos de exposiciones, se deberá escoger una fuente de radiación mediante la cual se podrán realizar exposiciones sobre espesores exactos, teniendo

presente que estos espesores son desconocidos o es una variable a calcular. La densidad de la película se determinó usando un densitómetro, el cual da una lectura directa e indica del valor adecuado de la radiografía. Asimismo, Forbis pudo comprobar que la densidad de la película incrementa cuando se irradian tubos plásticos y que los conductores de cobre se distinguían de los conductos eléctricos.

1.1.2. Kevin Rens⁽¹⁾ et al. () estudiaron el uso los métodos radiográficos básicos para la localización y medición de objetos que se encuentran dentro de las láminas de concreto. Una de las inquietudes que originó este estudio fue el incremento en el uso de productos y/o materiales de construcción no metálicos, ya que consigo se generaban problemas típicos, entre los cuales se encuentran las perforaciones o separaciones de los cables de corriente, de fibra óptica o algún otro servicio, debido a que a menudo se realizan perforaciones a través de las láminas de concreto para facilitar la utilización de líneas o modificaciones estructurales.

La localización de los tubos de plástico que contienen los cables de fibra óptica y que se encuentran ubicados dentro del concreto pueden resultar un poco difícil, ya que los diseños de planos no son siempre los más precisos debido a que los cables se pueden mover y los tubos pueden rotar gracias al peso, fluido o vibraciones dentro del concreto. Es por ello, que la ubicación exacta de los cables de fibra óptica o los tubos de polivinilo (PVC)^(*) pueden ser desconocidos.

El objetivo de este estudio se basó en tres (3) aspectos:

- Desarrollar un método en el cual se estandaricen los identificadores de tubos de PVC, que comúnmente son utilizados dentro de las láminas de concreto para así poder distinguir uno de otro cuando se vea la radiografía.
- Crear un indicador de calidad de imagen para verificar si los tubos de PVC con marcas estandarizadas están presentes en la radiografía.

- Crear un sistema de imagen que sea capaz de determinar la profundidad aproximada d un objeto usando sólo una exposición, ya que los métodos tradicionales requieren de 2 ó 3 exposiciones sobre la misma película para así poder mostrar diversas posiciones. La profundidad es obtenida usando geometría y triángulos semejantes.

Ellos realizaron 6 experimentos para verificar la técnica de imagen propuesta, 3 de los cuales se llevaron a cabo en lugares apartados con un equipo portátil de rayos x, junto con la asistencia de un inspector profesional de END y la utilización de una fuente de radiación de Ir-192. Los otros 3 experimentos se realizaron en un laboratorio utilizando un moderno sistema digital de imagen.

Como resultado del 1er experimento se determinaron los tamaños de hilos requeridos que deberían ser usados para ICI y SIS (self identification system); el ICI es utilizada para verificar, si existe o no un objeto dentro de la lámina de concreto y verificar que la radiografía fue realizada de manera apropiada; en el 2do experimento determinaron si el sistema fue capaz de identificar los tubos plásticos localizados dentro del concreto y por último, en el 3er experimento, ensayaron la profundidad en 3D encontrando la capacidad del ICI y SIS del sistema.

1.2.3 *Pereira*⁽²⁾ et al. (estudiaron las principales variables que deben tomarse en cuenta para efectuar una toma radiográfica, aplicada a elementos estructurales de concreto con la finalidad de determinar a que profundidad se encuentran las cabillas que sirven de soporte al material, a través de mediciones de la densidad promedio sobre la película, tomándose en cuenta las exigencias del código ASME. Como resultados de este trabajo se obtuvieron diagramas de exposición para el concreto con equipos de rayos X, así como curvas experimentales que relacionan la densidad de la película medida sobre la imagen de la cabilla, con la profundidad a la cuál se encuentra. De igual manera se diseñaron y construyeron patrones para la aplicación de la técnica,

empleándose para ello, mortero con piedrillas de diferente tamaño. Este tamaño pudo ser determinado experimentalmente sobre la placa radiográfica, mediante su medición directa sobre la placa, ya que la deformación geométrica es despreciable, esto último puede ser aplicado al control de la calidad del concreto.

1.2 Métodos de Ensayos No Destructivos

Los métodos de ensayos no destructivos generalmente son aplicados a los controles de calidad, permitiendo así, comprobar con un elevado índice de seguridad el nivel de calidad de diferentes producciones. Sin embargo, es necesario la utilización de un número determinado de muestras, para obtener datos de una zona localizada de un producto o pieza. Hay que tener presente que en este tipo de estudio no se analiza un volumen y no da seguridad de todos los elementos de un lote.

1.2.1 Defectología: Detección de heterogeneidades, discontinuidades e impurezas, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales, determinación de tensiones, detección de fugas, defectos en maquinaria en movimiento, puntos calientes.

1.2.2 Caracterización de los materiales: Características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas. Propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas), transferencia de calor y trazado de isothermas.

1.2.3 Metrología: Control de espesores, medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimientos, niveles de llenado.

Los métodos de Ensayos No Destructivos son auxiliares del control de calidad de los productos, partes y componentes del mantenimiento industrial, tanto preventivo como correctivo ayudando al desarrollo tecnológico. Son utilizados para la detección y evaluación de discontinuidades y defectos y para la caracterización de materiales resultando así indispensables para determinar el nivel de calidad alcanzado en los productos.

1.3 Tipos de Ensayos No Destructivos:

1.3.1 Ultrasonido: Son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas y se utilizan para ubicar y evaluar discontinuidades externas e internas. Comúnmente las ondas ultrasónicas utilizadas tienen una frecuencia de 0,5 y 25 MHz, pudiéndose detectar discontinuidades que tengan un tamaño mayor a la mitad de la longitud de onda. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, por lo que es posible detectar defectos más pequeños si se usan ondas ultrasónicas de mayor frecuencia.

Dado que la transmisibilidad de ondas ultrasónicas es buena cuando el tamaño de los granos cristalinos del material en ensayo es pequeño, es posible aplicar ultrasonido para detectar pequeños defectos en piezas forjados de algunos metros de diámetro. Cuando el tamaño de grano es grande la onda ultrasónica es dispersada por los bordes de grano y así atenuada. En algunos casos, debido a que las ondas dispersas producen ecos de fondo (ruido), no es posible la detección. En buenas condiciones se pueden determinar defectos cercanos a la mitad de la longitud de onda, por ejemplo de 1,5mm (aprox. 3mm la longitud de onda), cuando se usan frecuencias de 2MHz en aceros.

La detectabilidad de un defecto depende mayormente de su forma y orientación, esto significa que se puede obtener un eco de gran amplitud cuando la onda incide en un defecto plano (una fisura) y en forma perpendicular a la superficie. Por el contrario, se obtienen ecos pequeños cuando el defecto es esférico tal como un “blowhole” (burbuja), debido a que la onda ultrasónica es dispersada en muchas direcciones por sus superficies. Las condiciones de contacto entre el palpador y la superficie de la pieza de ensayo, la rugosidad de la superficie y el acoplante afectan también la amplitud del eco siendo esto uno de los puntos más débiles del ensayo ultrasónico.

1.3.2 Corriente Inducida: Se basa en fenómenos de inducción electromagnética y es aplicado mayormente a materiales conductores y a materiales no ferrosos, se

utiliza en inspecciones superficiales y subsuperficiales de pocos mm de profundidad.

La distribución y magnitud de las corrientes inducidas dependen de la frecuencia de la corriente alterna, conductibilidad y permeabilidad de la pieza, de la geometría y dimensiones del espécimen y la existencia de defectos. Así se puede obtener información de la calidad del material y determinar si hay algún defecto como también su geometría y sus dimensiones. No se puede detectar directamente la corriente inducida sino, por la medición del campo de impedancia de la bobina. En el ensayo por corrientes inducidas la velocidad de los ensayos son altas debido a que podemos ejecutar el ensayo sin tocar la pieza y directamente obtener los resultados como salidas eléctricas.

Este método es apropiado para detectar defectos en y cercanos a la superficie del objeto en geometrías simples tales como cables, barras y tuberías; es posible también medir el espesor de una película no conductora sobre el metal y el espesor de películas metálicas no magnéticas en materiales ferromagnéticos.

1.3.3 Líquidos Penetrantes: basados en fenómenos de capilaridad, se pueden aplicar a toda clase de materiales y se utiliza para detectar discontinuidades abiertas a la superficie en metales no porosos y otros materiales. En el ensayo de líquidos penetrantes las indicaciones se magnifican debido a la capacidad de absorción del revelador (pequeños partículas que se aplican sobre la superficie de la pieza) que actúa sobre el penetrante que ha quedado retenido en las discontinuidades, extrayéndolo a la superficie. En el ensayo se llevan a cabo las siguientes etapas:

- Limpieza inicial: Se remueve la suciedad de la superficie de la pieza y del interior de los defectos
- Penetración: Se aplica un penetrante líquido con alta capilaridad sobre la pieza a ser examinada, y se deja penetrar dentro de los defectos.
- Limpieza Intermedia: Se remueve el exceso de penetrante de la superficie de la pieza.

- Revelado: Se aplica un revelador blanco a la superficie de la pieza que extrae el penetrante de los defectos.
- Observación: Se observan las indicaciones de los defectos bajo la luz natural en el caso de los penetrantes coloreados o usando luz negra en el caso de los penetrantes fluorescentes.

El ensayo por líquido penetrante sólo detecta discontinuidades abiertas a la superficie. La detectabilidad de un defecto con esta técnica es algo inferior a la del ensayo por partículas magnéticas. El ensayo por líquidos penetrantes puede ser aplicado en cualquier tipo de material, metálicos o no metálicos, salvo en aquellos materiales porosos o con alta irregularidad. El tamaño mínimo de un defecto detectable es aproximadamente de 1mm de longitud, 20µm y 1µm de ancho dependiendo de la técnica y la calidad de los productos utilizados.

1.3.4 Partículas Magnéticas: Método que permite detectar discontinuidades e impurezas superficiales y subsuperficiales, en materiales ferromagnéticos.

Los materiales ferromagnéticos tales como muchos aceros desarrollan, cuando son magnetizados, un flujo magnético mucho mayor que en los materiales no magnéticos. Si existiera un defecto cerca de la superficie se produce un escape de este flujo, llamado campo de fuga, en el espacio cercano a la superficie de la pieza, así este método puede localizar defectos superficiales y/o subsuperficiales por la detección del campo de fuga.

Para visualizar el campo de fuga se utilizan comúnmente partículas magnetizables y en algunos casos sensores magnéticos tal como un generador de efecto mayor de cintas magnéticas. El campo de fuga que producen los defectos depende de la orientación de magnetización en la pieza y dimensiones del defecto.

El ensayo por partículas magnéticas es el método más útil de inspección para determinar si hay defectos superficiales y/o subsuperficiales en el objeto. Es posible detectar con bastante seguridad discontinuidades de un milímetro de longitud, por lo que ha sido ampliamente usado en aceros. Desafortunadamente no es posible estimar la profundidad de las

indicaciones que es la información más importante cuando se quiere evaluar la vida de un producto, se puede tener información cuantitativa usando ensayos de escape del campo magnético, pero esta aplicación está confinada a piezas con geometría simple.

1.3.5 Radiografía Industrial: Es utilizada para poner en evidencia las fallas o inclusiones que puedan perjudicar la eficiencia o el pleno aprovechamiento del material o la estructura inspeccionada. La radiografía industrial es un método no destructivo para inspeccionar piezas u objetos, en búsqueda de discontinuidades o defectos especialmente internos. El método se basa en la mayor o menor transparencia a los rayos X o gamma de los materiales según su naturaleza y espesor.

La radiación atraviesa el material siendo absorbida parcialmente por el objeto irradiado y emerge con diferentes intensidades, las que son interceptadas por una película radiográfica. Luego del procesado de la película se evalúa la imagen y los defectos. En el ensayo radiográfico se usan principalmente los rayos X y los rayos gamma que son ondas electromagnéticas que tienen casi las mismas propiedades físicas, pero difieren en su origen.

Estos rayos tienen la capacidad de penetrar los objetos, y su penetrabilidad depende del tipo de material, espesor, densidad del objeto y de la existencia de defectos en la pieza. El ensayo radiográfico es el método para examinar defectos y se basa en el cambio en la intensidad de los rayos X emergentes de la pieza usando como medio de registro una película, ya que las formas y dimensiones de los defectos tridimensionales son convertidos a una imagen en dos dimensiones sobre la película radiográfica, el coeficiente de absorción de un objeto es un factor importante. El coeficiente de absorción (μ) disminuye con la energía de los rayos X y se incrementa con el número atómico del material del objeto, por lo que se deberá aumentar la energía del tubo a medida que los espesores de la pieza aumenten o los materiales sean más absorbentes. Otro factor importante en los ensayos radiográficos es la dispersión de los rayos X., la dispersión depende del voltaje del tubo,

cuando éste es alto, la diferencia entre la dirección de los rayos X dispersados con respecto a los rayos X incidentes disminuyen con el voltaje del tubo.

En el ensayo radiográfico se puede obtener en la película la proyección de un defecto (en dos dimensiones) y así evaluar el tipo y dimensiones del mismo. El ensayo radiográfico puede detectar defectos internos y ha sido ampliamente usado y adoptado en muchas películas como una evidencia precisa. También tiene la capacidad de detectar defectos en tres dimensiones que tengan un volumen superior al 3% relativo al espesor del objeto, en la dirección de los rayos incidentes; en el caso de fisuras que son el tipo de defecto más perjudicial para un producto, es posible detectarla si está ubicada aproximadamente paralela a la dirección de los rayos incidentes, pero se vuelve difícil si la fisura tiene más de 15° con respecto a la dirección de los rayos incidentes.

Tabla 1 Cuadro comparativo de las características de los Ensayos No Destructivos⁽³⁾

METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS							
Clasificación por FUNDAMENTOS							
ONDAS ELECTROMAGNETICAS (Espectro electromagnético)				ONDAS ACUSTICAS (Espectro acústico)		EMISION DE PARTICULAS SUBATOMICAS	OTROS (Absorción, capilaridad, transparencia, etc.)
METODO	FRECUENCIA Hz	METODO	FRECUENCIA Hz	METODO	FRECUENCIA Hz		
RAYOS GAMMA	$10^{14}-10^{21}$	ELECTRICOS (*)	$0-10^7$	ULTRASONICOS	> 20 kHz	NEUTRONES	LIQUIDOS PENETRAN- TES
RAYOS X (película y fluoroscopia)	$10^{17}-10^{18}$	Partículas electrificadas		Impulso-eco	200 kHz-25 MHz		
RAYOS ULTRAVIO- LETAS	$10^{14}-10^{15}$	Termoeléctricos		Transparencia	25 kHz-30 MHz	ANALISIS POR ACTI- VACION DE NEUTRONES	PARTICULAS FILTRADAS
(partículas magnéticas, penetrantes, partículas electrificadas)		Corriente eléctrica		Resonancia	1 MHz-25 MHz		
		Resistividad eléctrica		Espectroscopía ultra- sónica	20 kHz-300 kHz		
		Ensayo columna-		Emisión acústica			
		Extensómetros de		(Detección de fugas, descargas corona y defectos en maquinaria en movimiento)	35 kHz-45 kHz	PROTONES	ENSAYO FUGAS (FLUIDOS)
ESPECTRO VISIBLE	$4 \times 10^{14}-8 \times 10^{14}$	MAGNETICOS (*)	$0-10^7$	SONICOS	16 kHz-25 kHz	PARTICULAS BETA	RECUBRI- MIENTOS FRAGILES
— Recubrimientos foto- elásticos		— Campos magnéticos	$0-10^7$	Resonancia	5 kHz-25 kHz		
— Interferometría foto- gráfica		— Partículas magnéticas	$0-10^7$	Impacto acústico	4 kHz-25 kHz		
RAYOS INFRARROJOS (TERMÓGRAFA):	$10^{12}-4 \times 10^{14}$	— Inducción electromag- nética	$3 \times 10^7-10^9$	Sónico-Corrientes inducidas			
— Pinturas termocrómi- cas		Corrientes inducidas					
— Circuitos líquidos		(Por impulso, mul- tifrecuencia)					
— Radiómetros							
MICROONDAS	$0,3 \times 10^9-10^{11}$						
RADIOONDAS (DIELECTRICOS)	10^6-10^8						

Tabla 2 Clasificación por aplicación de los END⁽³⁾

METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (Clasificación por APLICACIONES)			
DEFECTOLOGIA		CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES	METROLOGIA
DETECCION DE HETEROGENEIDADES Rayos Gamma Rayos X (películas y fluoroscopia) Interferometría holográfica Rayos Infrarrojos (Termografía) Microondas Partículas electrificadas Corriente eléctrica Ensayo «corona» Campos magnéticos Partículas magnéticas Corrientes Inducidas Ultrasónicos: — Impulso-eco — Transmisión — Resonancia — Emisión acústica Sónicos: — Resonancia — Impacto acústico — Sonidos-corrientes inducidas Partículas subatómicas: — Neutrones — Protones — Partículas Beta Líquidos penetrantes Partículas filtradas	EVALUACION DE LA CORROSION Y DETERIORACION POR AGENTES AMBIENTALES Rayos Gamma Rayos X Corriente eléctrica Corrientes inducidas Ultrasonidos Protones ESTADO DE TENSIONES Difracción de Rayos X Recubrimientos fotoelásticos Interferometría holográfica Extensímetros de resistencia eléctrica Recubrimientos frágiles DETECCION DE FUGAS Emisión acústica Fluidos DEFECTOS EN MAQUINARIA EN MOVIMIENTO Rayos X Emisión acústica Análisis de muestras de aceite lubricante DETECCION DE PUNTOS CALIENTES Rayos infrarrojos (Termografía): — Pinturas termocrómicas — Cristales líquidos — Radiómetros	PROPIEDADES QUIMICAS, ESTRUCTURALES, MECANICAS Y TECNOLOGICAS Microondas Radioondas (Dieléctricos) Termoelectrónicos Resistividad eléctrica volumétrica Campos magnéticos Corrientes inducidas Ultrasonidos Sónicos Neutrones Análisis por activación de neutrones Radiometría (Rayos X, Gamma y Beta) Difracción de Rayos X PROPIEDADES FISICAS: Elásticas: — Ultrasonidos, Sónicos Eléctricas: — Radioondas (Dieléctricos) — Termoelectrónicos — Corriente eléctrica — Corrientes inducidas Electromagnéticas: — Campos magnéticos — Corrientes inducidas PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, TRAZADO DE ISOTERMAS Rayos infrarrojos (Termografía)	CONTROL DE ESPESORES (En línea de fabricación) Corrientes inducidas Radiometría (Rayos X, Gamma y Beta) Campos magnéticos MEDIDA DE ESPESORES POR UN SOLO LADO Microondas Corriente eléctrica Campos magnéticos Corrientes inducidas Ultrasonidos (impulso-eco) Resonancia (Ultrasónica y Sónica) MEDIDA DE ESPESORES DE RECUBRIMIENTOS Rayos infrarrojos (Termografía) Termoelectrónicos Campos magnéticos Corrientes inducidas Radiometría (Rayos X, Gamma y Beta) NIVELES DE LLENADO Campos Magnéticos Radiometría (Rayos X, Gamma y Beta)

1.4. Criterios de aplicación.

- El ensayo debe permitir el desarrollo correcto de las etapas básicas de la inspección, de tal manera que pueda realizarse al ritmo de la producción y que los resultados obtenidos no sean afectados por el juicio subjetivo y agotamiento del operador.
- Se deben de tomar en cuenta los factores económicos y el ensayo se programaría bajo el criterio de rendimiento y de beneficio económico máximo.

