

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO MECÁNICO

**TEMA:
DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS RADIOGRÁFICO Y TINTAS
PENETRANTES PARA CONTROL DE CALIDAD DE LAS SOLDADURAS
EN LAS CONSTRUCCIONES DE ESTACIONES DE BOMBEO DE
PETRÓLEO.**

**AUTOR:
DANIEL ALEJANDRO CASTRO MONTALVO**

**DIRECTOR:
Ing. SALVATORE REINA, MSc.**

Quito, Marzo del 2015

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD AUTOR

Yo, Daniel Alejandro Montalvo autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaro que los conceptos, análisis desarrollados, conclusiones y recomendaciones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, Marzo de 2015

Daniel Alejandro Castro Montalvo

C.I: 172123300-3

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD TUTOR

Todos los conceptos, análisis desarrollados, conclusiones y recomendaciones del presente trabajo han sido revisados y analizados bajo la tutoría del Ing. Salvatore Reina.

Quito, Marzo de 2015

Ing. Salvatore Reina, MSc.

C.I: 171276690-4

DEDICATORIA

A Dios, que me ha dado la sabiduría para realizar este proyecto de tesis y por ser mi refugio en los momentos difíciles. A mi madre, que ha sido el pilar fundamental, mi alegría y mi motivación para culminar con éxito esta etapa en mi carrera profesional.

A mi tío el Ing. Oscar Cevallos, por ser mi ejemplo a seguir en el campo de la Ingeniería Mecánica y también por brindarme todo su apoyo y asesoría, en toda mi vida y en mi carrera.

A mi padre, hermanos, familiares y amigos, que en algún momento me han dado su ayuda y motivación para lograr terminar la carrera.

AGRADECIMIENTO

En la elaboración del presente proyecto de tesis e iniciar una nueva etapa de mi vida como profesional, hago extensivo mi agradecimiento a:

La Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, ya que dentro de ella aprendí todos los conocimientos y formación para ser un excelente profesional.

Los docentes de la Universidad, que durante las horas de clase y fuera de ellas, me han dado toda su entrega y conocimiento para formarme como estudiante.

Además, agradezco sinceramente al Ing. Salvatore Reina, director de tesis, por haber dirigido y colaborado con sus conocimientos técnicos este proyecto y estar presente en todo momento.

RESUMEN

El servicio de Ensayos No Destructivos (END), se utiliza para asegurar el control de calidad de la soldadura. La soldadura es la actividad principal en la construcción de la infraestructura petrolera. Radiografía Industrial (Gammagrafía) y Tintas Penetrantes se utilizan en la construcción de estaciones de bombeo de petróleo. Esas estaciones sirven para conectar las bombas, recipientes a presión, tanques de almacenamiento, compresores y separadores.

El Procedimiento de Inspección con Gammagrafía controla la calidad de las soldaduras de ranura en juntas a tope. Fue desarrollado, a partir de un análisis de las prácticas actuales de la empresa Radin, dedicada a los END. En el procedimiento se muestran los parámetros más importantes a tomar en cuenta antes de realizar el ensayo, cada uno detallado de manera didáctica y en base a normas, para mejorar el nivel de los usuarios de esas técnicas. El mayor aporte es cuantitativo, se recolectaron los valores que recomiendan los fabricantes y las normas, para lograr una buena práctica.

El Procedimiento de Inspección con Tintas Penetrantes controla la calidad de las soldaduras de filete en uniones en T y traslape, es decir, se lo usa cuando la Gammagrafía no puede ser aplicada. La situación del ensayo de Tintas Penetrantes en el Ecuador es crítica, por lo que el aporte en ese tema tiene más énfasis en la exactitud de cada uno de los parámetros para su aplicación. Se analizó cada variable esencial y se profundizó de manera sistemática en el uso de normas, con el objeto de hacer una compilación de criterios que pudieran ser de interés de las empresas.

Los dos procedimientos escritos se desarrollaron a base de variables esenciales, establecidas en el Código ASME Sección V, artículos 2 y 6.

ABSTRACT

Non-Destructive Testing (NDT) service is used to ensure quality control of welding. Welding is the main activity in the construction of the oil infrastructure. Radiographic Testing (Gammagraphy) and Liquid Penetrants are used in the construction of oil pumping stations. These stations serve to connect the pumps, pressure vessels, storage tanks, compressors and separators.

The Inspection Procedure with Gammagraphy is used for quality control of Groove Weld Butt Joints. It was developed from current practices analysis on Radin, which is dedicated to END. In this procedure, is showed the most important parameters to consider before taking the test, each one is detailed in didactic way and based on standards to improve the level of users of these techniques. The greatest contribution is quantitative, recommended values were collected by the manufacturers and standards for good practice.

The Inspection Procedure with Liquid Penetrants Testing is used for quality control of Fillet Welds in T and Overlap Joints, That is, it is used when Gammagraphy can't be applied. Liquid Penetrants situation in Ecuador is critical, so the contribution to this issue has more emphasis on accuracy for the application of the parameters. Each essential variable was analyzed and deepened systematically in the use of standards, in order to make a compilation of criteria that might be of interest to companies.

The two written procedures were developed based on essential variables, established in ASME Code Section V, articles 2 and 6.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
GLOSARIO	XVI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
FUNDAMENTO TEÓRICO	2
1.1 Estaciones de bombeo de petróleo.	2
1.2 Procesos de soldadura en estaciones de bombeo de petróleo.....	3
1.3 Introducción a los ensayos no destructivos.	4
1.4 Gammagrafía	7
1.4.1 Radiación ionizante.....	7
1.4.2 Fuentes radiactivas artificiales.	8
1.4.3 Película radiográfica.....	11
1.4.4 Imagen latente.	12
1.4.5 Revelado.....	13
1.4.6 La curva característica.....	13
1.4.7 Imagen Radiográfica por Contraste.	14

1.4.8	Procesamiento de películas radiográficas en el cuarto oscuro.	16
1.4.9	Proceso de revelado manual.	16
1.4.10	Tiempo de revelado.	17
1.4.11	Tiempo de fijado.	19
1.4.12	Tiempos de baño de parada y de lavado final.	19
1.4.13	Tipos de películas radiográficas.	20
1.4.14	Elección del tipo de película.	22
1.4.15	Penumbra geométrica.	22
1.4.16	Distancia fuente película.	22
1.4.17	Ley inversa del cuadrado de la distancia.	23
1.4.18	Tiempo de exposición.	24
1.4.19	Control de la calidad de imagen radiográfica.	25
1.5	Tintas Penetrantes.	26
1.5.1	Clasificación general del kit de insumos para la aplicación de tintas penetrantes.	27
1.5.2	Principios del ensayo con tintas penetrantes.	28
1.5.3	Sensibilidad.	30
1.5.4	Propiedades del penetrante.	30
CAPÍTULO II		34
PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN CON GAMMAGRAFÍA.		34
2.1.	Análisis de la Situación Actual	34
2.2.	Elaboración del Procedimiento	41

2.3.	Variables Esenciales	42
2.3.1.	Tipo de material y rango de espesores a inspeccionar.	42
2.3.2.	Isótopo radioactivo utilizado.....	44
2.3.3.	Distancia Mínima entre la Fuente y el Objeto a irradiar	48
2.3.4.	Distancia máxima entre el objeto y la película.	50
2.3.5.	Tamaño Máximo de la Fuente Radiactiva.	51
2.3.6.	Marca y Especificaciones de la Película Radiográfica	53
2.3.7.	Pantallas Intensificadoras Utilizadas.....	54
2.4.	Técnicas para la Toma Radiográfica en Tuberías y Tanques.....	55
2.4.1.	Tuberías.....	55
2.5.	Tiempo de Exposición a la Radiación para la Toma Radiográfica	59
2.6.	Protección Radiológica y Dosis de Radiación	61
2.6.1.	Control de la dosis.....	64
2.7.	Calificación del Procedimiento para Inspección con Gammagrafía en Tuberías.....	66
2.7.1.	Indicadores de calidad de imagen radiográfica.....	66
2.7.2.	Densidad de la placa radiográfica.	67
CAPÍTULO III.....		73
PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN CON TINTAS PENETRANTES		73
3.1.	Análisis de la Situación Actual	73
3.2.	Elaboración del Procedimiento	76
3.3.	Variables Esenciales	76

3.3.1.	Identificación de cualquier cambio en el tipo o grupo de materiales: Tinta Penetrante, Solvente Limpiador, Removedor y Revelador.	76
3.3.2.	Preparación de la superficie a ensayar.	77
3.3.3.	Aplicación de la tinta penetrante.....	79
3.3.4.	Remover el exceso de tinta penetrante de la superficie.	83
3.3.5.	Aplicación del revelador.	86
3.3.6.	Tiempo mínimo y máximo entre procesos incluido el secado.	88
3.3.7.	Disminución del tiempo de permanencia de la tinta penetrante.	89
3.3.8.	Incremento del tiempo para la interpretación final.	91
3.3.9.	Intensidad de luz mínima aceptable.	94
3.3.10.	Temperatura en la superficie a inspeccionar.....	95
3.3.11.	Evaluación periódica del ensayo con tintas penetrantes.	95
CAPÍTULO IV.....		97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		97
4.1.	Conclusiones	97
4.2.	Recomendaciones.....	100
REFERENCIAS.....		101
ANEXOS		106
ANEXO 1A		107
ANEXO 1B		108
ANEXO 1C		109
ANEXO 1D		112

ANEXO 1E.....	113
ANEXO 1F.....	114
ANEXO 1G.....	115
ANEXO 1H.....	122
ANEXO 1I.....	123
ANEXO 1J.....	128
ANEXO 1K.....	129
ANEXO 1L.....	130
ANEXO 1M.....	131
ANEXO 1N.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Fig. 1 Estructura de la película radiográfica.	11
Fig. 2 La curva característica de una película radiográfica.....	14
Fig. 3 La pendiente de la curva característica	15
Fig. 4 Diagrama de la ley inversa del cuadrado de la distancia	23
Fig. 5 Proceso de aplicación de Tintas Penetrantes	29
Fig. 6 Capilaridad de un Líquido.	31

CAPÍTULO II

Fig. 7 Valoración Porcentual de las Actividades más Importantes en la Inspección con Gammagrafía.	38
Fig. 8 Análisis de la visibilidad del hilo sensible.....	40
Fig. 9 Análisis de la Densidad de las Placas Radiográficas.	40
Fig. 11 Conexión de la fuente con el comando de control a distancia.....	46
Fig. 10 Vista de Corte Proyector Rayos Gamma	46
Fig. 12 Proyector cuando la fuente está expuesta al ambiente.....	47
Fig. 13 Comando para operar a distancia.....	47
Fig. 14 Punta del Proyector	48
Fig. 15 Penumbra Geométrica.....	51
Fig. 16 Esquema forma fuente radiactiva Ir-192	52
Fig. 17 Tamaño de la fuente radiactiva de Ir-192	52
Fig. 18 Forma de la fuente radiactiva según ASTM E1114.....	53
Fig. 19 Toma Panorámica con 4 Películas para Cubrir el Perímetro de la Tubería... ..	56

Fig. 20 Técnica una sola pared irradiada una sola imagen obtenida utilizando una sola película.....	56
Fig. 21 Técnica Radiográfica, doble pared irradiada y una sola imagen obtenida. ...	58
Fig. 22 Técnica Elíptica	59
Fig. 23 Colimador Direccional de Tungsteno para Iridio 192	66
Fig. 24 Tubería de Acero ASTM A106 Gr. B de diámetro de 16 pulg.....	70
Fig. 25 Dibujo en Autocad de Ubicación de la Película y Fuente Radiactiva.	70

CAPÍTULO III

Fig. 26 Diagrama Causa-Efecto (Ishikawa) para Analizar Gráficamente la Situación Actual en el Ecuador para Inspección con Tintas Penetrantes.....	74
Fig. 27 Aplicación del Limpiador Met-L-Check E-59A sobre la Superficie.....	78
Fig. 28 Cordón de Soldadura limpio antes de Aplicar Tinta Penetrante.....	78
Fig. 29 Aplicación de Tinta Penetrante Visible Met-L-Check VP-30.....	79
Fig. 30 Exceso de Tinta Penetrante en el Cordón de Soldadura	83
Fig. 31 Método C, adecuada limpieza (Izq.), Excesiva limpieza (Der.)	85
Fig. 32 Kit para el Ensayo con Tintas Penetrantes, Removedor, Tinta Penetrante, Agua y Revelador.....	88
Fig. 33 Bloque Comparador para Tintas Penetrantes.....	90
Fig. 34 Indicaciones sobre un Cordón de Soldadura.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1 Unidades Radiológicas.....	8
Tabla 2 Temperatura y tiempo de revelado recomendado.	17
Tabla 3 Temperaturas y Tiempos Mínimos y Máximos de Revelado	18
Tabla 4 Temperaturas y tiempos de Lavado Final.	20
Tabla 5 Listado de películas radiográficas industriales Agfa-Gevaert	21
Tabla 6 Clasificación de Procesos y Materiales para el Ensayo con Tintas Penetrantes.	27
Tabla 7 Presión Capilar P vs Tensión Superficial.....	32