Para cumplir con los requisitos mencionados anteriormente es indispensable recurrir a dispositivos de exploración especial diseñados para cada problema, según sea la forma y tamaño del producto y a la automatización del proceso de inspección.

1.5. Elección del método y técnicas operatorias:

Cada método presenta limitaciones en lo que respecta a las interpretaciones, a la geometría, a la naturaleza del material, al campo de observación y a la velocidad de aplicación. Es por ello, que es de gran importancia tener presente la naturaleza del material, su estado estructural, se debe contar con el conocimiento de los procesos a los cuales ha sido sometido para su elaboración, el tamaño y forma del producto, así como el tipo de heterogeneidades que se pretenden detectar, las características del material a determinar o la dimensión a medir.

1.6. Importancia de los END

- Para realizar el control de calidad y verificar las propiedades de los productos en los procesos de fabricación.
- Para comprobar el buen desempeño de las maquinarias durante su funcionamiento en la industria metal mecánica, petrolera, etc.
- Para dar confiabilidad a equipos y elementos fabricados.
- Para detectar oportunamente errores en producción y montaje.

- Para detectar discontinuidades en materiales.
- Para hacer investigaciones o inspecciones preliminares.
- Colaborar con el mantenimiento preventivo.

1.7. Historia de las Radiaciones

El descubrimiento de los rayos X fue realizado por Wilhem Conrad Röntgen, por medio de un trabajo acerca de la extensión del espectro radiante, emitido por un tubo de rayos catódicos, mediante el cual observó la fluorescencia inducida, durante el experimento, en una pantalla de platinocianuro de bario. (A pesar de que el tubo de rayos catódicos estaba recubierto por un papel negro).

La primera radiografía la realizó Röntgen, tanto a nivel humano como a nivel industrial; la primera tuvo como figura la mano de su esposa y la segunda fueron los cañones de una escopeta de caza; a pesar que el fin de dichas radiografías era demostrativos fueron de gran importancia ya que abrió las inquietudes de los científicos en ésta área, tal es el caso de Connot, Kolle y Stewardt, entre otros, quienes se dedicaron a resolver problemas radiográficos de carácter netamente industrial, así como el reconocimiento de objetos metálicos, soldaduras, etc.

Las primeras fuentes electrónicas de radiación eran de manejo engorroso y por algún tiempo su uso estuvo limitado a estudios experimentales hasta 1913 cuando se dio a conocer el tubo Coolidge, el cual consistía en un tubo catódico caliente que permitía trabajar con cargas de una manera continua. A medida que pasaba el tiempo se profundizaba más en estos estudios sobre todo en la Segunda Guerra Mundial, la cual contribuyó a la creación equipos de elevada potencia, teniendo como base el empleo de fuentes nucleares. El empleo de fuentes de radiación con fines industriales se inicia a fines de la década de los años veinte en Estados Unidos. Es muy importante destacar que junto con la elaboración de las armas atómicas la fabricación de radioisótopos se realizó de manera más fácil, sencilla y más barata, fue entonces que la radiografía mediante fuentes radioactivas o gammagrafía se convirtió en objeto fundamental de estudio. Desde entonces y hasta ahora los estudios de los rayos x y de técnicas radiológicas empleando partículas de elevado poder de penetración han sido decisivas.

1.7.1 Naturaleza y propiedades fundamentales:

1.7.1.1 *Estructura de la materia*: La materia es todo aquello que ocupa un espacio y posee masa. A lo largo del tiempo se ha tratado de estudiar su naturaleza ya que sólo se han elaborado modelos que explican superficialmente su funcionamiento obteniéndose así una descripción abstracta.

1.7.1.2 *Estructura del átomo*: Es la unidad más pequeña posible de un elemento químico. En la filosofía de la antigua Grecia, la palabra "átomo" se empleaba para referirse a la parte de materia más pequeña que podía concebirse. Esa "partícula fundamental", por emplear el término moderno para ese concepto, se consideraba indestructible, de hecho, átomo significa en griego "no divisible". Con la llegada de la ciencia experimental en los siglos XVI y XVII, los avances en la teoría atómica se hicieron más rápidos. El núcleo del átomo está formado a su vez por protones cargados positivamente y neutrones. En ciertos átomos, el núcleo al transformarse emite radiación manifestando de esta manera la radioactividad del átomo.

1.7.1.3 *Radiaciones Ionizantes*: Es cualquiera de los varios tipos de partículas y rayos emitidos por material radioactivo, equipos de alto voltaje, reactores nucleares y las estrellas. Las partículas alfa y beta son pequeños fragmentos de alta velocidad, emitidos por átomos radioactivos cuando se transforman a otra sustancia. Estas partículas de radiación y rayos poseen suficiente energía para desplazar electrones de átomos y moléculas.

1.7.1.4 *Rayos Gamma*: son radiaciones electromagnéticas de igual naturaleza que los rayos X, ya que poseen sus mismas propiedades pero no están producidos por un aparato eléctrico. Los rayos gamma proceden de la desintegración de núcleos atómicos de un elemento radiactivo, lo cual ocasiona que la energía de la radiación no sea regulable dependiendo solo de la naturaleza de la fuente radiactiva.

Existen varios procesos físicos que se han distinguido para que se generen rayos gamma, entre ellos se pueden señalar: La colisión de una partícula de alta energía con otra, el aniquilamiento de una partícula a través de la colisión con su propia antipartícula, la descomposición radiactiva de un elemento y la aceleración de una partícula cargada.

1.7.1.5 Rayos X: son radiaciones electromagnéticas penetrantes con una longitud de onda menor que la luz visible, producida bombardeando un blanco generalmente de wolframio con electrones de alta velocidad. La longitud de onda va desde unos 10 nm hasta 0,001 nm. A menor longitud de onda de los rayos X, mayor será su energía y poder de penetración.

1.7.2 Naturaleza de los rayos X

Los rayos X se producen siempre que se bombardea un objeto material con electrones de alta velocidad y en la cual gran parte de la energía cinética 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

1.7.3 Principales propiedades de los rayos X

- Los rayos X son invisibles.
- Su propagación se efectúa en línea recta y a la velocidad de la luz.
- No es posible desviar los rayos X por medio de una lente o de un prisma, pero sí por medio de una red cristalina.

- Los rayos X atraviesan la materia. El grado de penetración depende de la naturaleza de la materia y de la energía de los rayos X.
- Son rayos ionizantes, es decir, liberan electrones de la materia.
- Pueden deteriorar o destruir las células vivas.
- Afectan a una emulsión fotográfica del mismo modo que lo hace la luz
- La absorción de rayos X por una sustancia depende de su densidad y masa atómica. Cuanto menor sea la masa atómica del material, más transparente será a los rayos X de una longitud de onda determinada.

1.7.4 Fuentes de rayos X

La principal fuente es el clásico tubo de rayos X que consiste en una ampolla de vidrio a la que se le ha hecho un alto vacío, en cuyo interior lleva instalados los conjuntos anódico y catódico. El cátodo contiene un filamento que emite electrones cuando se calienta a incandescencia por medio de una corriente eléctrica de pocos amperios. Estos electrones emitidos son atraídos hacia el ánodo bajo el efecto de la tensión eléctrica aplicada entre cátodo y ánodo (el voltaje sobre el tubo). El conjunto anódico consiste en un metal de alto punto de fusión incrustado en el bloque anódico que será el blanco donde impacta el flujo de electrones; es en este impacto de electrones cuando se producen los rayos X. Cuanto mayor es el número atómico del elemento con el que chocan los electrones y mayor la velocidad de estos, mayor será la energía y el poder de penetración de la radiación producida.

1.7.5 Fuentes radioactivas

- *Fuentes radioactivas naturales:* Están constituidos por elementos como el radio, radón y mesotorio que dan una radiación muy dura, lo que los hace muy adecuados para el examen de objetos de mucho espesor. La desventaja que poseen estas fuentes es la imposibilidad de obtenerlas de pequeñas

dimensiones, poseen suficiente intensidad y se obtienen a un elevado precio.

- *Fuentes radiactivas artificiales:* Son aquellas que se obtienen por fisión o irradiación en un reactor nuclear, de esta forma es posible obtener isótopos en cantidades relativamente grandes y en estado razonablemente puro. Los factores que deciden su valor en los ensayos no destructivos (END) son, la longitud de onda e intensidad de radiación, su período o vida media y su actividad específica; es por ello que solo unos pocos radioisótopos artificiales son aptos para la radiografía.

1.7.6 Tubos de rayos X

Consta de una fuente de electrones y de un blanco donde puedan chocar, para conseguirlo debe crearse una diferencia de potencial suficiente entre ambos elementos y encerrar el conjunto en un recinto o ampolla al vacío. El tubo de rayos X siempre está montado en una carcasa protectora, constituida de plomo y diseñada para controlar los serios peligros que afectaron a la radiología en sus principios. Ésta 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. La carcasa protectora, alrededor de algunos tubos de rayos X, contiene aceite que actúa como aislante térmico y refrigerador. El emisor de electrones es el cátodo y lo que hasta ahora se ha llamado blanco es el ánodo. El cátodo es la parte negativa del tubo de rayos X y el ánodo es el lado positivo del tubo de rayos X que se caracteriza por ser el conductor eléctrico, proporcionar soporte mecánico al blanco y ser un buen conductor térmico.

1.7.7 Filtros

Son utilizados para reducir el efecto de la radiación difusa. Se coloca en la salida del tubo de rayos X o entre la muestra y la película, generalmente se utiliza una chapa de plomo o cobre, de un espesor tal que homogenice la energía de los rayos X.

- *Filtro colocado entre la fuente de rayos X y el objeto:* Se produce un endurecimiento efectivo de los rayos X incidentes, lo que ocasiona una pérdida de contraste de la imagen, sin embargo, suele estar contrarrestada con una reducción de la radiación difusa que aporta una decidida mejora en la calidad de la imagen.
- *Filtro colocado entre el objeto y la película:* Se produce la absorción de la radiación difusa que emerge del objeto. Es importante que el filtro que sea utilizado este exento de rayas u otras irregularidades ya que éstas se hacen visibles sobre la imagen y pueden dar lugar a errores de interpretación.
- *Calidad de los rayos X:* Va a depender fundamentalmente del poder de penetración de la radiación X la cual aumenta con la energía de los fotones. A excepción de energías muy altas, la relación entre la energía y poder de penetración es extremadamente compleja debido a que son varios los efectos que producen la absorción de los rayos X por materia, debido a ello se utiliza el concepto de coeficiente de absorción (μ).
- *Calidad de los rayos gamma:* En ambos casos es el aprovechamiento de un fenómeno idéntico aplicable para el uso radiográfico, variando únicamente la fuente utilizada para cada caso. Tanto los rayos X como los rayos gamma (γ) son ondas electromagnéticas de alta frecuencia y de gran poder de penetración, que poseen la común característica de producir imágenes latentes en emulsiones fotográficas. No pueden hacerse comparaciones generales entre ambos, ya que las características de los rayos X dependen de la potencia del aparato que las produce y las radiaciones gamma del isótopo del cual provienen.

1.8 Radiografía Industrial

1.8.1 Absorción de radiación

Se produce cuando la radiación atraviesa un material, o cuando la luz pasa a través de un medio diáfano, la absorción depende del espesor del material, de su naturaleza y de la longitud de onda.

1.8.1.1 Absorción de radiación Heterogénea: Los fenómenos que intervienen son complejos y dificultan la sencillez de los cálculos, los valores que se obtienen permiten la elaboración de un gráfico que está representado por una curva cuya pendiente va variando gradualmente en los primeros espesores hasta llegar al punto de homogeneidad. Este punto variará dependiendo de la naturaleza del material a examinar.

1.8.1.2 Absorción y radiación difusa: Este fenómeno va a estar determinado por los siguientes tipos de interacción:

- * Difusión de Rayleigh: tiene importancia a energías muy bajas ya que no representa propiamente una absorción sino una difusión, ya que no se origina debido a la desaparición de fotones ni a los cambios en su longitud de onda.
- * Efecto Thompson o Fotoeléctrico: Este efecto se produce cuando los fotones de energía relativamente baja pasan a través de la materia y la energía del fotón puede ser transferida totalmente a un electrón de una capa interna del átomo, dicho electrón se pondrá en movimiento con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón incidente y la energía de ligadura del electrón. Posterior a ello la transferencia de un electrón exterior a esta capa interna provoca la emisión de otro fotón menos energético que el incidente
- * Efecto Compton: Se origina cuando un fotón de mayor energía es desviado al interaccionar con un electrón libre de un átomo

receptor o electrones de valencia débilmente unidos, ocasionando así que parte de la energía del fotón se transfiere a estos electrones que son expulsados. Al mismo tiempo, los fotones disminuidos en la energía cedida son desviados de la dirección inicial y emergen de la colisión como radiación difusa de baja energía.

- * Producción de Pares: Ocurre solamente a elevados niveles energéticos (a partir de 1,02 MeV), en el cual el fotón de muy alta energía interacciona con el átomo y el campo eléctrico nuclear actuando como catalizador que desdobra al fotón en electrón negativo (que es atraído) y el positrón (que es repelido) y se aniquila inmediatamente con un electrón originando dos rayos gamma dirigidos en sentidos opuestos.

1.9 Formación de la imagen radiográfica

1.9.1. Pantallas reforzadoras

Son utilizadas para mejorar el rendimiento radiográfico de la cantidad de energía disponible en el haz de radiación, por medio de la reducción de los tiempos de exposición a valores razonables. Las pantallas reforzadoras pueden ser de dos clases:

- * Pantallas reforzadoras de plomo: Están confeccionadas con una delgada hoja de plomo, de estructura particularmente uniforme pegada a un soporte delgado como papel o cartón. Se emplean dos pantallas de plomo para permitir el paso de la radiación primaria y absorba en lo posible la radiación secundaria de mayor longitud de onda y menor penetración. El grosor de esta pantalla varía de 0,02 a 0,15 mm y el de la pantalla posterior es de 0,25 mm.
- * Pantallas reforzadoras fluorescentes o pantallas salinas: Están constituidas por un soporte delgado y flexible sobre el que se

extiende una capa fluorescente formada por microcristales de una sal metálica (normalmente wolframato cálcico). El fenómeno ocurre cuando la radiación incide sobre estas pantallas, el material fluorescente emite luz en una cantidad directamente proporcional a la intensidad de la radiación. Así la intensidad de luz que es emitida por las pantallas fluorescentes depende de la intensidad de la radiación y como consecuencia la pantalla ampliará el efecto de la radiación.

- * Pantallas fluorometálicas: Estas pantallas combinan la ventaja de ambas, ya que poseen una hoja de plomo entre el soporte y la capa fluorescente. El factor de refuerzo alcanzado con estas pantallas depende en gran medida de la sensibilidad espectral de la película a la luz emitida por las pantallas, del tiempo de exposición y de la temperatura.