CAPÍTULO II

Tabla 8 Matriz de Priorización de Holmes para el Análisis de Situación Actual de la Gammagrafía en el Ecuador.....	35
Tabla 9 Puntaje y Valores Porcentuales Obtenidos de la Matriz de Holmes.....	37
Tabla 10 Resultados de Placas Radiográficas tomadas con el Procedimiento Escrito de Gammagrafía Actual.	39
Tabla 11 Composición Química Acero ASTM A106 Grado B	42
Tabla 12 Propiedades Mecánicas ASTM A106 Grado B.	43
Tabla 13 Composición Química del Acero ASTM A36.....	43
Tabla 14 Composición Química del Acero ASTM A36.....	44
Tabla 15 Coeficiente de Atenuación de Radiación Gamma	44
Tabla 16 Características de los proyectores Modelos Delta y Sigma	45
Tabla 17 Valores máximos de Penumbra geométrica.....	49
Tabla 18 Sistema de Clasificación de Película Radiográfica.....	54

Tabla 19 Densidad Radiográfica por Prueba	61
Tabla 20 Dosis de Radiación Máxima aplicada en el Ecuador	62
Tabla 21 Límites de Dosis de Radiación Recibida.	63
Tabla 22 Disponibilidad de Sets IQI Tipo Alambre.	68
Tabla 23 Selección del Hilo Sensible en Función del Espesor Nominal del Objeto Irradiado.	69
Tabla 24 Densidades Mínimas y Máximas Admisibles en la Placa Radiográfica. ...	69

CAPÍTULO III

Tabla 25 Clasificación de la Inspección con Tintas Penetrantes por Tipos y Métodos.	80
Tabla 26 Tiempo Mínimo de Permanencia de la Tinta Penetrante Visible después de su Aplicación.....	82
Tabla 27 Criterios de Aceptación para la Inspección de Juntas en T y Traslapadas en Soldadura de Filetes en Tanques de Almacenamiento.....	93
Tabla 28 Criterios de Aceptación para la Inspección de Juntas en T y Traslapadas en Soldadura de Filetes en Estaciones de Bombeo, Pozos y Refinerías.	94
Tabla 29 Frecuencia para Mediciones Periódicas que Permiten Evaluar el Ensayo con Tintas Penetrantes	96

GLOSARIO

COLIMADOR: Es un dispositivo hecho de un material absorbente de radiación que sirve para dar dirección a los rayos gamma y proveer de blindaje contra la radiación.

DEFECTO DE SOLDADURA: Es una Indicación(es) o discontinuidad(es) que después del proceso de interpretación, según los criterios de aceptación/rechazo de normas de referencia , el inspector considero relevante y se procede a reparar la soldadura.

DENSITÓMETRO: Dispositivo para medir la densidad fotográfica de la película radiográfica.

DISCONTINUIDADES: Es una interrupción en la estructura de un material, que comprometen la resistencia del material o soldadura.

(AI): Acumulación de Defectos.

(BT): Quemón

(C): Fisuras.

(ESI): Inclusiones de Escoria Alargadas / **(ISI):** Redondeadas

(EU): Mordedura externa e **(IU):** interna

(IC): Concavidad interna

(ICP): Falta de penetración interna en técnica con cordón sellado

(IF): Fusión incompleta

(IFD): Falta de fusión por traslape en frío

(IP): Falta de penetración sin presencia de High-Low (Des alineamiento)

(IPD): Falta de penetración con presencia de High-Low (Des alineamiento)

(P): Porosidad

END: Ensayos No Destructivos, se refiere al desarrollo y la aplicación de métodos técnicos para examinar los materiales o componentes de manera que no perjudiquen la futura utilidad y servicio de los mismos, con el fin de detectar, localizar, medir y evaluar defectos.

GAMMAGRAFÍA: Método de Ensayo No Destructivo donde se producen placas radiográficas usando rayos gamma.

GTAW: Gas Tungsten Arc Welding (Soldadura de Arco Eléctrico con Electrodo de Tungsteno y Gas de Protección), es un proceso de soldadura manual, con protección gaseosa inerte, Argón (Ar), Helio (He) o mezclas de los dos y electrodo de Tungsteno o una aleación de Tungsteno con Torio o con Zirconio.

HILO SENSIBLE: El hilo sensible es el alambre específico del set correspondiente de los indicadores de calidad de imagen tipo de alambre (IQI) que debe ser visible en la imagen radiográfica, que proporciona datos visuales o cuantitativos, o ambos, para determinar la calidad de imagen radiográfica.

INDICACIONES: Es la evidencia del resultado de la examinación con Ensayos No Destructivos que requiere la interpretación de un inspector para determinar si constituye o no un defecto de soldadura.

INTERPRETACIÓN: Examinación de las indicaciones y discontinuidades presentes en la soldadura inspeccionada que después de ser identificadas y medidas,

el inspector compara los valores con los criterios de aceptación/rechazo y emite un veredicto.

IQI: (Image Quality Indicator) Indicador de Calidad de Imagen.

PENUMBRA GEOMÉTRICA: La penumbra geométrica es la borrosidad o falta de definición en una imagen radiográfica; que depende del tamaño focal de la fuente radiactiva, la distancia fuente objeto a irradiar y la distancia fuente película.

RADIACIÓN DE REBOTE: Es la radiación que rebota o se dispersa más de 90° con respecto al punto donde se encuentra la fuente radiactiva, es decir, hacia atrás de la fuente.

RAYOS GAMMA: Radiación penetrante electromagnética que tiene su origen en la desintegración de un núcleo radiactivo.

SMAW: Shielded Metal Arc Welding (Soldadura de Arco eléctrico con Electrodo Revestido), es un proceso de soldadura manual, con electrodo de un determinado revestimiento, que al quemarse genera humo lo que brinda una atmósfera de protección para el cordón de soldadura.

TIEMPO DE PERMANENCIA: El tiempo total que la Tinta Penetrante está en contacto con la superficie inspeccionada, incluyendo el tiempo requerido para su aplicación.

TINTAS PENETRANTES: Método de Ensayo No Destructivo que utiliza líquido adecuados que penetran discontinuidades abiertas a la superficie de materiales sólidos y, después de un tratamiento adecuado, indicar la presencia de discontinuidades.

INTRODUCCIÓN

Las estaciones de bombeo, se localizan siempre a pocos kilómetros de los pozos de petróleo y están conectadas con la mayor cantidad posible de los mismos mediante líneas de flujo. Se conoce como líneas de flujo, a las tuberías que conectan los pozos con las estaciones de bombeo, tienen diámetros nominales menores, pueden ser de: 2 pulg., 3 pulg., 4 pulg. hasta 6 pulg.

Las estaciones cumplen varias funciones, una es transportar el petróleo, bombeando por oleoductos secundarios, conectados en algunos casos con estaciones intermedias de mayor tamaño o directamente con las dos estaciones principales, localizadas en Lago Agrio.

Una segunda función es almacenar el crudo temporalmente en tanques metálicos, con el objeto de separar el petróleo, del agua de formación, del lodo y de los gases H_2S y CO_2 . En esa separación estática, por decantación el petróleo queda encima del agua, por ser de menor densidad. Por sedimentación, las partículas sólidas se separan de los fluidos y van al fondo del tanque, mientras que por difusión, los gases salen de los líquidos y suben hacia el techo del tanque. Otros equipos de la estación, están destinados a extraer el gas del petróleo utilizando efectos dinámicos, los cuales se aplican antes de que el petróleo llegue a los tanques de almacenamiento de crudo.

Una garantía para el buen funcionamiento de las estaciones y un tiempo de vida aceptable, está directamente relacionada con un control de calidad de los materiales y la soldadura, durante la construcción de las interconexiones entre tuberías y tanques de almacenamiento.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 Estaciones de bombeo de petróleo.

La estación de bombeo principal en el Ecuador está ubicada en Lago Agrio, es la recolectora de crudo de todos los campos, desde esa estación se inicia el bombeo de crudo hacia el puerto de Balao en la provincia de Esmeraldas, a continuación existen cuatro estaciones las cuales son: Lumbaqui, Salado, Baeza y Papallacta. Existen otras estaciones de bombeo, ubicadas en San Juan, Quiroga y Quinindé, cuya función es disminuir la presión que genera el cambio de altura, desde la Cordillera de los Andes hacia la Costa

Las estaciones de bombeo de petróleo reciben el crudo desde los pozos petroleros a través de líneas de flujo. El crudo primero pasa por un proceso de filtrado, donde los sólidos que contiene el fluido son atrapados para no dañar los equipos.

Luego, el crudo es calentado por medio de intercambiadores de calor con el objeto de reducir su viscosidad. Para que al final de los procesos el petróleo sea bombeado mediante bombas centrífugas, las que permiten que el crudo sea transportado a la siguiente estación o a su destino final en el puerto de Balao. (OCP Ecuador, 2013)

1.2 Procesos de soldadura en estaciones de bombeo de petróleo.

Toda construcción mecánica dentro de una estación de bombeo requiere de un proceso de soldadura, ya que los materiales son afectados por el calor del proceso. Los procesos de soldadura más utilizados para la construcción de estaciones de bombeo son el Shielded Metal Arc Welding (SMAW) y el Gas Tungsten Arc Welding (GTAW).

La soldadura con el proceso de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), se realiza de forma manual, usando un electrodo con un determinado revestimiento. Por el electrodo se hace circular corriente eléctrica alterno o continua, después se genera un corto circuito entre el electrodo y el material base que se va a soldar, el proceso puede alcanzar temperaturas de hasta 5500°C. La combustión del revestimiento del electrodo genera una atmósfera de protección mediante humo, para desalojar la humedad y elementos contaminantes del ambiente; también produce escoria que cubre al cordón de soldadura. (Flores, 2012)

GTAW es un proceso de soldadura manual, con protección gaseosa inerte y con aporte continuo mediante varillas de material semejante como el que se requiere soldar. El gas para protección del arco es el Argón (Ar), eventualmente Helio (He) o mezclas de los dos. El electrodo es de Tungsteno o una aleación de Tungsteno con Torio o con Zirconio, también se usa metales de la serie de los Lantánidos. Con el proceso de soldadura GTAW, se obtienen cordones de mayor calidad y una mejor presentación, debido a que no produce escoria y permite soldar espesores finos hasta gruesos, a partir de 3 mm. (Uribe, 2008)

1.3 Introducción a los ensayos no destructivos.

El control de calidad de las soldaduras y materiales, se puede realizar tomando muestras y sometiéndolas a ensayos mecánicos destructivos de tracción, doblado o impacto, pero provocará una remoción permanente de una parte del material de la pieza; lo cual significará que la pieza ya no cumpla con la función prevista y como consecuencia, esa pieza ya no podrá ser usada. Es por ese motivo, que se desarrolló el estudio de los Ensayos No Destructivos, específicamente creados con el propósito de analizar e inspeccionar materiales y procesos, verificando su integridad sin dañarlos. El Control de calidad es fundamental en todo tipo de industrias, pues también sirve para aumentar la producción. (Ness & Sherlock, 1996)

En la actualidad, el desarrollo tecnológico de un equipo fabricado industrialmente, como un automóvil o una computadora, va de la mano con el desarrollo de los Ensayos No Destructivos, que tuvieron que ser aplicados para controlar la calidad de cada uno de sus componentes. El producto final, es el resultado de un ensamblaje de partes y piezas, la fabricación de cada una de ellas, es cada vez más compleja porque las expectativas y las exigencias del consumidor aumentan cada día. Por ejemplo, en automóviles ya no se usan carburadores sino sistemas de inyección de combustible con componentes electrónicos, los cuales deben ser muy eficaces para lograr la economía del combustible, por lo que su control de calidad es imprescindible. Un consumidor, cuando compra un vehículo nuevo espera que no falle, sea económico en el consumo de combustible y su costo sea asequible. Todas esas exigencias son posibles de cumplir si se aplica control de calidad. (Ness & Sherlock, 1996)

El Control de Calidad, solo se lo puede realizar mediante el uso de los Ensayos No Destructivos, porque los END son la única manera de conocer si existe algo mal dentro del material, sin afectar su futura utilidad. Un Ensayo No Destructivo, no afecta de ninguna manera el funcionamiento, propiedades o servicios de determinado material o proceso.

En el control de calidad de las juntas soldadas, los Ensayos No Destructivos son utilizados para un amplio campo de aplicaciones como: verificar la confiabilidad del material, prevenir futuras fallas o fracturas, cuidar la integridad de las personas al evitar accidentes, mantener en el tiempo la relación entre fabricantes y clientes, controlar el proceso de fabricación para obtener una calidad estándar de los productos. (Ness & Sherlock, 1996)

Existen tres parámetros a considerar para elegir el método de inspección:

- ✓ Limitaciones del método de inspección.
- ✓ Disponibilidad de Normas de Referencia con Criterios de Aceptación/Rechazo para el método de inspeccionar.
- ✓ Costo.

Las limitaciones del método de inspección, se utilizan como un factor para determinar cuál de los métodos de Ensayos No Destructivos, es el más conveniente para obtener un mejor resultado en las diferentes aplicaciones.

A su vez, los criterios de aceptación/rechazo de las normas de referencia, permiten evaluar a las discontinuidades de las soldaduras. Así se establece cuando una discontinuidad puede ser o no considerada como defecto, los tipos de discontinuidades, el tamaño máximo aceptado para una discontinuidad. Los criterios de aceptación/rechazo se encuentran integrados en la mayoría de códigos y normas.