1.10 Películas Radiográficas

La película radiográfica consiste en una suspensión de haluros de plata en una gelatina, que se extiende en forma de capa fina de aproximadamente 0,023mm, por las dos caras de una hoja-soporte, transparente y de acetato de celulosa; los granos de haluro de plata generalmente de cloruro y bromuro, son el componente sensible de la emulsión.

Las capas externas tienen como función proteger las capas de emulsión mas suaves, evitando que sean rayadas y las capas internas mantienen en suspensión los granos de haluro de plata que allí se encuentran. La imagen se forma cuando la radiación incide sobre las partículas de haluro de plata quedando así sensibilizado, sin embargo, no es posible distinguir en él ninguna modificación especial hasta que sea sometido a un tratamiento químico adecuado con un producto reductor (revelador), el cual ocasiona una descomposición del haluro en plata metálica y como consecuencia, se forma una imagen completa en la capa fotosensible. El número de partículas de plata liberada es mayor en los lugares en que ha incidido gran cantidad de radiación y es menor en las

zonas en que la acción de la radiación ha sido más débil.

1.10.1 Estructura de las películas radiográficas

Las películas radiográficas están constituidas por siete (7) capas

- un soporte de triacetato de celulosa o poliéster, (d)
- ambos lados del soporte contienen:
 - * una capa exterior de gelatina endurecida que protege la emulsión (a)
 - * una capa de emulsión compuesta principalmente de cristales de halogenuros de plata dispersos en gelatina (b)
 - * una capa muy delgada llamada substrato que asegura la adherencia de la emulsión al soporte (c).

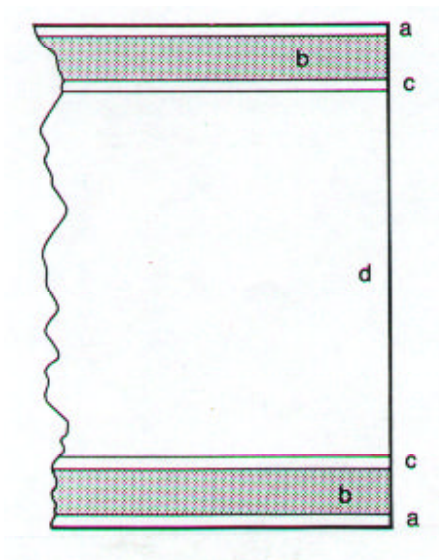


Fig. 1. Estructura de una película radiográfica

Las películas radiográficas convencionales tienen doble capa de emulsión lo que les confiere doble sensibilidad a la radiación, e imágenes más contrastadas.

1.10.2 Granularidad

Es la apariencia visual de falta de homogeneidad en la densidad de una radiografía procesada, es un valor de difícil medición y la mayoría de las veces no existen prácticamente datos cuantitativos de esta propiedad en las películas existentes.

La calidad de una imagen radiográfica depende de parámetros tales como granularidad, que solamente pueden ser medidos en laboratorios fotográficos especializados y cada tamaño de grano tiene sus ventajas y desventajas, por ejemplo, el grano grueso tiene la ventaja de absorber la energía rápidamente debido a que tienen una mayor concentración de plata en la emulsión, esto sucede, porque los granos más gruesos son relativamente más grandes y por ende poseen mayor exposición de los granos de plata a los rayos, reaccionando así a una mayor velocidad en la formación de la imagen, requiriendo menor exposición. La velocidad es la ventaja de las películas de grano grueso y la falta de habilidad para resolver detalles finos es su desventaja y por el contrario, los granos finos poseen la ventaja de resolver detalles muy fino y como desventaja, es la baja velocidad en la formación de la imagen.

1.10.3 Tipos de películas

La mayoría de los fabricantes de película radiográfica ofrecen una gama de filmes para uso con pantallas reforzadoras metálicas o sin pantallas, conociéndose como “radiografía directa” o “sin pantallas” y se clasifican basándose en la rapidez, contraste y tamaño de grano, como se indica a continuación:

- * Películas de tipo directo, de grano muy fino, alto contraste y baja velocidad: Son utilizadas para trabajos de gran precisión de objetos muy finos, de los cuales se quiere obtener indicaciones de detalles muy pequeños. Las imágenes obtenidas pueden ser observadas en el microscopio con ampliificaciones de hasta 40 ó 50 veces su tamaño. Son conocidas como Tipo 1.
- * Películas de tipo directo, de grano fino, alto contraste y velocidad media: En esta clasificación es que se encuentran la mayor parte de las películas usadas en Radiografía Industrial. Se utilizan en la radiografía y gammagrafía de objetos ligeros y pesados de espesores medios, casi siempre en combinación con hojas reforzadoras metálicas. Estas películas son conocidas como Tipo 2.
- * Películas de tipo directo, de grano y contraste medios y alta velocidad: Son apropiadas para trabajos relativamente bastos, en la radiografía de grandes espesores, de materiales medios o pesados. Por lo general se emplean con pantallas reforzadoras metálicas gruesas y suele ser conveniente filtrar la radiación. Estas películas son conocidas como Tipo 3.

Se consideran películas de tipo directo aquellas emulsiones que se impresionan directamente por la acción de los rayos X o gamma, en tanto que las películas de tipo indirecto son las que se impresionan por la luz azul-violeta de fluorescencia inducida por dichas radiaciones en placas de volframato de calcio, puestas en contacto directo con la película.

1.10.4 Elección del tipo de película

Dependen de una combinación de factores tales como el tipo de material a ser radiografiado y su espesor, la fuente de radiación, volumen de trabajo, grado requerido de sensibilidad, entre otros factores. Para usos particulares el factor más importante para la selección adecuada de la película es el tamaño

de grano. Los racimos de granos visibles están presentes en mayor o menor grado en toda película procesada, pero los racimos de granos gruesos son más fáciles de ver que los de grano fino, pero a pesar de ello, la imagen es menos definida.

1.10.5 Almacenamiento de las películas

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.

1.10.6 Prueba de las luces de seguridad

Las películas deben manejarse bajo las condiciones de luces de seguridad recomendadas por el fabricante. Deben ser manipuladas con luz inactiva, con luz de seguridad rojo-naranja o verde, que es la adecuada para películas radiográficas. La distancia entre la película y la luz de seguridad y el tiempo que puede estar expuesta dependen de la rapidez de la película utilizada.

1.10.7 Limpieza y manejo de las películas

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 procesamiento de la radiografía, sino porque también la suciedad puede ser transferida a la mesa de carga y subsecuentemente a otra película o pantalla, así mismo 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 evitan la contaminación química. Hay que tener muy en cuenta que las películas deben

manejarse sólo por sus orillas, con las manos limpias y secas, de no ser así quedarán impresas huellas digitales afectando el resultado final.

1.11. Efectos Geométricos

Si se quiere obtener una radiografía con una nitidez satisfactoria es necesario tomar en consideración los principios fundamentales de la formación de la sombra o imagen radiográfica, así como las posiciones relativas entre la fuente de radiación, objeto y película, y la dirección del haz de rayos con respecto al objeto y al plano de la película, los cuales ejercen una influencia notable sobre la apariencia de la imagen radiográfica.

Los fenómenos de distorsión de la imagen se pueden controlar manipulando correctamente la posición relativa del foco emisor de la radiación, el objeto y la pantalla. Por lo general, lo que se busca es que el haz de radiación sea perpendicular a la pantalla o película, y que ésta, a su vez, sea paralela al objeto radiografiado.

Entre los fenómenos de distorsión de la imagen se encuentran:

1.11.1 Penumbra Inherente

La penumbra inherente o penumbra de la película, se origina como resultado de la incidencia de los rayos X en la emulsión fotográfica, en la cual se liberan electrones que se proyectan en todas las direcciones y hacen revelables otros cristales de halogenuro de plata que se encuentran cercanos, ocasionando así, en el momento del revelado la formación de granos de plata no sólo en las porciones de la película que se expusieron a la radiación, sino también (aunque en menor grado) en un volumen de emulsión alrededor del punto que recibió la exposición directa. Si se trabaja con una energía de radiación lo suficientemente elevada, también se producirá una penumbra inherente, a pesar de la ausencia de la penumbra geométrica.

1.11.2 Penumbra Geométrica

Es una pequeña difuminación en los bordes de las películas, las cuales son generadas por los tubos de rayos X y las fuentes radioactivas debido a las dimensiones finitas del foco o del tamaño de la fuente. La penumbra geométrica puede ser obtenida mediante la siguiente fórmula:

$$Pg = \frac{F \times d}{(D - d)} \quad (1)$$

Donde: F = diámetro efectivo de la fuente de radiación

D = distancia fuente-película (d.f.f.)

d = distancia defecto-película.

El valor máximo de Pg corresponde a un defecto situado a la máxima distancia de la película, en el cual $d = e$ y se puede obtener por medio de la siguiente la fórmula:

$$Pg(\max) = \frac{F \times e}{(D - d)} \quad (2)$$

Donde “e” es el espesor del objeto.

Al realizar la radiografía es necesario tomar todas las precauciones pertinentes ya que si aumentamos la distancia fuente-film la penumbra geométrica puede ser reducida, sin embargo, si se aumentan innecesariamente esta distancia se aumentaría excesivamente el tiempo de exposición. De igual forma si se aumenta la distancia defecto-película la penumbra geométrica aumenta también.

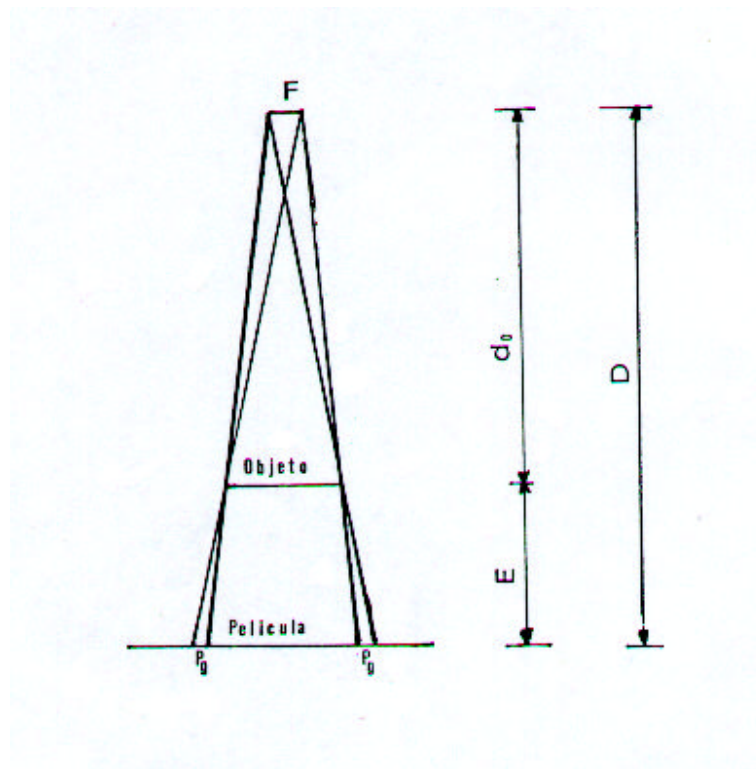


Fig. 2. Penumbra Geométrica

1.11.3 Penumbra Total

Se toma en cuenta cuando se desea obtener la mejor sensibilidad, en lo que respecta a la detección de grietas finas, esta penumbra es la combinación de la P_g y la P_i (penumbra inherente); estos parámetros no son directamente aditivos, sino que se combinan de forma compleja, es por ello, que si uno de los dos valores de penumbra (U_g o U_i) es más del doble que el otro, la penumbra total es igual al valor aislado mayor y si ambos valores son sensiblemente iguales, la penumbra total es aproximadamente 1,3 veces el valor de cualquiera de ellos. La penumbra total está determinada por la siguiente fórmula:

$$P_t = P_g + P_i \quad (3)$$

1.11.4 Elección de la distancia fuente-película

Para obtener una radiografía tan nítida como sea posible la penumbra total debe ser mantenerse al mínimo, para ello es necesario conocer el valor de la penumbra inherente, ya que a partir de ello se calcula la radiación que se utilizará y por ende se podrá calcular el valor de la distancia foco-película por medio de la siguiente fórmula:

$$D = \frac{e \times (U_t + F)}{U_t} \quad (4)$$

Donde F es el diámetro efectivo del foco (mm).

Es recomendable reducir la Pg a valores muy pequeños, generalmente por debajo del valor de la Pi., ya que siempre se cuenta con la presencia de la penumbra de la imagen en la película.

1.11.5 Ley de la inversa del cuadrado de la distancia

La intensidad de la radiación por unidad de área de película, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia fuente-película (dff).
Fig.3.

1.11.6 Consideraciones sobre la distorsión de la imagen

En las radiografías los objetos tridimensionales están representados en un plano bidimensional que es la película. Es por ello que la reproducción del objeto va a depender de la orientación de la proyección, es decir, un defecto puede verse de forma alargada o circular dependiendo del ángulo de proyección, es por ello que generalmente el haz de radiación debe incidir perpendicularmente en la película y las muestras en contacto directo con el chasis, a menos que sea un caso particular en donde las proyecciones se realizan con ángulos especiales. Fig.4.

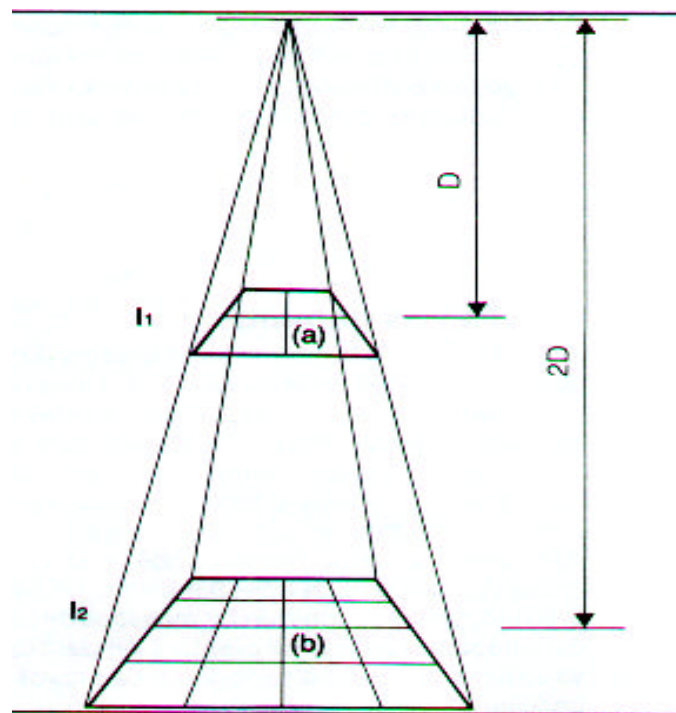


Fig. 3. Ley de la inversa del cuadrado de la distancia

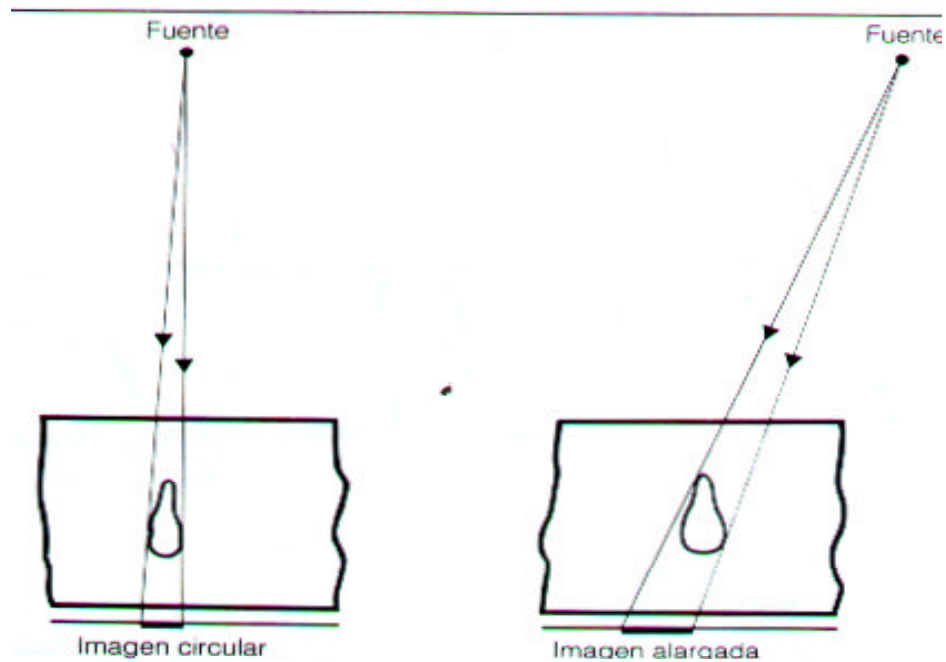


Fig. 4 Distorsión de imagen

1.12 Proceso de películas radiográficas.

Para obtener una radiografía satisfactoria, debe tenerse el mismo cuidado empleado tanto al hacer el procesado como al efectuar la exposición, la técnica radiográfica más cuidadosa puede ser infructuosa si se hace un proceso incorrecto en el cuarto oscuro.

1.12.1 Proceso Automático

El procesador mantiene la solución química a una temperatura adecuada, agita, abastece las soluciones automáticamente y transporta las películas mecánicamente a una velocidad controlada cuidadosamente a través del ciclo de procesado.

1.12.2 Proceso Manual

El procesado manual consiste en cubas o tanques de suficiente profundidad para que puedan ser introducidas las películas a revelar. Para iniciar el proceso, se saca la película ya expuesta de su chasis porta-película y se introduce en un marco especial para el proceso o se sujeta por sus esquinas a un marco en el que se mantiene la película bajo una cierta tensión para evitar que se doble, retuerza o arrugue al manipularla. Una vez sujeta la película a estos marcos está lista para realizar el proceso.

Para poder aplicar el revelado es necesaria la aplicación de ciertos productos químicos entre los cuales se encuentran:

- * El revelador es una solución acuosa o una combinación química de varios elementos, cada uno de los cuales tiene una función especial y en conjunto reducen los haluros de plata expuestos a la plata metálica; está constituido por otras sustancias que tienen diferentes misiones, como la de afinar y regular el proceso de revelado, permitiendo así la penetración de los otros componentes del revelador a la capa protectora y finalmente a la emulsión.

- * **Acelerador:** Es un producto químico que confiere al baño un carácter alcalino, aumentando así la actividad del revelador. Entre los componentes del acelerador se encuentran: Carbonato sódico, carbonato potásico, bórax, hidróxido sódico, hidróxido potásico.
- * **Conservador:** Es la sustancia que protege al revelador de la oxidación por el aire y evita la formación de productos de oxidación coloreados durante su preparación y uso, está constituido por sulfito sódico, de reacción alcalina. En ciertos reveladores es superflua la adición de otras sustancias que proporcionen la reacción alcalina que necesita el baño.
- * **Retardador:** Permite que la aparición del velo de revelado sea tardía y por ende evita que alcance un nivel molesto. El velo de revelado se forma debido a que los reveladores actúan en pequeñas proporciones, sobre los granos de halogenuros de plata no afectados por la luz o la radiación. Está constituido principalmente de bromuro de potasio.
- * **Fijador:** Se utilizan soluciones concentradas o en polvos. Los fijadores tienen como función quitar de la emulsión los núcleos sensibles de haluro de plata que no han sido expuestos y que permanecen en la emulsión, evitando así que la imagen final sea afectada.

Una vez que se tienen todos los elementos a utilizar a realizar el proceso de revelado, el cual consiste en cinco tanques con las siguientes secuencias:

- * **Revelado:** es un proceso químico reductor mediante el cual los haluros de plata activados por la acción de la radiación son reducidos a plata metálica, formando así la imagen latente. Una vez que se tiene sujeta la película, se introduce en el revelador, simultáneamente se tomará el tiempo que por lo general se encuentra entre un rango de 3 a 7 min, dependiendo del tipo de película utilizada.
- * **Baño de parada:** Una vez concluido el tiempo estipulado en el baño de revelado, la película se saca de dicho baño y se introduce al baño

de parada, donde se eliminan las pequeñas cantidades de revelador que trae consigo la película. Este baño es una solución de ácido acético en agua o en su defecto se puede utilizar agua y la película se sumerge en el tanque o cubeta por un tiempo de 2-4 min.

- * Fijado: Tiene como función asegurar la permanencia de la imagen formada en el revelado, al eliminar de la emulsión los halogenuros de plata no reducidos. La película tiene un aspecto lechoso una vez retirada del baño de parada el cual desaparecerá en el fijador y las partes claras de la película se vuelven transparentes. Es recomendable aplicar el baño fijador de 5-8min para obtener una transparencia satisfactoria.
- * Lavado final: Se busca remover los complejos solubles de plata formados en la emulsión por el fijado; para ello se sumerge la película, colocada en su marco, en agua corriente de modo que la superficie de toda la película esté en contacto con el agua que se cambiará constantemente para evitar la formación de gotas de agua sobre la película, las cuales originan la formación de bandas o rayas durante el secado. La duración del lavado dependerá de la temperatura del agua, cuanto más caliente esté el agua más fácilmente se disolverán los complejos de plata.
- * Secado: Es la última etapa del proceso. Las películas se colocan en un marco o colgador en un armario secador, para evitar la formación de gotas que a veces se deslizan sobre la película debido a la tensión superficial, ya que si se formasen las gotas, la emulsión se secará más lentamente y por ende se formarán manchas de secado.

1.12.3 Efectos de la condición de revelado en la película

El proceso de revelado tiene gran influencia sobre la curva característica de un film y sobre las características sensitométricas, es por ello que se debe tener presente los siguientes factores:

- * Tiempo de revelado: Está determinado por la óptima relación contraste-velo, por esta razón no es recomendable prolongar el revelado hasta el límite, tratando de obtener el contraste máximo que puede dar la película.
- * Temperatura de revelado: Cuando el proceso de revelado se realiza manualmente es recomendable utilizar las mismas condiciones de trabajo con el fin de mantener constante la técnica de exposición, por lo general se revela a una temperatura de 20°C (68 °F) por un tiempo de 5 minutos. Si se aplican temperaturas superiores se obtiene un velo excesivo, también se debe tenerse presente que la oxidación del revelador aumenta rápidamente por encima de 20 °C. Así mismo una temperatura excesivamente alta puede originar reticulación, vulnerabilidad a los arañazos o reblandecimiento de la emulsión. Si la temperatura es inferior a 18 °C (64 °F) la hidroquinona (el ingrediente que da el contraste) se inactiva considerablemente.
- * Actividad del revelador: El velo químico, la granulometría, la rapidez efectiva y el contraste de una película, son afectados por la actividad del revelador. Si se aplica un incremento rápido del revelado se genera un aumento del contraste y rapidez. Hay que trabajar con mucho cuidado ya que el aumento del revelado ocasiona un aumento en el nivel del velo y por ende una disminución del contraste.
- * Agitación: Una vez introducida la película en el revelador debe mantenerse en constante agitación durante los primeros 30 segundos de fijado, con el objeto de romper y desprender las posibles burbujas de aire adheridas a la superficie del film y para asegurar la

penetración homogénea del revelador en todas las zonas de película. La película debe agitarse cada minuto para asegurar un buen revelado y si se aplica una agitación constante debe reducirse ligeramente su tiempo de revelado.

1.13 Curvas de las películas radiográficas

1.13.1 Curvas características

Son las curvas que nos permiten tener un mejor conocimiento de las películas y sus posibles aplicaciones, se realizan por medios de exámenes cuantitativos y nos indican la relación existente entre la exposición aplicada a una película y su densidad, realizadas por medio de condiciones de procesamiento normalizadas y establecidas.

- Construcción de la curva: Las exposiciones son realizadas manteniendo constante la intensidad de la radiación y variando el tiempo, de tal forma que la zona de la película que se desea examinar reciba una exposición cuyo tiempo sea doble de la anterior. Después del revelado, se miden las densidades (D) obtenidas por medio de un densitómetro y se representan en función de los valores logarítmicos de las exposiciones correspondientes, y por último se unen los puntos obtenidos por una línea continua.
- Forma de la curva característica: Generalmente tiene forma de una S alargada y oblicua. Como se muestra en la fig. 5;

Se puede apreciar las diferentes zonas de la curva:

- Pie o talón: Es la parte inferior (ab) de la curva, nos indica la zona plana, en la cual la densidad no aumenta sobre el velo sino hasta un determinado valor de la exposición.

- Tramo rectilíneo: Es la parte media (bc) de la curva, nos indica el aumento de la exposición que da lugar a pequeños incrementos de la densidad.
- Hombro: Es la parte superior de la curva (cd), por lo general su densidad es superior a 4 por lo cual no se considera ya que esta densidad es demasiado alta para la potencia luminosa del negatoscopio.

Densidad

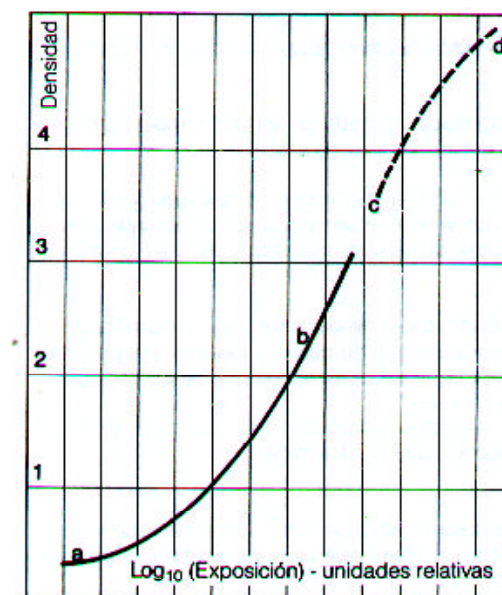


Fig. 5 Curva característica de una película radiográfica, expuesta a rayos X

1.13.2 Contraste

Todas las radiografías deben examinarse en condiciones adecuadas y cuando esto sucede, el observador puede notar un flujo luminoso difuso del aparato iluminador o negatoscopio, siendo atenuado en función de la opacidad de las diversas zonas de la imagen, lo que percibe el observador es el flujo pasante a través de dichas zonas como un brillo, por lo tanto podemos concluir que el contraste es la relación que existe entre la intensidad luminosa de la imagen y la del fondo adyacente.

1.13.3 Gradiente

Es la pendiente en un punto de la curva característica y es igual a la tangente trigonométrica a la curva en ese punto (Y/X en la Fig.5), esta pendiente se llama gradiente del film en la densidad D , GD , y algunas veces se llama “contraste de la película”. El gradiente para las curvas $G-D$ es directamente proporcional a la densidad e irá aumentando hasta densidades mayores que las que se pueden alcanzar a ver en un negatoscopio convencional. Cuando una película aumenta notablemente los contrastes de la imagen se la suele denominar “de alto contraste” o “dura”, en caso contrario se denomina “suave”.

1.13.4 Exposición

Es la dosis de radiación que incide en la emulsión sensible, es decir, la intensidad (I) de la radiación incidente, multiplicada por el tiempo de exposición (t).

$$E = I \times t \quad (5)$$

1.13.5 Diagrama de exposición

Es la relación que existe entre el espesor del objeto, expresado en milímetro (mm) y los valores de exposición expresados en kV y mA*min. Y determina: una determinada densidad, un determinado material y una determinada película. La elaboración de un diagramas de exposición se podrá realizar satisfactoriamente siempre y cuando se conozcan la características que se mencionan a continuación:

- Tipo de aparato radiográfico: El diagrama de exposición va a depender de la tensión, la forma de la curva de tensión (que depende del circuito), de los límites entre los cuales se puede regular la tensión, y la intensidad de corriente (en mA) que atraviesa el tubo.
- La fuente: En el cual se tomará en cuenta la radiación emitida y el período de dicha fuente.
- Filtro: Influye en gran parte sobre la calidad de radiación.
- Distancia foco-película: Cada diagrama será único para una distancia foco-película, ya que si ésta es alterada, tendrán que realizarse nuevos cálculos basados en la ley del cuadrado de la distancia.
- Material: Cada material va a tener características diferentes y por ende una absorción específica característica.
- Pantallas reforzadoras: Las pantallas utilizadas deben ser de la misma naturaleza y del mismo tipo que las empleadas al calcular el diagrama.
- Tipo de película: Debe ser establecido y dar sus especificaciones, ya que las películas se van a diferenciar por su rapidez y gradación.
- Densidad: Se tiene que definir correctamente ya que la elaboración adecuada del diagrama va a depender de ello.
- Condiciones de revelado: El tiempo, temperatura y composición del revelado deben estar definidos correctamente ya que la elaboración del diagrama va a depender de estas repetitivas condiciones.

1.13.6 Elaboración de un diagrama de exposición

Para obtener estos gráficos, es necesario disponer de una placa del mismo material que se ha de radiografiar, en la que se han tallado en forma de escalera, una serie de espesores diferentes; cuyo aumento entre cada peldaño y el siguiente es constante y varía de un material a otro, desde 0,5 mm a varios milímetros, y dependerá de la potencia del equipo de rayos X para el cual se va a construir el gráfico.

La radiografía de esta placa se realiza con una tensión determinada, empleando una distancia foco-película conveniente, con el tipo de película y pantallas para las cuales el gráfico ha de ser utilizado, y haciendo una serie de exposiciones que proporcionen sobre la radiografía una amplia gama de densidades. Por ejemplo, para exámenes con tensiones en el tubo inferiores a 175 kV el espesor de cada playa o peldaño puede aumentar en 0,5 o 1 mm, mientras que para radiografías con tensiones en el tubo superiores a 175 kV el incremento ha de ser del orden de 2 ó 3 mm. Además, deberá disponerse de algunas planchas bien planas del mismo material (para el que se establecerá el diagrama) y de grosor determinado (por ejemplo 10 mm); Si los grosores de los peldaños van, por ejemplo, de 0,5 hasta 10 mm, los grosores de la cuña mas una plancha de 10 mm, darán un margen de grosores de 10,5 a 20 mm.

1.13.6.1 Diagrama preliminar: Suministran los datos necesarios para establecer el diagrama de exposición, y se realizan por medio de las densidades obtenidas, las cuales se representan gráficamente en función del grosor del material con las que se han obtenido; uniéndose los puntos correspondientes a una misma tensión, con una línea.

1.13.6.2 Diagrama intermedio: Son realizados con la finalidad de eliminar cualquier error eventual, y para ello se emplean los datos obtenidos en el diagrama preliminar, y para su realización, se coloca en las abscisas los grosores (en mm) y en ordenadas las tensiones del tubo

(en kV); y por último se unen los puntos referentes a una misma serie de exposiciones. La continuidad de las curvas obtenidas, debe ser regular, y cualquier irregularidad indica un error en los diagramas preliminares.

1.13.7 Construcción del diagrama de exposición

Se emplea papel semilogarítmico, cuya escala de ordenadas sea logarítmico y la de abscisas aritmética. En las abscisas se representan los espesores en mm del material, y en la ordenada los valores de exposición, en mA.min; Los valores de los espesores (en mm/min) para una tensión determinada se calculan partiendo del diagrama intermedio, en función de la radiación aplicada y de los espesores utilizados, estos valores son colocados debidamente en el papel milimetrado trazando así la curva obtenida.

1.13.8 Calculo de la exposición

Los tiempos de exposición, las intensidades de radiación y las distancias, se rigen por relaciones aritméticas, las cuales son:

- Relación entre intensidad y tiempo de exposición: Se conoce como exposición o dosis, suele expresarse en miliamperios; aunque no hay inconveniente en hacerlo en cualquier otra unidad proporcional a éstas, como por ejemplo el Röntgen; se puede establecer una relación ya que la cantidad de radiación es directamente proporcional al tiempo de exposición, lo cual se refleja en la fórmula 5, mostrada anteriormente.
- Relación entre intensidad y distancia: La intensidad de la radiación en un punto varía en inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de dicho punto a la fuente emisora de la radiación. Se puede relacionar a través de la siguiente fórmula:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (6)$$

Donde I_1 = Intensidad de la radiación en la posición d_1

I_2 = Intensidad de la radiación en la posición d_2

d_1 = Distancia menor

d_2 = Distancia mayor

- Relación entre la distancia y el tiempo de exposición: El tiempo de exposición requerido para una exposición es directamente proporcional al cuadrado de la distancia, lo cual se puede demostrar a través de la siguiente fórmula:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (7)$$

- Relación entre la distancia y la exposición: Las exposiciones son directamente proporcionales al cuadrado de la distancia y como consecuencia los miliamperios o intensidades también lo serán. Se puede comprobar por medio de la siguiente fórmula:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (8)$$

- Relaciones entre todos los parámetros anteriores: La combinación de las relaciones ya conocidas, conduce a la siguiente fórmula: de la ecuación (5) que $E=I*t$, podemos sustituir en la ecuación (8) y obtenemos:

$$\frac{I_1 \times t_1}{d_1^2} = \frac{I_2 \times t_2}{d_2^2} \quad (9)$$

- Relación entre exposición y densidad radiográfica: Esta relación sólo se puede determinar conociendo las características de la película utilizada, es por ello que es importante conocer la curva de sensibilidad de la película. Para el uso correcto de estas curvas, conveniente aclarar el sentido de las unidades del eje de abscisas; ya que no se trata del logaritmo decimal de exposiciones en valor absoluto (por ejemplo en mA * mm, en R * mm), sino de los valores proporcionales a exposiciones absolutas, es decir, de los valores relativos de exposición, como se muestra a continuación:

$$\frac{E_2}{E_1} = \text{ant}[\log(D_2) - \log(D_1)] \quad (10)$$

Donde D_1 = densidad menor

D_2 = densidad mayor

- Relación entre la exposición y la naturaleza y espesor del material radiografiado: Es posible calcular la exposición necesaria para un cierto material, cuya composición, coeficientes de absorción y espesor son conocido, sin embargo resulta algo tedioso seguir los métodos de cálculos tradicionales, es por ello que resulta más cómodo, fácil y rápido utilizar reglas de confección empírica, ya que nos proporcionan resultados exactos. Estas reglas o tablas deben construirse para cada equipo y para cada fuente, así como debe especificarse el tipo de película a utilizar. Entre los métodos más utilizados encontramos:
- * Primer método: consiste en radiografiar una probeta del material cuya carta de exposición nos interesa, esto se realizará a tensión constante sobre una misma película, y cuyos tiempos irán en

aumento, tal que, cada exposición duplique su tiempo respecto al anterior. Como la probeta es una gradilla con escalones de espesor conocido, en la imagen final se obtendrá una serie de escalas de grises en las que quedarán relacionados tiempos de exposición y los espesores de material.