Cada método de inspección tiene un costo diferente, la inspección visual es más barata, pero es limitada porque solo puede inspeccionar la superficie de los materiales; en general, la Gammagrafía y el Ultrasonido cuestan más que Tintas Penetrantes o Partículas Magnéticas. Existen otros factores que pueden influir en los costos. Por ejemplo, la distancia a la que deberá movilizarse el personal, la cantidad de trabajo, las facilidades de hospedaje y la calidad de las vías de acceso. El cálculo de costos de los ensayos debe considerar, la disponibilidad del equipo para realizar la inspección, el tiempo que toma llevar a cabo la inspección y el costo de la mano de obra y los materiales. (ANSI/AWS B1.0, 1980)

Los métodos más usados en la inspección de soldaduras dentro de las estaciones de bombeo de petróleo, mediante Ensayos No Destructivos son: Gammagrafía y Tintas Penetrantes. Los principales métodos de Ensayos No Destructivos, utilizados a nivel internacional para la inspección de soldaduras son: Gammagrafía, Tintas Penetrantes, Partículas Magnéticas y Ultrasonidos.

En interconexiones de tuberías, el objetivo es inspeccionar las juntas soldadas sin afectar su capacidad de funcionamiento. Las inspecciones se basan en normas y procedimientos para su aplicación. También es necesario que las personas que operan tengan formación técnica y conocimientos teórico-prácticos sobre el tema, adicionalmente se requiere de recursos materiales, equipos e instrumentos disponibles en el mercado mundial, pero que necesitan de una guía para seleccionarlos y usarlos de manera adecuada.

1.4 Gammagrafía

La gammagrafía es una inspección que puede ser usada en todos los materiales. Otros factores como el tipo de fuente, actividad de la fuente, tiempo de exposición, geometría de las juntas soldadas, también deben ser tomados en cuenta al momento de su selección. (ANSI/AWS B1.0, 1980)

1.4.1 Radiación ionizante.

Los rayos gamma (γ), son radiaciones electromagnéticas de igual naturaleza que los rayos X. “Los rayos gamma provienen de la desintegración de núcleos atómicos de un elemento radiactivo. La energía de la radiación gamma y la intensidad no son regulables; depende de la naturaleza de la fuente radioactiva.” (AGFA, 1989, pág. 10)

Estos rayos son capaces de penetrar cualquier material. Pueden ser intensificados con el uso de las denominadas pantallas intensificadoras de plomo, que se colocan a cada lado de la película radiográfica, lo que finalmente produce una mejor imagen de la soldadura.

Los seres humanos, se exponen todos los días a fuentes naturales de radiaciones ionizantes, por lo que su organismo está acostumbrado a recibir radiación. Por ello, aunque la radiación constituye un peligro para la salud de las personas, su uso debe ser medido y controlado. Una excesiva exposición a rayos gamma puede producir enfermedades y hasta la muerte. Por lo cual, es obligatorio que el personal que trabaje en gammagrafía posea instrumentos para detectar la radiación y medir las dosis recibidas.

Tabla 1 Unidades Radiológicas

Unidades empleadas hasta ahora (1)			Unidades SI	
Magnitud	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Actividad de una muestra radioactiva	curio (Ci)	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ /s	becquerel (Bq)	1 Bq = 1/s
Dosis de Ionización	röntgen (R)	1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/Kg	---	C/Kg
Dosis absorbida	rad (rad)	1 rd = 1/100 J/Kg	gray (Gy)	1 Gy = 1 J/Kg
Dosis equivalente	rem (rem)	1 rem = 1/100 J/Kg	sievert (Sv)	J/Kg
Intensidad de radiación	röntgen/s	1 röntgen/s 1 R/s	---	$2,58 \times 10^{-4}$ C/Kg.s unidad = A/Kg = C/Kg.s

Fuente: AGFA. (1989, pág. 19)

Nota: (1) Este tipo de unidades son las más empleadas en el trabajo en Ecuador.

En la Tabla 1, se puede observar las unidades radiológicas que más se utilizan en el trabajo de inspección con gammagrafía industrial.

La dosis de ionización se la puede definir como: “La dosis de radiación es definida indirectamente por la cantidad de ionización que genera ésta dosis en un Kg de aire.” (AGFA, 1989, pág. 20)

1.4.2 Fuentes radiactivas artificiales.

Las fuentes radiactivas artificiales son creadas por el ser humano, mediante fisión o irradiación en un reactor nuclear. Mediante esos métodos se pueden obtener isótopos en grandes cantidades y en un estado casi puro, lo cual es fundamental para

su comercialización. Para los ensayos no destructivos se debe considerar la longitud de onda e intensidad de radiación, la vida media y la actividad específica; por lo que solo pocos radioisótopos que se conocen son aptos para realizar gammagrafía. (AGFA, 1989)

En el Ecuador se utiliza el isótopo radioactivo Iridio 192, porque tiene una capacidad de penetración grande, lo que le permite cubrir un rango amplio de espesores en acero y además porque posee una vida media de 74 días, con lo cual una fuente radiactiva puede ser usada hasta por un año, lo cual disminuye la cantidad de importaciones, ya que no se fabrica en el país.

Vida media de una fuente radioactiva: “La vida media de una fuente radiactiva es el período de tiempo en el que la intensidad de la radiación emitida disminuye hasta la mitad de su nivel inicial.” (AGFA, 1989, pág. 37).

Actividad o Intensidad de la fuente: “La actividad de una fuente es el número de átomos que se desintegran en un tiempo dado.” (AGFA, 1989, pág. 37)

Exposición (E): “Por exposición se entiende, la dosis de radiación que incide en la emulsión sensible de la película, es decir, la intensidad (I) de la radiación incidente, multiplicada por el tiempo de exposición (t).” (AGFA, 1989, pág. 54) Por consiguiente se expresa como:

$$E = I \times t \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Las ventajas de los rayos gamma sobre los rayos X para realizar radiografía industrial son las siguientes:

- No requieren de energía eléctrica ni refrigeración, por lo que son ideales para el trabajo en campo.
- Los fabricantes producen fuentes radiactivas de diversos diámetros para poder usar distancias cortas fuente-película. Ideales para radiografiar tuberías.
- Se pueden utilizar radioisótopos de alto poder de penetración, como Cobalto 60 e Iridio 192, lo que permite hacer radiografías en metales de espesores gruesos.

Las discontinuidades contenidas en la soldadura, se muestran en la placa radiográfica con una densidad más baja que el material base, generando contraste. Esta diferencia de densidad de imagen radiográfica, se da por la presencia de aire dentro de fisuras, poros, falta de fusión y otros.

En gammagrafía es importante determinar el tipo de fuente de radiación, pues la calidad de imagen radiográfica varía con la intensidad de la fuente y con el cálculo del tiempo de exposición.

La radiación de rebote es causada por el reflejo de la radiación producida por la cercanía de un cuerpo sólido a la zona a inspeccionar, esa radiación se debe detectar colocando una letra “B” de plomo con unas dimensiones mínimas de 13 mm de alto y 1.6 mm de espesor, en la parte posterior de la película y centrada, pero sin que la ubicación de esta letra interfiera con la imagen del cordón de soldadura ni se interponga con el hilo sensible del Indicador de Calidad de Imagen o IQI por sus siglas en inglés. Si la imagen de la “B” se muestra con un fondo más oscuro que las otras letras o números que aparecen en la placa; en ese caso la radiografía es inaceptable porque hay una inadecuada protección contra la radiación de rebote. Una

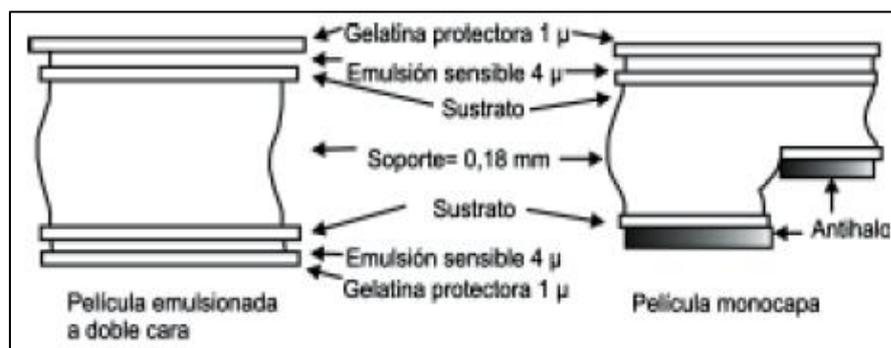
imagen oscura de la letra “B” en un fondo claro no se considera, lo que significa que la placa radiográfica no tiene radiación de rebote.

1.4.3 Película radiográfica.

Para el correcto uso y elección de una película radiográfica para una cierta aplicación hay que conocer sobre la sensitometría. “La sensitometría es la ciencia que tiene por objeto el estudio de las propiedades fotográficas de una película y de los métodos que permiten cuantificar las propiedades.” (AGFA, 1989, pág. 51)

La estructura de la película radiográfica está compuesta por siete capas. La primera es un soporte de triacetato de celulosa o poliéster, a los dos lados del soporte se aplica una capa exterior de gelatina endurecida para proteger la emulsión, también una capa de emulsión compuesta principalmente de cristales de haluros de plata distribuidos en la gelatina y una capa delgada de sustrato que afirma la adherencia de la emulsión al soporte.

Fig. 1 Estructura de la película radiográfica.



Fuente: (Cabrera, 2011)

En la Figura 1, se observa una fina lámina de plástico poliéster (0.18mm de espesor) denominada soporte, cubierta por los dos lados de una emulsión sensible que está protegida por una gelatina aglomerante.

1.4.4 Imagen latente.

Los elementos químicos halógenos, ubicados en la columna VIIA de la tabla periódica, tienen la propiedad de ionizarse fácilmente, es decir, pueden recibir un electrón y albergarlo en su última capa, haciéndose de carga negativa; por otro lado la plata puede ceder un electrón sin alterar su estabilidad quedando cargado positivamente. Al unirse aquellos elementos, forman los llamados haluros de plata, por ejemplo el Bromuro de Plata (BrAg). Los haluros al ser expuestos a radiación ionizante como los rayos gamma provocan la ionización de este compuesto, destruyendo la molécula al gasificar el Bromo quedando solo plata metálica. (Bossi, Iddings, & Wheeler, 2002)

Cuando la energía proveniente de una fuente radiactiva incide en una película radiográfica, actúa sobre la emulsión sensible, las partes que contienen haluros de plata y que captan suficiente radiación, se alteran, haciendo que estos cristales se transformen en plata metálica.

En las zonas donde ha incidido una mayor cantidad de radiación, hay una mayor liberación de partículas de plata, mientras que en las zonas que la radiación ha sido débil todavía existe Bromuro de Plata. Como resultado, se conforma una imagen en la capa fotosensible, durante la exposición, sin embargo esta imagen es invisible, por lo que se llama imagen latente. (Bossi, Iddings, & Wheeler, 2002)

1.4.5 Revelado.

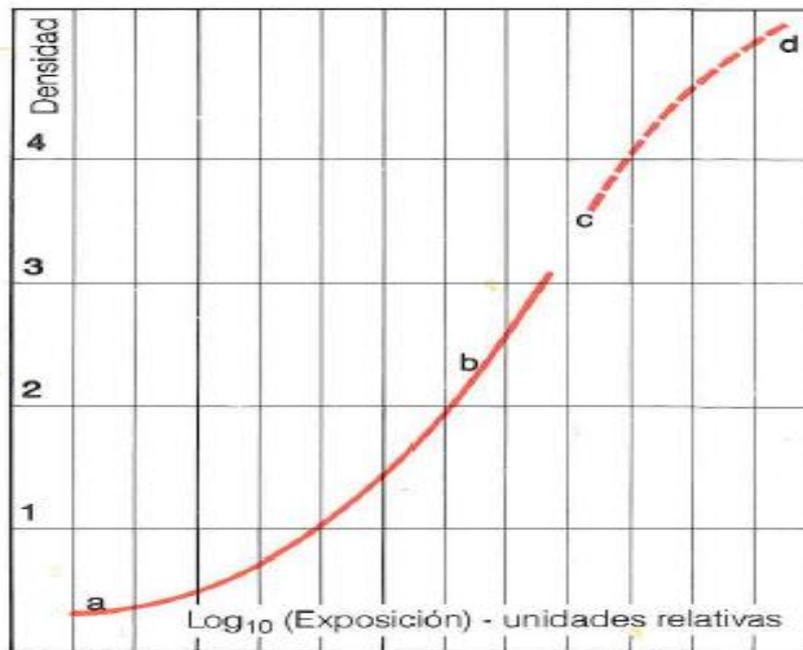
Existen algunos materiales que son propensos a decolorarse con una cierta exposición a la luz, la mayoría con una relación 1:1, es decir, un fotón de luz altera una molécula o átomo del material que se decolora. En el caso del los haluros de plata sucede lo mismo con la exposición a la radiación de rayos gamma, donde cada fotón tiene gran cantidad de energía con la que el haluro de plata reacciona y se crea la imagen latente; pero es esencial el revelado posterior en un cuarto oscuro, para producir una reducción química, que reduce al haluro de plata desde su estado molecular para obtener plata metálica, dejando a la zona que no fue lo suficientemente afectada por la radiación como bromuro de plata y por la acción de los agentes del revelador se desprende el compuesto de la película, dejando solo la imagen visible del cordón de soldadura. (Bossi, Iddings, & Wheeler, 2002)