- * Segundo método: Las gradillas son radiografiadas a diversas tensiones y se mide la densidad correspondiente a cada uno de los escalones, posteriormente se utiliza la curva densitométrica de la película, y se determinan las exposiciones (relativas) que corresponden a cada densidad, por último se calculan las demás exposiciones dependiendo de sus valores relativos. Estos valores son llevados al gráfico, los cuales se van a relacionar con los espesores del material, obteniéndose el abanico o tabla.

1.13.9 Utilidad del diagrama de exposición

Ayuda a facilitar la elección del método de trabajo más apropiado, brindando así un rendimiento de tiempo y garantizando la eficacia; también se evitan, errores por empirismo en los trabajos que surgen fuera de la rutina diaria, debido a que los diferentes equipos radiográficos pueden dar en la práctica resultados diferentes aun siendo del mismo tipo

1.14 Control de la calidad de imagen

La calidad de la imagen radiográfica es un término relativo, sin embargo, podemos considerar una radiografía que haya sido obtenida en optimas condiciones y utilizarla como patrón, es decir, podemos definir la calidad de las otras radiografías basándonos en este modelo. Como ya se ha venido estudiando, la calidad radiográfica es afectada por diversos factores, los cuales se pueden dividir en dos ramas:

- Los factores que afectan la definición, que son aquellos como el grado de nitidez, que se encuentran en los bordes de las imágenes correspondientes.
- Los factores que afectan al contraste, que es la diferencia de luminosidad que percibe el observador entre dos partes más o menos oscuras de la imagen radiográfica.

1.14.1 Sensibilidad

Es la capacidad que posee una radiografía para mostrar claramente detalles de un determinado tamaño relativo y se determina colocando sobre el objeto que se radiografía una serie de placas delgadas de diferentes espesores, las cuales están hechas con el mismo material del objeto a radiografiar, sus dimensiones deben estar especificadas y normalizadas. La sensibilidad radiográfica se define como:

$$\%S = \frac{e}{t} \times 100 \quad (11)$$

Donde e = espesor de la placa más delgada visible, colocada sobre el objeto.

t = espesor del objeto

1.14.2 Sensibilidad radiográfica (S)

Este valor (%S), se denomina “sensibilidad de espesor porcentual” o “sensibilidad de espesor”, el cual implica que el espesor adicional se coloca en el lado del objeto más alejado de la película; si por el contrario se coloca del lado de ésta, se obtendrá un valor diferente para la sensibilidad.

1.14.3 Indicador de Calidad de Imagen (ICI)

Esta denominación sustituye al término de penetrámetro utilizado anteriormente, y es un pequeño dispositivo constituido por un material de naturaleza idéntica, o de propiedades similares al poder de absorción de la radiación del objeto que se radiografía. Debe poseer las siguientes características:

- El método de lectura de su imagen debe ser lo más sencillo y concreto posible, es decir, su interpretación debe ser siempre la misma, el valor obtenido para la sensibilidad ha de ser correcto y exacto, sea cual sea la persona que efectúe dicha lectura.
- Ha de ser versátil y de aplicación sencilla.
- El indicador se deberá poder utilizar en todo tipo de superficies, tanto planas como curvas y también sobre aquellas que presenten un cierto grado de rugosidad.
- Debe ser pequeño
- Ha de ser económico y de fácil normalización.

1.14.4 Tipos de Indicadores de calidad de imagen

Los indicadores de calidad de imagen consisten en una serie de hilos delgados de diferentes diámetros o en series de pequeñas planchas de grosores diferentes, perforadas con pequeños orificios de diversos diámetros. Con el paso del tiempo han sido propuestos varios tipos de ICI, pero actualmente solamente subsisten tres modelos: el indicador de hilos (usado en la mayoría de países europeos), el modelo de peldaños/orificios (usado principalmente en Francia), el de placa/taladro (utilizado en USA), y un nuevo tipo aun no ampliamente usado: el modelo dúplex de hilo. Los diversos indicadores de imagen utilizados son:

- * Indicadores de escalerilla: consisten en gradas o escalerillas talladas, cuyo material tiene absorción frente a los rayos X, semejante a la que

posee el material del objeto que se radiografía; Es importante tener el conocimiento exacto de la altura o grosor de los escalones de la escalerilla para poder utilizarlos al momento de evaluar la calidad de la imagen. En el mercado se cuentan con tres tipos de ICI de escalerilla (fig.6), y estos son:

- Con taladros en la gradilla de diámetro, no relacionados con el espesor de los escalones.
- Con taladros de diámetro igual (o proporcional) al grosor del escalón que se está taladrando; la lectura se realizará midiendo el diámetro del agujero más pequeño visible, que es el grosor del escalón correspondiente.
- Con taladros formando letras, dibujos, cifras, entre otros, en cada uno de los escalones.

* *Indicadores de agujero:* Consisten en pequeñas placas planas del mismo material de la muestra a examinar, y cuyo grosor esta perfectamente determinado por medio de orificios que se han taladrado; los diámetros aumentarán en progresión geométrica, siendo, generalmente el diámetro más pequeño, el espesor de la placa. Para que la imagen de un determinado peldaño sea considerada como visible, es necesario que todos los agujeros de este peldaño sean visibles sobre el film. Fig.7.

El indicador se coloca sobre la pieza y en el lado de la fuente; esto se hace para cada radiografía, se anota el número de agujeros (a) visibles en la radiografía y el número de agujeros (b) que serían visibles si el límite de visibilidad fuera el agujero cuyo diámetro es igual o inmediatamente superior al 5% del grosor del material examinado; entonces podemos calcular el índice de visibilidad (N), que viene dado por la fórmula:
$$N = \frac{a}{b} \dots \dots \dots (12).$$
 El valor de N puede ser negativo, nulo o positivo y la calidad de imagen mejora cuando el valor de N aumenta.

- * *Indicadores americanos:* Consisten en pequeñas planchas metálicas (de acero, aluminio, cobre, magnesio, etc.) cuyo grosor es generalmente igual al 2% del material a radiografiar; los indicadores se construyen taladrando a cada placa tres agujeros de diámetro T, 2T, 4T, siendo T el grosor de la placa; hay que tener presente que debe haber un límite que no se puede sobrepasar, por ejemplo, en las placas delgadas los diámetros mínimos son 0,01", 0,02", 0,04" y no los valores de T, 2T, 4T; también hay que asegurarse que las placas sean del mismo material de la muestra. Por lo general, el grosor que se usa para la placa es del 1% ó 2% de la muestra. Fig.8.
- * *Indicadores de hilo:* Estos tipos de indicadores están constituidos por una serie; la cual está conformada por tres indicadores y éstos a su vez por siete hilos, cada uno paralelos y equidistantes cuyos diámetros, de los hilos sucesivos, mantienen una relación constante, es decir, los diámetros seguirán una progresión geométrica; y la calidad de imagen estará determinada por el hilo más fino cuya imagen es distinguible sobre la imagen en el negatoscopio. Fig.9.
- * *Indicadores de hilos dúplex:* Este tipo de indicadores fue desarrollado por el "Central Electricity Research Laboratories" (CERL) en el Reino Unido; dando a conocer un nuevo concepto de ICI, el aporte de estos indicadores es que los elementos duplex proporcionan imágenes de alto contraste sobre las que se pueden hacer medidas de penumbra. Se elaboran por medio de dos objetos de ensayo diferentes, una cuña rectangular de peldaños y unas parejas de hilos o tiras duplex situadas muy próximas entre sí; el material que se utiliza es de la misma naturaleza que el objeto a examinar, permitiendo así medidas de contraste independientemente de las variaciones de penumbra

Las parejas de hilos o de barras finas metálicas de alta densidad, varían sus grosores gradualmente en progresión

geométrica, permitiendo así su uso en la radiografía de todos los materiales, los elementos tienen aproximadamente 15 cm de longitud y están montados en plástico rígido moldeado, próximos a una de las superficies; esta cara es diferenciable porque tiene un color diferente al resto de las caras.

Este tipo de indicadores tiene un costo de producción muy elevado, en comparación a otros tipos de indicadores, sin embargo, nos proporciona información que el resto de los indicadores no dan; y al igual que muchos indicadores, también tiene sus limitaciones, como por ejemplo, que no es apropiado para muestras delgadas o técnicas de baja energía, debido a que la menor borrosidad que puede ser medida es de 0,01mm, por otro lado, no siempre se puede usar sobre superficies curvas, tales como soldaduras en oleoductos o gasoductos, como consecuencia de la rigidez de su construcción.



Fig. 8..Indicador de Esterilla



Fig. 7. Indicador de Agujero

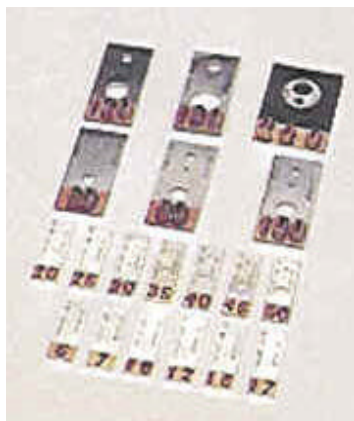


Fig. 6. Indicadores Americanos

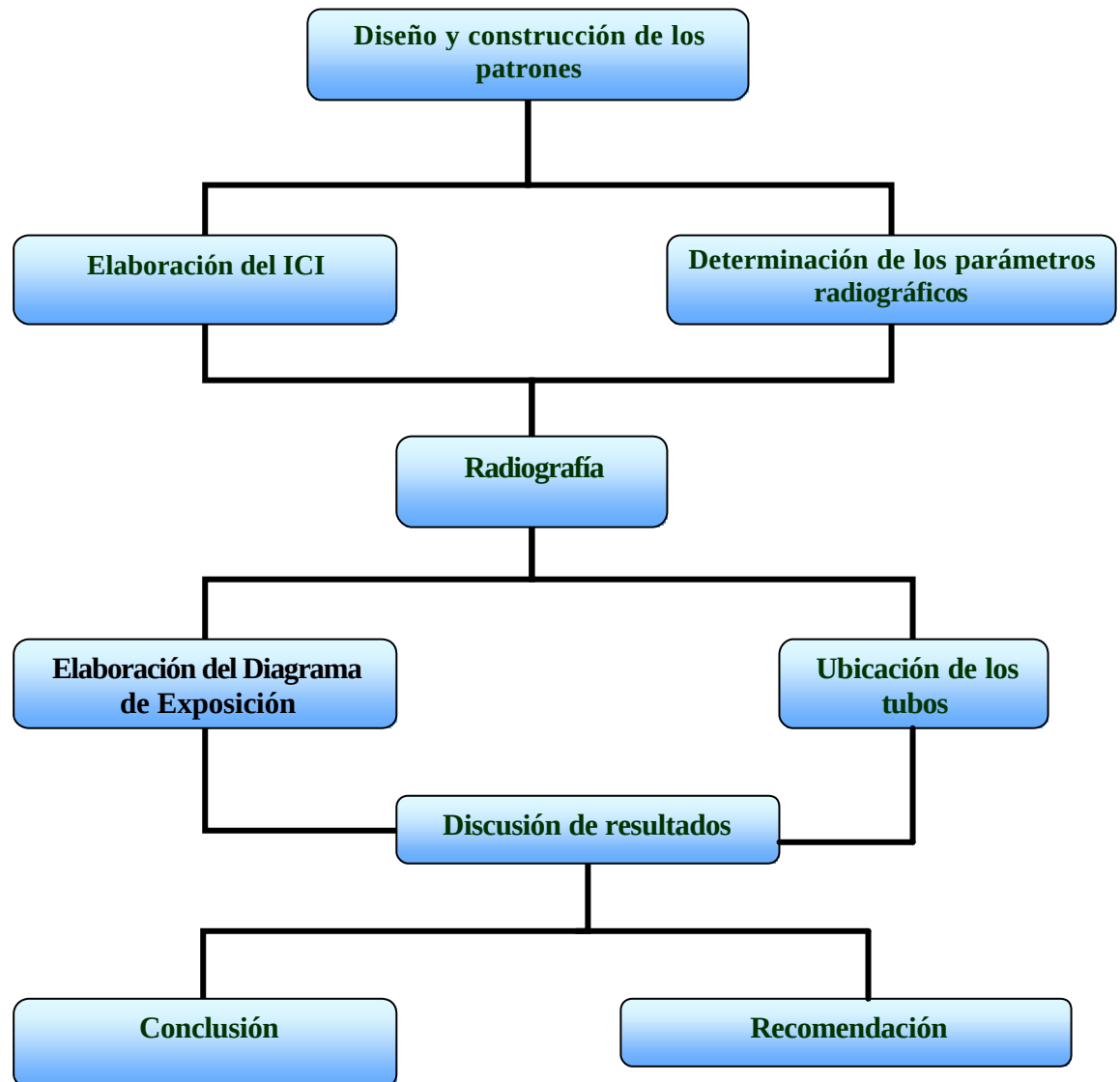


Fig. 9. Indicadores de Hilo

CAPITULO II

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Organigrama del Trabajo



2.2 Material utilizad

- Tablas de madera
- Tubos PVC
- Clavos
- Cemento
- Arena lavada
- Finos
- Gruesos
- Películas radiográficas
- Revelador
- Fijador

2.3 Preparación de los Patrones.

- Los espesores utilizados en la fabricación de los patrones fueron de 12, 16 y 20 cm, respectivamente, tomando como referencia los espesores de las paredes de concreto utilizadas frecuentemente en el campo de la construcción. Los valores de altura y longitud se mantuvieron constantes, simulando así las medidas estándares de los bloques de cemento.
- Una vez que se definieron los valores de los espesores, se procedió a la elaboración de los encofrados. Para el desarrollo de nuestro trabajo, se consideró la fabricación de dos grupos de patrones: El primer grupo (Fig.10), se realizó con la finalidad de construir un diagrama de exposición, para este material ya que no se cuenta con esta información. Para ello se disminuyeron los valores de altura, longitud y espesor, obteniendo así patrones de menor tamaño, que se adecuaban a un mejor manejo en la elaboración del diagrama. El segundo grupo de patrones (Fig.11), se elaboró con el propósito de poder ubicar los tubos de PVC. En estos patrones se utilizaron las medidas de altura, longitud y espesores ya preestablecidas, y se colocaron los tubos de PVC en diversas posiciones en los encofrados.



Fig. 10 Patrones utilizados para la elaboración del Diagrama de Exposición

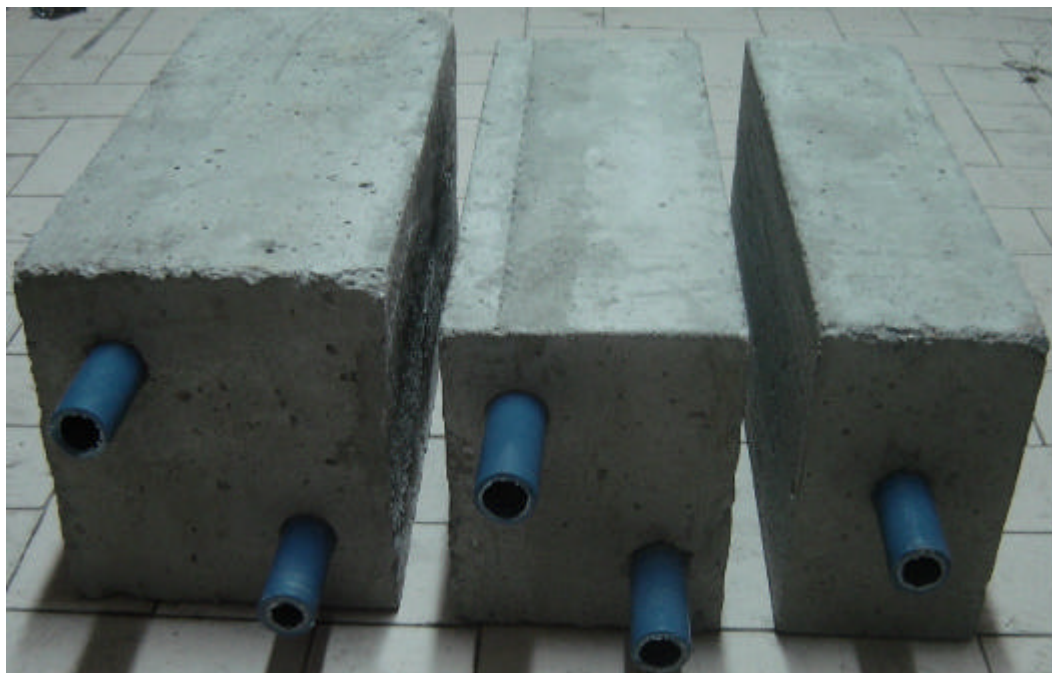


Fig. 11 Patrones con los tubos PCV

-
-
- Para saber con precisión cuáles serían las proporciones adecuadas para el diseño de mezcla, se llevaron a cabo los siguientes pasos:
 - * Se calculó el volumen total de los encofrados. Esto se realizó determinando el volumen de cada encofrado a utilizar y sumándolos todos.
 - * Se determinó el volumen requerido para el cilindro (utilizado para determinar la resistencia del concreto), dicho cilindro tiene un diámetro de 0,15 m y 30 cm de altura.
 - * Una vez que se tiene el volumen total de los encofrados y el volumen del cilindro, se suman para tener el volumen total requerido.
 - Culminados los cálculos del volumen total se preparó la mezcla de concreto. El diseño de mezcla, además de cumplir su propósito específico de ofrecernos las cantidades a usar de cada componente, es una importante herramienta para el análisis teórico de la influencia que pudieran tener sobre el concreto, ciertos cambios en los materiales o en proporciones de uso. Para ello nos apoyamos en la Norma COVENIN 1753 mostrada en la tabla 3, que nos ofrece las proporciones de mezclas tomando en consideración las características más importantes de los agregados, como son la granulometría y el tamaño máximo.
 - El manejo de la tabla es el siguiente:
 - * Se entra en la tabla con el dato del tamaño máximo. Si por ejemplo la mezcla recomendada es la señalada como B, Allí se indican los pesos a emplear de cemento, arena y piedra.
 - * El agua se añadirá en la cantidad necesaria para obtener una adecuada consistencia que permita la colocación en los moldes o encofrados. Un exceso de agua disminuye la resistencia y la durabilidad del concreto y favorece su segregación.
 - * Si esa mezcla B le resulta muy arenosa, o si de antemano se aprecia que la arena es muy fina, el diseño adecuado será el C. En caso contrario, si la mezcla resulta pedregosa, o si la arena es muy gruesa, el diseño será el A.