Los agentes químicos que contiene el revelador pueden tener sus propias características. Obtener un buen resultado al momento de revelar la película radiográfica depende del agente utilizado y la concentración del producto. Generalmente se utilizan mezclas de agentes reveladores como Metol-Hidroquinona o Phenidone-Hidroquinona. (AGFA, 1989)

1.4.6 La curva característica.

La relación entre la exposición y la densidad en una radiografía se expresa comúnmente en forma de una curva exponencial denominada curva característica, la cual relaciona la densidad con el logaritmo de la exposición relativa. Ninguno de esos dos parámetros posee unidades. (Kodak, 1980)

Fig. 2 La curva característica de una película radiográfica



Fuente: (AGFA, 1989, pág. 55)

En la Figura 2, la curva tiene una forma de “S” alargada y oblicua. La zona inferior (ab) de la curva se llama pie o talón, la parte media (bc) es el tramo rectilíneo y la parte superior (cd) recibe el nombre de hombro. (AGFA, 1989)

Para obtener la curva característica, se irradia a varias áreas sucesivas de un rollo de película radiográfica. Posterior al revelado, se miden las densidades mediante un densitómetro y se representan en función de los valores logarítmicos de las exposiciones.

1.4.7 Imagen Radiográfica por Contraste.

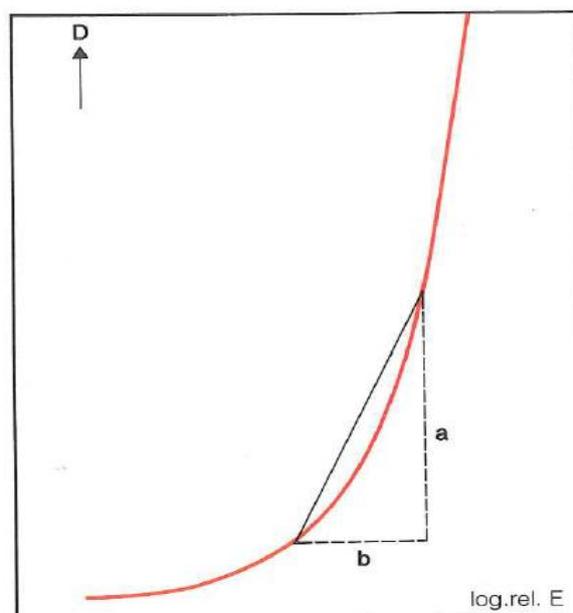
La visualización de las discontinuidades en una imagen radiográfica depende del contraste. “El contraste de una imagen es la relación entre la intensidad luminosa de la imagen y la del fondo adyacente.” (AGFA, 1989, pág. 54)

El contraste entre dos zonas con diferente densidad en una misma película, se mide por la diferencia o por el cociente entre estas dos magnitudes. A la diferencia de densidades se la conoce como contraste radiográfico.

Si el contraste de una película radiográfica aumenta notablemente, a ésta se llama “de alto contraste” o “dura”, en caso contrario se la llama “suave”. Para la medición del contraste se hace referencia al término “gradiente” (G_D), donde (D) es la densidad a la que se determinó el gradiente (G). El gradiente aumenta con la densidad.

El gradiente es la pendiente en un punto de la curva característica y es la tangente trigonométrica de la curva en ese punto (a / b Fig.3). Esa pendiente es llamada “gradiente medio” y representa un promedio de todos los gradientes en ese punto, la norma ISO 7004 recomienda el uso del gradiente medio para densidades entre 1,5 y 3,5 como una característica general de la película. (AGFA, 1989)

Fig. 3 La pendiente de la curva característica



Fuente: (AGFA, 1989, pág. 57)

En la Figura 3, se muestra la pendiente de una curva característica de una película radiográfica. Lo importante de la pendiente, es que hace notar que a medida que aumenta la exposición (Cantidad de radiación recibida por la película), la densidad (la ordena en este caso) varia significativamente. En la práctica significa que, la película es muy sensible a la variación de espesores del material radiografiado, así como a detectar la presencia de discontinuidades pequeñas.

1.4.8 Procesamiento de películas radiográficas en el cuarto oscuro.

El procesamiento de la película radiográfica se realiza de manera manual dentro de un cuarto oscuro. Es necesario que el cuarto oscuro este lo más cercano posible al lugar donde fueron tomadas las placas radiográficas; el cuarto debe ser totalmente aislando de la entrada de luz. (Kodak, 1980)

El cuarto oscuro deberá poseer las siguientes características:

Equipado con luz roja de seguridad, recipientes de plástico con aislamiento térmico y tapas de sellado hermético; termómetros de inmersión, cronómetro, tijera y negatoscopio. La temperatura al interior de la cámara oscura será controlada con un sistema de aire acondicionado y extracción de gases.

1.4.9 Proceso de revelado manual.

El Código ASME Sección V Art. 2, T-231.2, solicita el uso de la Norma ASTM E-999 (Standard Guide for Controlling the Quality of Industrial Radiographic Film Processing) como guía para establecer el control de calidad durante el procesamiento de películas radiográficas en el cuarto oscuro.

Según ASTM E-999, el procesamiento manual de películas radiográficas, utilizando tanques para almacenamiento de los reactivos y el agua, debe realizarse en recipientes herméticos que tengan aislamiento térmico, livianos y con capacidad de 5

galones, de materiales especificados en la sección 5.1, como: vidrio, polietileno, PVC, acero inoxidable. (ASTM E-999, 1995)

El secado de películas podrá hacerse manualmente usando papel absorbente de humedad y secado final con un secador eléctrico.

El laboratorio móvil de Radin posee 4 tanques, uno para contener el agente revelador, un segundo con agua para el baño de parada o neutralización del revelado, el tercero para el fijador y el último para el lavado final de las películas.

Una vez que ha pasado el tiempo establecido para el revelado, es necesario detener el proceso pasando la placa radiográfica al siguiente recipiente que contiene agua limpia, transcurrido el tiempo de parada se coloca la película en el fijador durante un tiempo recomendado por el fabricante, finalmente la radiografía pasa al cuarto recipiente con agua limpia a la cual se le agrega un humectante que disminuye la tensión superficial del agua, de esa manera se evita manchas en la superficie de la película.

1.4.10 Tiempo de revelado.

Las películas irradiadas, se procesarán con reactivos químicos: durante 5 minutos en el Revelador si la temperatura de éste es 20°C (68°F).