- Una vez que se ha hecho la receta y se ha depositado en los encofrados, se debe esperar 28 días, para que el cemento solidifique adecuadamente.

Tabla 3 Dosificación de la Mezcla, Receta Ampliada, conforme a la Norma Covenin 1753

Tamaño Máximo del Agregado mm (pulgadas)	Mezcla	DOSIS DE CEMENTO		AGREGADOS	
		kg/m ³	Sacos/ (aproximado)	Finos (Arena) kg/m ³	Gruesos (Piedra Picada o Canto Rodado) kg/m ³
12,70 (½")	A	360	8,50	1195	560
	B	350	8,25	1120	665
	C	340	8,00	1050	760
25,40 (1")	A	330	7,75	915	919
	B	320	7,50	840	1020
	C	310	7,25	750	1215
50,80 (2")	A	295	7,00	900	1020
	B	285	6,75	835	1105
	C	275	6,50	745	1215

2.4 Diseño de los Patrones

2.4.1 Volumen de los encofrados (Ve)

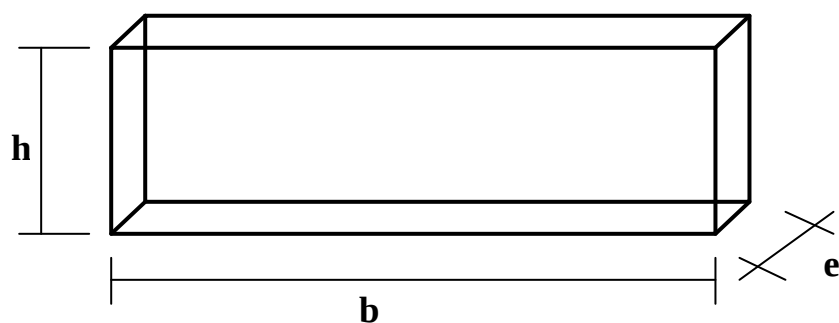


Fig. 12 Dimensión de los bloques de concreto

$$V_1 = b \cdot h \cdot e \quad (13)$$

Donde :

h = altura

b = longitud

e = espesor

Este cálculo se realiza con todos los encofrados y posteriormente se suman para obtener el volumen total.

$$V_e = \sum_i^n V_{e_i} \quad (14)$$

2.4.2 Cálculo del volumen del cilindro (V_c)

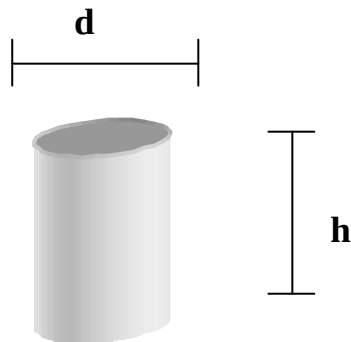


Fig. 13 Dimensión de los cilindros de concreto

$$V_c = \pi \times r^2 \times h \quad (15)$$

Donde:

d = diámetro

π = constante Pi, (3,14)

2.4.3 Cálculo del volumen total (V_T)

$$V_T = V_e + V_c \quad (16)$$

2.5 Elaboración de la tabla de dosificación de mezcla

Utilizando el volumen total, la Norma COVENIN 1753:03 y aplicando regla de tres, se obtienen los valores de los materiales a utilizar. Este procedimiento se realiza con cada uno de los valores de la tabla 1, y se obtiene así una tabla similar pero con los valores adecuados a nuestras especificaciones. Esta tabla se muestra a continuación:

Tabla 4 Dosificación de mezcla teniendo como base el volumen a utilizar

Tamaño máximo de agregado mm (pulg)	Mezcla de Cemento	Dosis de cemento		Pesos de agregados	
		Kg/ m ³	Sacos/ m ³	Finos (arenas) Kg/ m ³	Grueso (piedra picada) Kg/ m ³
12,7 (1/2")	A	43,20	1,02	143,40	67,20
	B	42,00	0,99	134,40	79,80
	C	40,80	0,96	126,00	91,2
25,4 (1")	A	39,60	0,93	109,80	110,28
	B	38,40	0,90	100,80	122,40
	C	37,20	0,87	90,00	145,80

2.6 Diseño de Mezcla

Elaborada la tabla de dosificación de mezcla como se muestra en la tabla 2, se escoge con que tamaño de agregado y tipo de mezcla se va a trabajar. En nuestro caso se escogió una mezcla tipo A, con agregado de 1/2". El material utilizado fue: 2 sacos de cemento, 150 Kg de finos y 100 Kg de gruesos. Hay que hacer notar que los valores se tomaron en exceso previendo cualquier detalle adicional.

Se preparó la mezcla una vez conocidos los materiales y cantidades necesarias.

- Se dividieron los materiales en tres grupos, ya que el mezclador soportaba una carga de sólo 100 Kg. Una vez que se separó y se pesó cada grupo, se fue agregando poco a poco a la mezcladora, esta mezcla tenía que tener una consistencia un poco aguada, para evitar el rápido secado y el agrietamiento del cemento.
- Se engrasaron los encofrados con aceite vegetal y posteriormente se vació en cada uno de ellos la mezcla homogénea.
- A medida que se le agregaba la mezcla a los encofrados se comprimía, con un punzón, esto se hacía con la finalidad de evitar aglomerados, aire atrapado y obtener una mezcla más homogénea.
- Posteriormente la mezcla se enrasó con la superficie y se le proporcionó unos pequeños golpes con un taco de madera, alrededor de todo el encofrado, para así impedir que se formasen cavidades entre la mezcla y el encofrado, como consecuencia del aire retenido.
- Se dejó solidificar la mezcla, a los dos días se cubrió la superficie del concreto con periódico humedecido, para evitar el agrietamiento del concreto.
- Cuando la mezcla estuvo endurecida y curada, se desencofró, teniendo así listo los dos grupos de patrones; el primer grupo que se utilizaría para la elaboración del diagrama de exposición y el segundo que eran los que contenían los tubos PVC en su interior.

2.7. Calculo de la Resistencia del concreto.

Para determinar la resistencia de los bloques de concreto, se trabajó según lo establecido en la Norma COVENIN 338. En la cual se deben realizar los siguientes pasos:

- Se preparó una mezcla de arena y cemento en una proporción volumétrica 1:2. La arena fue pasada por un tamiz malla 8 (2,38mm). Una vez obtenida la mezcla se procedió a colocarla sobre una mesa nivelada y lubricada, formando una capa de espesor de 6 ± 2 mm dispuesto en forma tal de lograr un paralelismo entre las caras a comprimir.
- Se colocó sobre la mezcla la cara del cilindro de concreto más irregular, generando así un efecto compresor en la mezcla. Se buscó la manera de que las superficies de compresión fuesen planas, con una tolerancia de 0,05mm y que no se agrietarán cuando el cilindro fuese ensayado. Este remate se colocó por lo menos 20 horas antes de realizar el ensayo.
- La altura total del cilindro se midió después de añadir el remate.
- Los cilindros se ubicaron en las máquinas de ensayos (Fig.14), centradas y comprimidas a una velocidad de 3 ± 1 Kg/cm²/seg. Una vez que se fijó la abertura del paso de aceite necesario para lograr la velocidad de carga, no pudo variarse hasta que se logró la rotura del cilindro.
- La resistencia a la compresión se obtuvo del cociente entre la carga máxima y la sección media de la probeta.



Fig. 14 Máquina de ensayos de compresión



Fig. 15 Ensayo de compresión



Fig. 16 Cilindros fracturados

2.8 Elaboración del Diagrama de Exposición

Antes de realizar cualquier disparo con el equipo de rayos X (Fig.17) es importante precalentarlo y comprobar que la manguera que se encuentra conectada al equipo y que permite la circulación del agua esté abierta, para evitar un recalentamiento del ánodo y por ende su rápido deterioro.



Fig. 17 Equipo de Rayos X

Una vez comprobado lo anteriormente expuesto se procedió a la elaboración del diagrama siguiendo los siguientes pasos:

- Se montaron las películas en el cuarto oscuro, impidiendo de esta manera la entrada de luz que pudiese develar las películas. Ya tenido el tamaño adecuado de la película a radiografiar, se introdujo en la zona negra del forro y se comprobó que quedase bien sellada.
- Posteriormente se colocó el forro debajo del equipo, con la cara amarilla hacia arriba y sobre ella se montó el bloque de concreto (Fig.18). Es necesario ubicar correctamente tanto la película como el bloque, para garantizar de esta forma que los rayos van a incidir adecuadamente sobre ambos objetos; para ello se cuenta con la ayuda de un guiador que forma parte del equipo, y nos da una ubicación correcta del eje de incidencia de los rayos.



Fig. 18 Montaje de la película y patrón de concreto

- Culminado estos pasos, se procede a cerrar la puerta de plomo, para evitar las radiaciones provenientes del equipo, se ajustan los valores de los parámetros en el tablero de control (Fig.19) y se procede a realizar el disparo.



Fig. 19 Tablero de control del Equipo de Rayos X.

- Se retira la película del forro para revelarla. Este proceso se efectúa en el cuarto oscuro y se lleva a cabo introduciendo la película en el baño revelador por 5 min, luego en el baño de parada por 1 min, seguidamente en el baño fijador por 5 min y por último en el baño de lavado por 10 min. Una vez completado estos pasos, la película es

llevada a un pequeño horno de mufla (Fig.20) donde se coloca hasta que se seque.



Fig. 20 Horno de Mufla

- La densidad de la radiografía es medida por un densitómetro (Fig.21), una vez que la película se encuentra totalmente seca, el valor obtenido debe ser de $2,00 \pm 0,10$. Si se logra este valor los parámetros seleccionados fueron los correctos, en caso contrario se deben variar los parámetros y graduarlos nuevamente en el tablero de control y repetir todo el procedimiento hasta conseguir el valor de densidad exigido.



Fig. 21 Densitometro

- Se realiza una curva de corrección, que es la curva de calibración del equipo, es decir, se elaboró una curva de calibración del valor real del equipo (V_R) Vs el valor obtenido del equipo. Como se muestra a continuación:

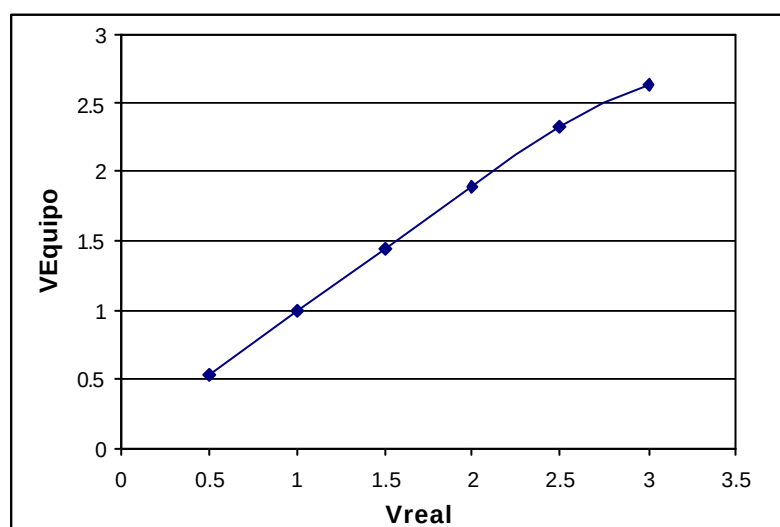


Fig. 22 Curva de Calibración del equipo

- Una vez medidas las densidades de las películas se verificaron los valores obtenidos en la curva de calibración.
- Por último se graficó el diagrama de exposición, con los valores de voltaje, espesores y tiempos de exposición correspondiente. Los valores de los espesores están ubicados en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas se encuentran los valores de exposición.

2.8 Diseño y elaboración del ICI

Para la confección del ICI fue necesario tomar en cuenta las siguientes características:

- El método de lectura debería ser sencillo y preciso.
- Ha de poder ser utilizado en superficies planas o curvas.
- Ser pequeño.
- De fabricación económica y de fácil normalización.

Cumpliendo con estas características se tomó como modelo los indicadores americanos de espesor constante, específicamente el ICI 4-2T, en donde el espesor del ICI es el 4% del espesor a radiografiar.

Conocido el modelo de ICI y los espesores a utilizar se procedió a su elaboración.

- Se realizó un molde con las medidas de los espesores correspondientes
- Luego se procedió a vaciar una pequeña cantidad de cemento y a enrasar con la superficie
- Por ultimo se dejó secar para desmoldarlo y así obtener el ICI respectivo para cada espesor de patrón de concreto utilizado.

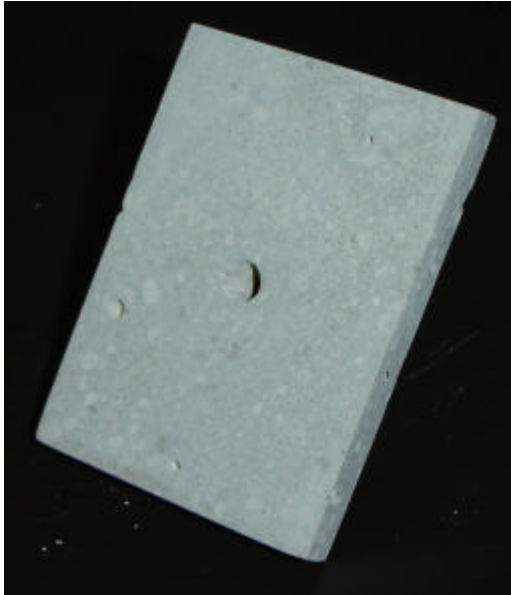


Fig. 23 y Fig. 24 Indicador de calidad de Imagen



CAPITULO III

3. RESULTADOS

3.1 Volumen total (V_T)

- De la ec.(13) se puede calcular el volumen de cada uno de los encofrados a utilizar.

$$V_1 = (20*40*12) \text{ cm}^3 = 9600\text{cm}^3 = 0,0096\text{m}^3$$

- Una vez calculado todos los volúmenes de los encofrados se utiliza la ec (14) para obtener el volumen total de los encofrados.

$$V_e = \sum_{i=1}^{n=6} V_{e_i} = 0,0576\text{m}^3$$

- Se calculó el volumen del cilindro empleando la ec. (15)

$$V_c = p *(0,075)^2*30\text{m}^3 = 0,053\text{m}^3$$

- Por último se sumaron los valores obtenidos aplicando la ec. (16)

$$V_T = 0,0576 \text{ m}^3 + 0,053\text{m}^3 = 0,12 \text{ m}^3$$

$$V_T = 0,12 \text{ m}^3$$

3.2. Tablas de Dosificación de Mezcla

Conseguido el valor del volumen total y con la ayuda de la tabla 3, se procedió a aplicar una regla de tres que nos facilitó el cálculo de los materiales a usar.

$$\begin{aligned} 1\text{m}^3 &\rightarrow 360 \text{ Kg} \\ 0,12\text{m}^3 &\rightarrow X \end{aligned}$$

$$X = \frac{0,12\text{m}^3 * 360 \text{ Kg}}{1\text{m}^3} = 43,2 \text{ Kg}$$

Este procedimiento se realiza con cada uno de los valores de la tabla.3, obteniendo así una tabla similar pero con los valores adecuados a nuestras especificaciones. Esta tabla es la Tabla 4

Tabla.4 . Dosificación de Mezcla Utilizada

Tamaño máximo de agregado mm (pulg)	Mezcla de Cemento	Dosis de cemento		Pesos de agregados	
		Kg/ m ³	Sacos/ m ³	Finos (arenas) Kg/ m ³	Grueso (piedra picada) Kg/ m ³
12,7 (1/2")	A	43,20	1,02	143,40	67,20
	B	42,00	0,99	134,40	79,80
	C	40,80	0,96	126,00	91,2
25,4 (1")	A	39,60	0,93	109,80	110,28
	B	38,40	0,90	100,80	122,40
	C	37,20	0,87	90,00	145,80

3.3 Resistencia del concreto

- Para determinar la resistencia del concreto se procedió a dividir la carga aplicada al concreto entre su área.

$$s = \frac{C}{A} \quad (17)$$

$$s = \frac{6900 \text{ Kg}_f}{49,24 \text{ cm}^2} = 140,13 \text{ MPa}$$

- Este cálculo se realizó para los 4 cilindros elaborados.

Los resultados de la resistencia del concreto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla.5. Descripción de los ensayos según los lineamientos de la Norma COVENIN 338

<i>Probeta</i>	<i>Diámetro (cm)</i>	<i>Altura (cm)</i>	<i>Peso (Kgf)</i>	<i>Carga (Kgf)</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Esfuerzo (Kgf/cm²)</i>
<i>Cilindro Pequeño</i>	8,01	15,81	1,66	6885	50,32	136,82
<i>Cilindro Grande</i>	14,99	22,56	11,92	25750	705,56	36,50

3.4 Curva de Calibración

- Para cada medida preestablecida del equipo, se tomaron varias medidas del valor real y se calculó un valor promedio.
- Para el valor de 0,5 se obtuvo las siguientes medidas:

$$V_E = 0,54; 0,53; 0,53; 0,52; 0,52..$$

$$X_m = 0,53$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_m)^2}{n - 1}} = 0,53 \pm 0,01$$

- Este procedimiento se aplicó para cada uno de las medidas obtenidas y se graficó la curva de calibración.

Tabla.7. Valores de la curva de calibración

V_{Real}	V_{Equipo}
0,50	0,53
1,00	0,99
1,50	1,44
2,00	1,89
2,50	2,33
3,00	2,63

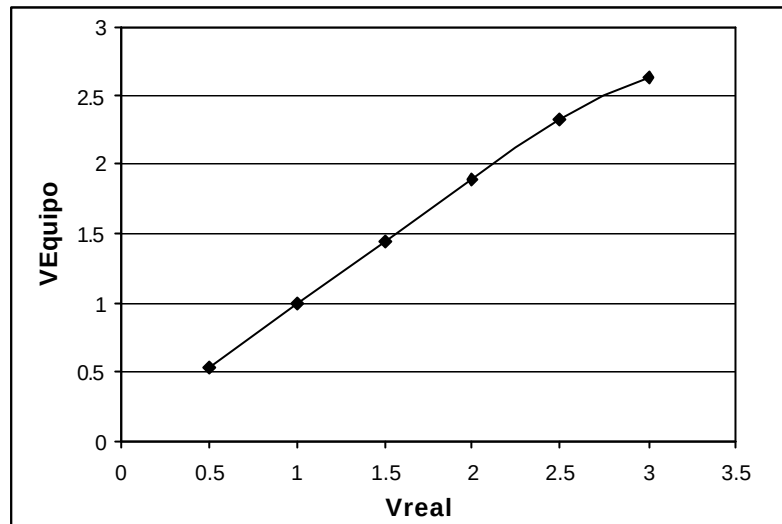


Fig. 23. Curva de calibración

3.5. Cálculo del ICI

Se realizó un ICI del tipo 4-2T, en el cual 2T representa el diámetro del agujero del ICI y el 4 corresponde al 4% del espesor del patrón a utilizar.

$$e = e_p \times 0,04 \text{ cm}$$

Para el bloque de 20cm.

$$e_{20} = 20 \text{ cm} \times 0,04 = 0,8 \text{ cm}$$

El diámetro del agujero: 2T= 0,04cm

Este procedimiento se lleva a cabo con los patrones restantes

3.5.1. Indicador de Calidad de Imagen (ICI)

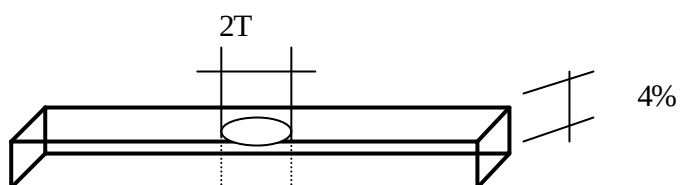


Fig.21. ICI

Tabla.6. Espesores del ICI

<i>Espesor del patrón (mm)</i>	<i>Espesor del ICI (4%) (mm)</i>	<i>Diámetro del agujero (2T) (mm)</i>
120	4,8	2,4
160	6,4	3,2
200	8	4

3.6. Radiografía de los patrones del grupo I

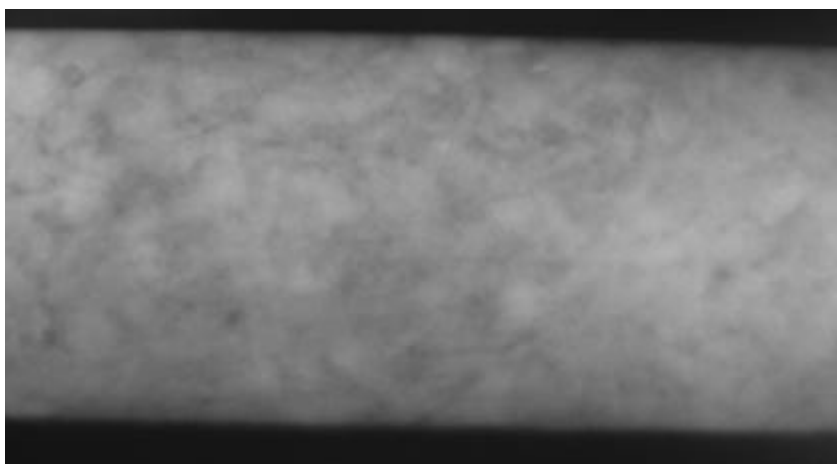


Fig.24. Patrones de 12cm de espesor, 180kV, 10.2min*mA.

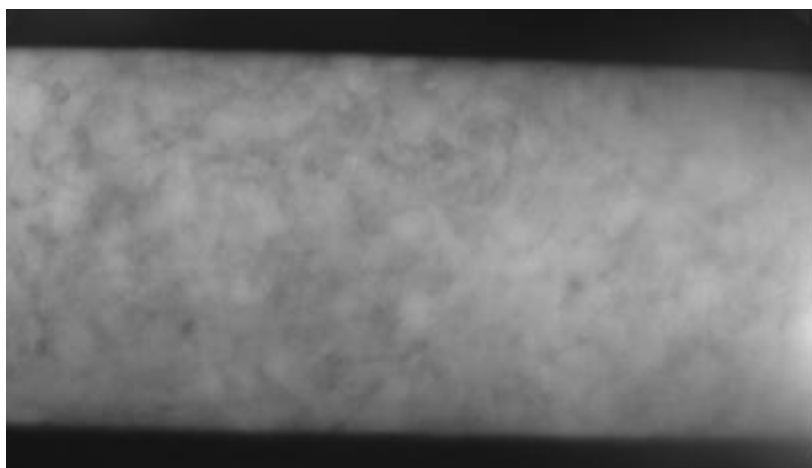


Fig.25. Patrones de 8cm de espesor, 130kV, 4,3min*mA.

3.7 Diagrama de Exposición

Tabla 8. Valores del Diagrama de Exposición a 130kV

Espesor (cm)	Corriente (mA)	Tiempo (min)	Tiempo de Exposición (min*mA)
8	2	2.15	4.3
10	2	6.1	12.2
12	3	28	84
14	3	96	288

Tabla 9 Valores del Diagrama de Exposición a 150kV

Espesor (cm)	Corriente (mA)	Tiempo (min)	Tiempo de Exposición (min*mA)
8	2	2.9	1.45
10	2	2.5	5.0
12	3	11.1	33.3
14	3	34.3	102.9

Tabla 10 Valores del Diagrama de Exposición a 180kV

Espesor (cm)	Corriente (mA)	Tiempo (min)	Tiempo de Exposición (min*mA)
8	1	1.5	1.5
10	2	1.1	2.2
12	3	3.4	10.2
14	3	19.5	58.4

Tabla 11 Valores del Diagrama de Exposición a 220kV

Espesor (cm)	Corriente (mA)	Tiempo (min)	Tiempo de Exposición (min*mA)
8	0.5	1.3	0.65
10	1	1.2	1.2
12	1	6.1	6.1
14	2	6.5	13

Densidad: 2; Proceso Manual; Revelador: AGFA G128 ; FF:73cm
Película: D7

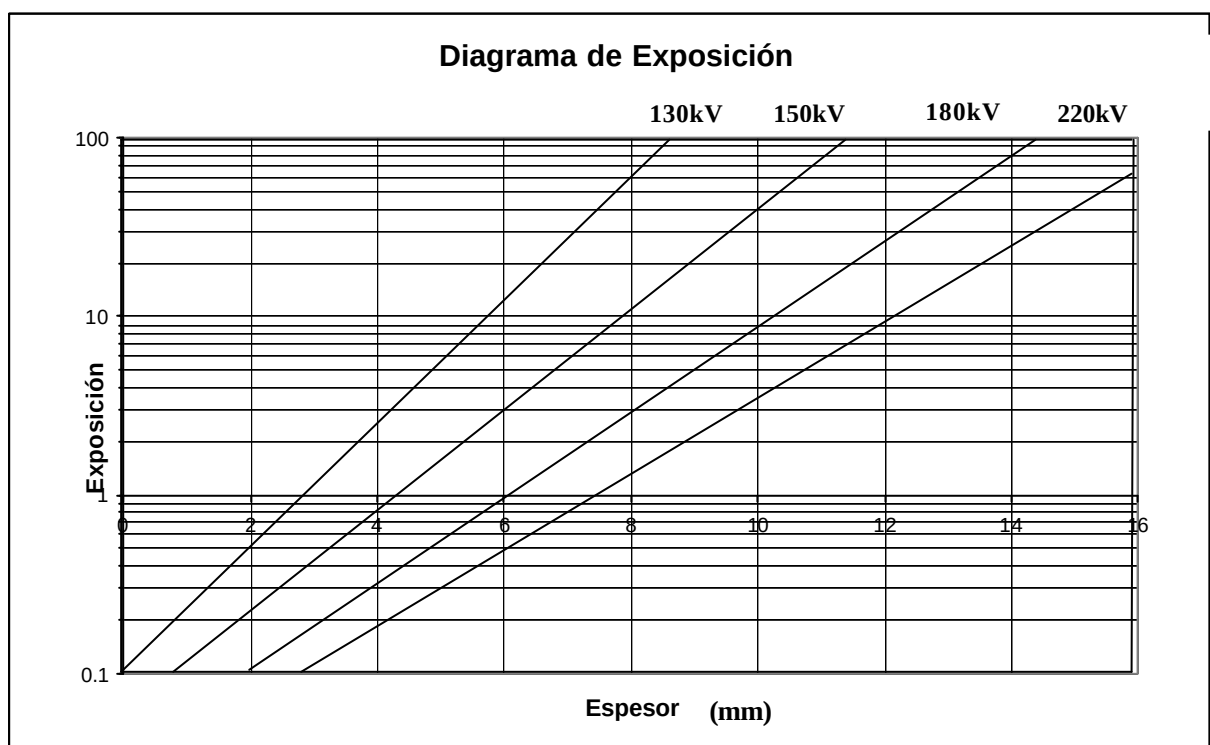


Fig.26. Diagrama de Exposición del Concreto

3.8 Radiografías

3.8.1 Radiografía de los patrones para la realización del Diagrama de Exposición

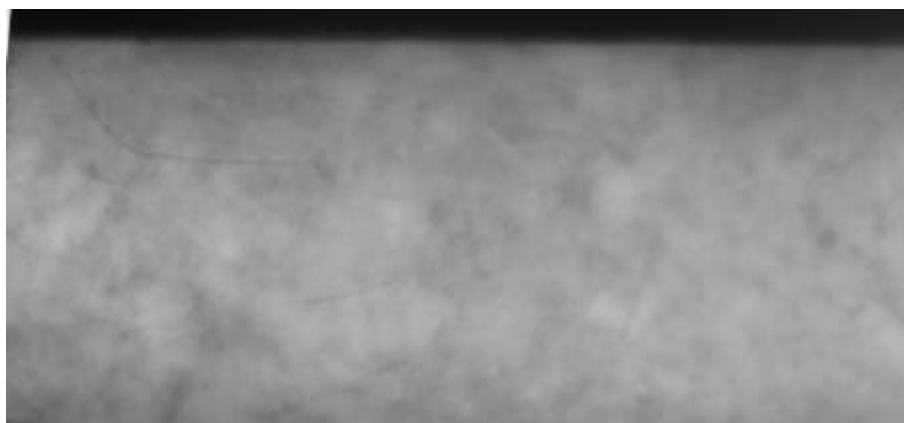


Fig. 25 Radiografía de patrón de 8cm de espesor

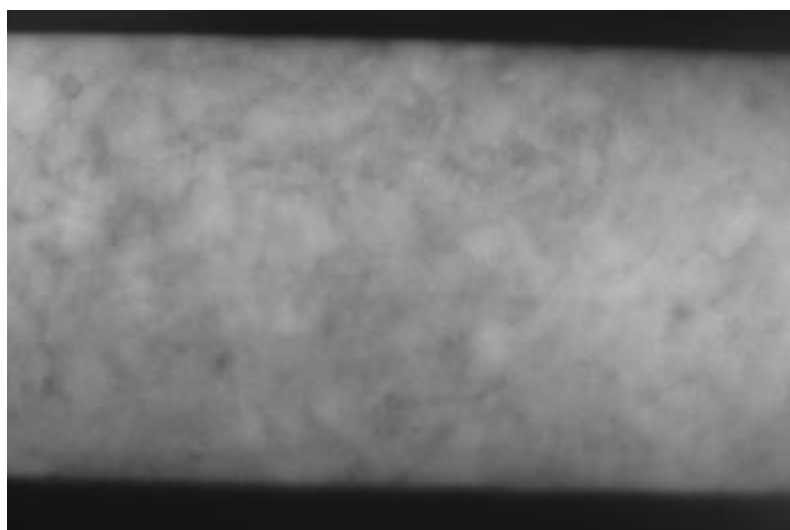


Fig. 26 Radiografía de patrón de 14cm de espesor

3.82 Radiografía del ICI

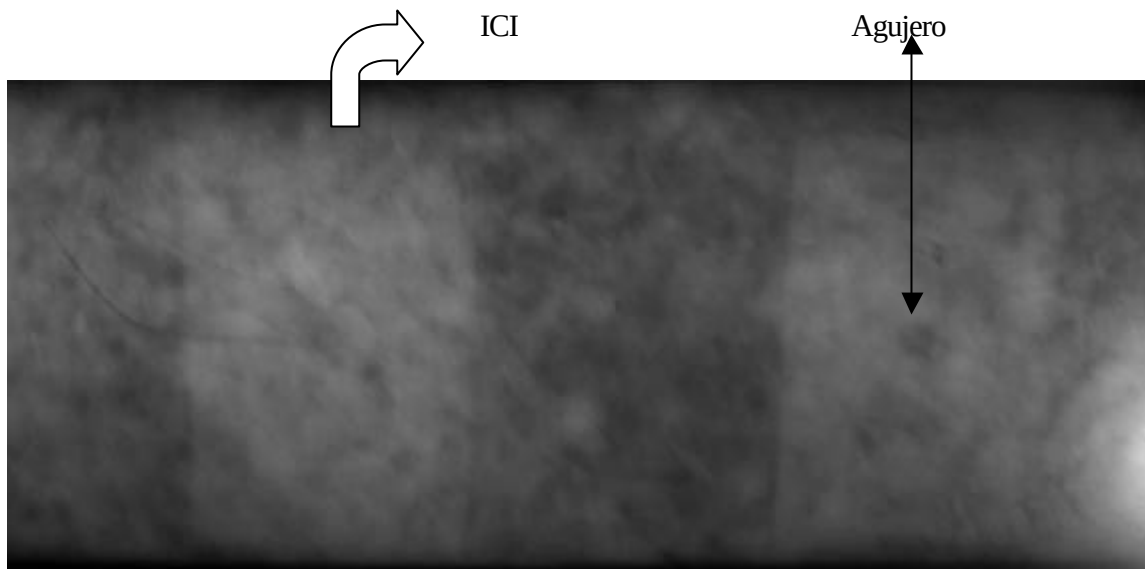


Fig. 27 ICI en un bloque de 10cm de espesor

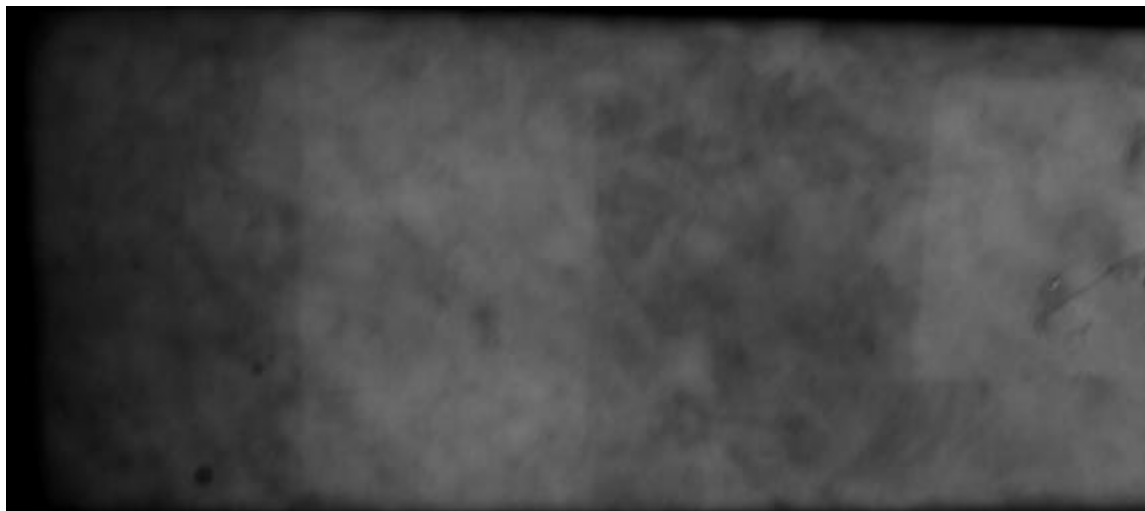


Fig. 28 ICI de un bloque de 8cm de espesor

3.8.3 Ubicación de los tubos



Fig. 29 Bloque de 12cm de espesor , 180kV

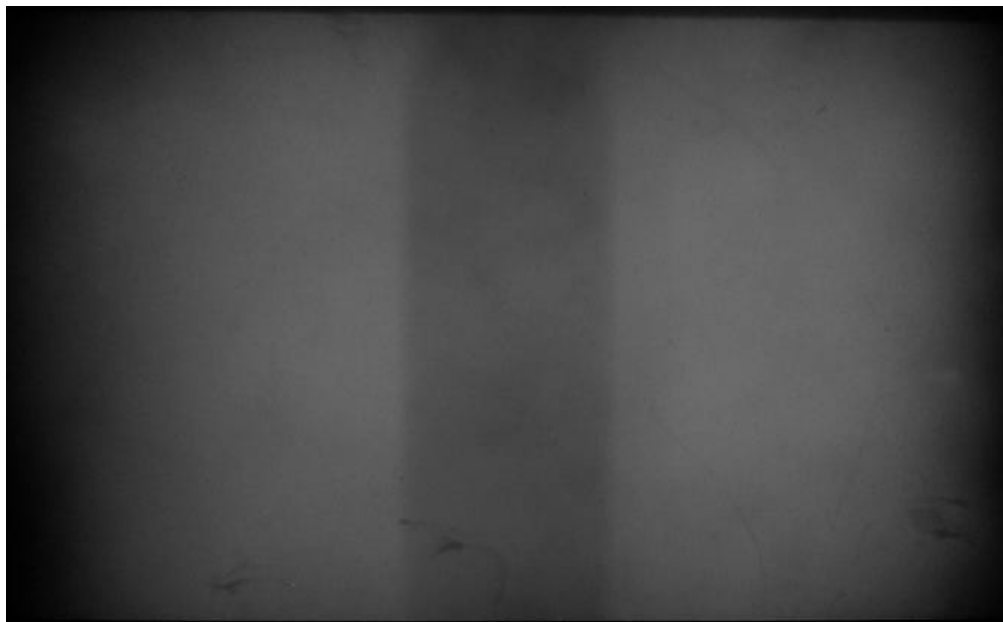


Fig. 30 bloque 12 cm de espesor, 220kV

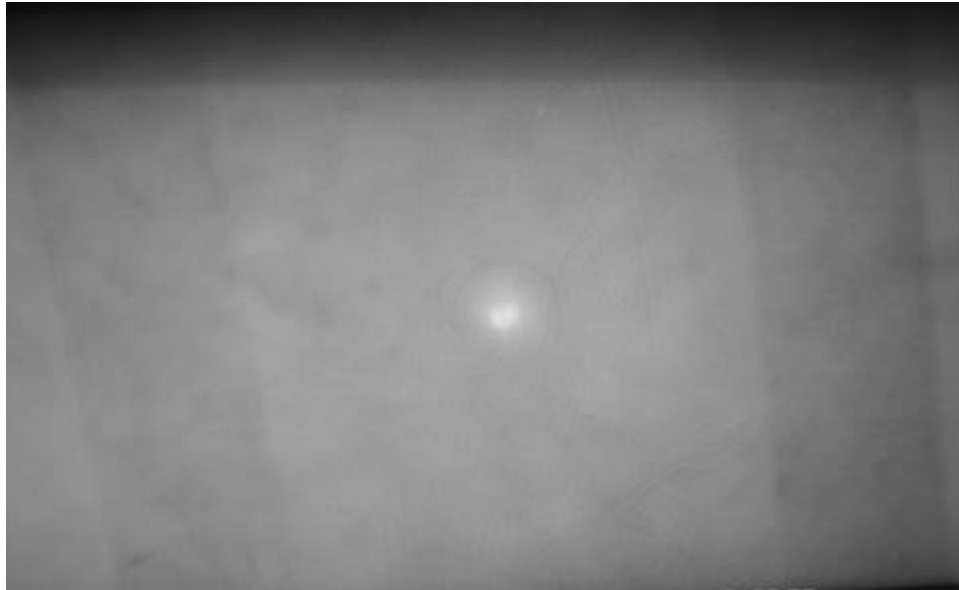


Fig. 31 Bloque de 16cm de espesor, 180kV



Fig. 32 Bloque 16cm de espesor, 220kV



Fig. 33 Bloque de 20cm de espesor, 180kV



Fig. 34 Bloque 20cm de espesor, 220kV

3.8.4 Tubo PVC con cableado eléctrico



Fig. 35 Bloque de 12cm de espesor con cableado eléctrico, 180kV



Fig. 36 Bloque de 12cm de espesor con cableado eléctrico, 220kV

3.8.5 Efecto de Rebote



Fig. 37 Bloque de 20cm de espesor, 180kV



Fig. 38 Bloque 16cm de espesor, 150kV

CAPITULO IV

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- La mezcla de concreto es sumamente importante cuando se trabaja con construcciones ya que cada proporción de cemento, agregados y agua mantienen una relación directamente proporcional con las propiedades de los patrones elaborados. En nuestro caso se simuló las propiedades de las paredes de las edificaciones basándonos en la tabla de dosificación de mezcla, la cual dependía del volumen de los cilindros y encofrados a elaborar
- Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión son un poco bajos, sin embargo, entran dentro de los parámetros establecidos para la fabricación de paredes de concreto en edificaciones. Estos valores no son los más óptimos ya que en las últimas dos décadas se ha establecido trabajar con valores mayores de resistencia del concreto debido a que se construye en una zona sísmica y cada día las edificaciones están formadas por más pisos. Pero para nuestros propósitos los patrones guardan las características y propiedades necesarias para cumplir con nuestros objetivos.
- Los ICI fueron realizados bajo la Norma ASME (American Society of Mechanical Engineer) en la cual se establece el tipo de ICI, los espesores a utilizar y la ubicación que debe tener en el patrón en el momento de tomar la radiografía. En las Fig.30 y 31 se puede observar que el ICI elaborado cumple con uno de sus objetivos ya que se nota en la radiografía la presencia del mismo permitiendo así evaluar por comparación que la radiografía obtenida bajo la técnica empleada fue satisfactoria. Existen varios tipos de ICI pero en nuestro caso se escogió trabajar con los ICI tipo agujero por lo sencillo de su elaboración con el concreto. Hay que tener en cuenta que las dimensiones del ICI son pequeñas y por ende su fabricación se hace un poco difícil.

- Los valores del diagrama de exposición para cada voltaje fue mayor de lo que se esperaba, inicialmente se comenzó a trabajar con voltajes de 70, 90 y 110 kV pero las exposiciones aumentaban significativamente a medida que el espesor de los bloques incrementaba, es por ello que se decidió trabajar con valores de voltaje mayores. Los patrones se comenzaron a radiografiar con voltajes de 130, 150, 180 y 220kV, estos valores arrojaron un tiempo de exposición menor comparado con los valores de los voltajes utilizados inicialmente, sin embargo, para espesores de 20cm a un voltaje de 130kV el tiempo de exposición es elevado pudiendo llegar hasta 324min*mA, es decir utilizando un amperaje de 3mA y un tiempo de 108 min. Para voltajes de 180 y 220kV el tiempo de exposición disminuyó a 135 y 81 min*mA respectivamente, esto nos indica que a pesar de trabajar con un amperaje y voltaje alto los tiempos de exposición siguen teniendo valores elevados e irán incrementando a medida que los espesores de concreto aumenten, ya que son directamente proporcional. Esto evidencia que el concreto tiene una capacidad de absorción elevada y que es preferible trabajar con altos valores de voltaje para obtener un resultado adecuado sin necesidad de aplicar tiempos de exposición demasiado largos. Es importante mencionar que las radiografías utilizadas para la elaboración del diagrama de exposición deben presentar una densidad de 2 .
- Los resultados obtenidos para la elaboración del diagrama de exposición fueron satisfactorios. Esto se pudo comprobar al momento de determinar el tiempo de exposición que debería emplearse para la ubicación de los tubos de PVC. Muchos de los valores obtenidos por medio del diagrama fueron acertados, otros difirieron por pequeños márgenes de error, pero siempre alrededor del valor adecuado.
- Utilizando como punto de apoyo el diagrama de exposición se determinaron los valores de exposición a los cuales se debía trabajar para la localización de los tubos de PVC. Se observó que para voltajes de 130 y 150kV no se distinguía nítidamente la ubicación de los tubos, caso contrario para valores de 180 y 220kV en el cual los tubos se definían un poco más , como lo muestra la Fig.32 y 33 . En el patrón de 12cm de espesor se nota que el tubo de PVC se encuentra

ubicado en el centro del bloque, las radiografías se realizaron a 180 y 220kV lográndose así verlo con mayor precisión. En la Fig. 34 y 35, se muestran las radiografías del bloque de espesor de 16 cm, de igual forma los voltajes utilizados fueron de 180 y 220kV respectivamente y por ultimo en las fig.36 y 37 se indica la ubicación de los tubos de PVC para un bloque de 20cm de espesor.

Para poder observar los tubos de PVC en el concreto se utilizó un amperaje fijo de 3mA y voltajes de 180 y 220kV variando únicamente el tiempo. Para el patrón de 12cm de espesor se obtuvo un tiempo de exposición de 81 y 54min*mA, respectivamente, para el bloque de 16cm de espesor se alcanzó unos valores de 108 y 69min*mA, respectivamente y por último para el patrón de 20cm se consiguió un tiempo de exposición de 330 y 129min*mA, respectivamente. Es importante hacer notar que a pesar de que se trabajó con un amperaje un poco elevado y un voltaje alto el tiempo de exposición para los espesores son considerables, sobre todo en el patrón de 20cm de espesor que es el que posee el tiempo de exposición mayor.

- La utilización de pantallas de plomo se debió a la necesidad de observar con mayor contraste los tubos PVC y al alto voltaje que se estaban aplicando a los ensayos (150, 180 y 220kV) ya que éstas ayudan a mejorar el rendimiento radiográfico, permitiendo el paso de la radiación primaria y absorbiendo en lo posible la radiación secundaria de mayor longitud de onda y menor penetración. Las pantallas de plomo evitaron que hubiese una reflexión de la imagen como se muestra en la fig.40 y 41; en estas radiografías se trabajó con espesores de 20cm a un voltaje de 220kV y con el bloque de 16cm de espesor con un voltaje de 150kV. Las radiografías se realizaron con valores de 130, 150, 180 y 220kV, siendo más notorio este defecto en los voltajes mayores. Una vez colocadas las pantallas de plomo éste defecto se eliminó siendo más notoria la presencia del tubo PVC. Esta reflexión es lo que se conoce como imagen de rebote.
- Para comprobar que este tipo de ensayo puede ser utilizado para localizar cableado eléctrico se procedió a realizar una radiografía al bloque patrón de 12cm de espesor. En la fig.38 y 39 se observa la ubicación del cable, el cual se

encuentra situado dentro del tubo PVC, con este ensayo se demuestra que la Radiografía Industrial por rayos X es un estudio que cada día adquiere más importancia, no solo en el campo de los materiales no metálicos sino para todo tipo de material como es el caso del concreto.

CAPITULO V

5.CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en nuestro trabajo experimental se plantearon las siguientes conclusiones:

- La Radiografía Industrial con rayos X se aplica no sólo para realizar ensayos de control de calidad, sino también para determinar la ubicación de tubos de PVC en concreto.
- El diagrama de exposición que se obtuvo se realizó a valores elevados de voltaje cuyo rango se encuentra entre 130-220kV.
- El diagrama de exposición obtenido es útil sólo a estas condiciones de trabajo.
- El concreto es un material compuesto y por ende aumenta notablemente los efectos de la radiación difusa por la alta dispersión de energía radiante que presenta.
- El efecto de la radiación difusa se incrementa a medida que el espesor del bloque aumenta.
- Se debe utilizar pantallas de plomo cuando se trabaja a elevados valores de voltaje y también para evitar el efecto de rebote y mejorar el rendimiento radiográfico.
- El Indicador de Calidad de Imagen (ICI) que se construyó fue satisfactorio ya que en las radiografías se pudo observar el contraste entre la zona en la cual se encontraba el ICI y la zona que no se encontraba, así mismo en la zona donde se observaba la presencia del ICI se hacía un poco más evidente la estructura del concreto, es decir podía distinguirse con cierta facilidad la forma de los agregados.

CAPITULO VI

6. RECOMENDACIONES

- Utilizar otro tipo de película radiográfica para comprobar la influencia que ésta tiene sobre los resultados obtenidos.
- Verificar la temperatura del cuarto de revelado ya que pudiese afectar los tiempos de permanencia de las películas en cada uno de las fases del proceso de revelado y por ende perjudicar el resultado.
- Extender el estudio de estos ensayos para diversos valores del diseño de mezcla para evaluar las propiedades, efectos y resultados a diferentes valores y tamaños de agregados.
- Realizar otros estudios donde se pueda determinar la profundidad exacta a la cual se encuentran los tubos PVC.
- Trabajar con pantallas de plomo cuando se esté radiografiando a valores mayores de 180kV

CAPITULO VII

7. BIBLIOGRAFÍA

1. FORBIS, John
“Radiography for building Renovation”
Materials Evaluation, June 2001, pág. 685
2. RENS, Kevin
HOWANICK, Donald
KNOTT, Albert
“Radiographic Imaging for Assessment of Civil Engineering Concrete Infrastructure”
Materials Evaluation, November 2000, pág.1278
3. REAL, Alberto
RENC SAR, Andrés:
“Estudio de la factibilidad de la determinación de diámetros de cabillas en elementos estructurales”
Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica. 1999, 110p.
4. RAMÍREZ GÓMEZ, Francisco
FERNÁNDEZ, Miguel Ángel
VALDECANTOS, Carlos:
“Introducción a los Métodos de END de control de la calidad de los materiales”
Madrid, segunda edición, año 1977. 766p
5. PORRERO, Joaquín
RAMOS, Carlos
GRASES, José:
“Manual del concreto fresco”
Tercera edición, Caracas-Venezuela 1987. 212p.
6. SIDETUR, Siderúrgica del tubo. 312p

7. AGFA-GEVAERT
“Radiografía Industrial”
Barcelona-España, 1989. 159p.
8. BAEZ, Juan
“Radioisótopos en los END”, boletín IMME N°9
Caracas-Venezuela, 1965. 35p.
9. FRAUDITA, Freddy
“Guía de Principios Radiográficos”
Caracas-Venezuela. 12.10p
10. BALTEAU SECURITY AND CONTROLE BELGIUM DIVISIÓN
January 1988. 8p.
11. GUIDICE, José
“El concreto endurecido”
Caracas-Venezuela, 1989. 45p
12. MASTER BUILDERS
“Ensayando Concreto Fresco”
13. <http://html.rincondelvago.com/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales.html>
Consultada 8-6-04
14. <http://www.monografias.com/trabajos11/gamma/gamma.shtml>
Consultada 8-6-04
15. <http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpZkZFuEFFzNxWeVQe.php>
Consultada 8-6-04
16. <http://www.aendur.ancap.com.uy/eventos/divulgacion/EnNoDe.htm>, ccs 28-3-04
Consultada 15-8-04
17. <http://www.cnea.gov.ar/isabato/>
Consultada 18-8-04

18. http://fain.uncoma.edu.ar/materias/ensayos_no_destructivos/Catedra_END/4-Liquidos%20Penetrantes/LP.pdf
Consultada 18-8-04
19. http://www.astrocosmo.cl/astrofis/astrofis-03_01.htm
Consultada 21-8-04
20. http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761579196/rayos_X.html ccs 29-3-04
Consultada 29-8-04
21. <http://www.synesis.eng.br/Partmag.htm>
Consultada 15-9-04
22. <http://www.usc.edu.co/laboratorios/umv.htm>
Consultada 15-9-04
23. <http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpZkZFuEFFzNxWeVQe.php>
Consultada 20-9-04
24. http://www.google.com.ve/search?q=tipos+de+fuentes+de+los+rayos+x&hl=es&lr=lang_es&ie=UTF-8&start=20&sa=N
Consultada 20-9-04