Tabla 2 Temperatura y tiempo de revelado recomendado.

TEMPERATURA (°C)	18	20	22	24	26	28	30
TIEMPO EN EL REVELADOR (min)	6	5	4	3,5	3	2,5	2

Fuente: (AGFA, 1989, pág. 109)

En la tabla 2, muestra los valores de tiempo de revelado cuando no sea posible mantener la temperatura del revelador en el laboratorio móvil en 20°C. La temperatura del revelador no puede ser nunca inferior a 18°C, según el catálogo del fabricante para el revelador G128- G-150. (Agfa Gevaert, 2012)

Tabla 3 Temperaturas y Tiempos Mínimos y Máximos de Revelado

TEMPERATURAS DE REVELADO				
Temperatura (°F)	Temperatura (°C)	Tiempo Normal (min)	Tiempo Máximo (min)	
60	15,5	9	15	
62	16,7	7,5	13	
64	17,8	6,5	11	
66	18,5	5,75	9,25	
68	20	5	8	
70	21,1	4,25	7	
72	22,2	3,75	6,25	
74	23,3	3,25	5,5	
76	23,9	3	5	
78	24,5	2,75	4,75	

Fuente: KODAK. (1990, pág 25)

En la Tabla 3, se aprecia otra tabla raelacionada entre la temperatura y el tiempo. Como el trabajo de revelado debe ser realizado en el campo, donde no existen facilidades como obtener hielo para bajar la temperatura del revelador o adquirir un calentador eléctrico que su resistencia no entre en contacto con el revelador porque es muy corrosivo. Por lo cual, la solución es variar el tiempo normal de revelado a un valor mayor en el caso que la temperatura de trabajo sea menor a 20°C, pero existen límites como muestra la tabla. Para temperaturas que superan los 20°C deberán usar los tiempos máximos de revelado, por el desgaste del revelador por su constante uso, entonces habrá que aumentar el tiempo de revelado, para compensar ese desgaste.

Durante el revelado es necesario que agitar la película en el tanque en los primeros 30 segundos, para de esa manera eliminar burbujas de aire en la superficie

de la película, que posteriormente pueden crear manchas blancas en la imagen del cordón de soldadura y para que la penetración del revelador sea uniforme. La agitación debe ser de forma horizontal y vertical.

1.4.11 Tiempo de fijado.

Acorde con el Código ASME V art. 22, SE-94. Pág. 277. El tiempo de fijado de la película es al menos el doble al de baño de parada, y no puede ser mayor a 15 minutos.

En la práctica el tiempo de fijado es de 2.5 minutos si la temperatura es 20°C (68°F), se puede usar incluso hasta 5 minutos cuando la temperatura es mayor de 20°C.

1.4.12 Tiempos de baño de parada y de lavado final.

El tiempo de baño de parada es de 2-3 minutos en agua limpia y, para luego efectuar un lavado final de 20 minutos, procediendo a cambiar el agua de parada y lavado final periódicamente. El baño de parada se realiza después del revelado y el lavado final después del fijador. Si se está utilizando agua con alto contenido de minerales se hace necesario además, el uso de humectante (Photo Flo) en un recipiente adicional con agua en donde se lavan finalmente las películas durante un periodo de 30 segundos a 1 minuto. La temperatura del baño de parada, el fijador y el lavado final debe mantenerse dentro de ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) de la temperatura del revelador. (ASTM E-999, 1995)

Tabla 4 Temperaturas y tiempos de Lavado Final.

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (min)
De 5 a 12	lavar 30
de 13 a 25	lavar 20
de 26 a 30	lavar 15
mayor a 30	lavar 10

Fuente: AGFA. (1989, pág. 111)

Nota: Se debe evitar trabajar con una temperatura superior a 25°C.

En la tabla 4, se puede observar los diferentes rangos de temperatura que puede tener el agua para el lavado final de las películas, así como los tiempos correspondientes para el lavado. Los valores pueden variar dependiendo la calidad de agua que se utilice.

1.4.13 Tipos de películas radiográficas.

A nivel mundial existen muchos fabricantes de películas radiográficas para distintas aplicaciones, con pantallas intensificadoras o sin pantallas. Esas películas son llamadas también de “radiografía directa”, para diferenciarlas de las películas de pantallas fluorescentes o salinas.

El principal distribuidor de películas en el Ecuador es Agfa-Gevaert, que dispone de una amplia gama de películas en las cuales se encuentran las de radiografía directa como la STRUCTURIX D2, D3, D4, D5, D7, y D8.

Las películas con pantallas fluorescentes o salinas, denominadas por muchos fabricantes y distribuidores como del “tipo pantalla”. Esas películas son de grano

ultrafino y son usadas para hacer micro radiografía, donde se puedan ver fisuras y discontinuidades microscópicas. (AGFA, 1989)

Tabla 5 Listado de películas radiográficas industriales Agfa-Gevaert

Clasificación de películas de radiografía industrial Agfa-Gevaert de la serie STRUCTURIX				
Tipo de Film	Factores de exposición relativa (aprox)	Gradiente (G_{2,0})	Grupo DIN	Clase ASTM
	Ir 192 (*)			
D2	7,00	5,80	G1	Special
D3	4,00	5,00	G1	1
D4	2,50	5,00	G2	1
D5	1,60	5,00	G2	1-2
D7	1,00	4,90	G3	2
D8	0,55	4,80	G4	2
(*) Pantallas de plomo de 0,027 mm de grosor				

Fuente: AGFA. (1989, pág. 61)

En la tabla 5, se puede observar la clasificación de películas radiográficas para el uso con el isótopo radiactivo Iridio 192, también se muestra las normalizaciones DIN de Alemania y ASTM de Estados Unidos que agrupan a las películas en grupos de calidad como se ve en las últimas columnas.

1.4.14 Elección del tipo de película.

Varios códigos y normativas internacionales recomiendan que la elección del tipo de película radiográfica se determine según la aplicación específica.

Para la inspección de soldaduras mediante gammagrafía donde se desea detectar pequeñas fisuras, generalmente se utilizan películas del grupo G1 o G2. Para inspeccionar piezas fundidas, se especifica una película de tipo G. Para inspección de piezas pequeñas, o es necesario ampliar la imagen se debería usar una película del tipo G1. (AGFA, 1989)

1.4.15 Penumbra geométrica.

“La penumbra geométrica es el grado de detalle visible que posee la radiografía, que es resultante de una exposición o enfoque de la fuente de gammagrafía. La penumbra geométrica tiene varios factores, que son: la distancia fuente-película, la distancia entre el objeto a examinar y la película y el tamaño de la fuente radioactiva.” (ASTM E 94, 2004, pág. 5)

1.4.16 Distancia fuente película.

La penumbra geométrica define la técnica que puede ser aplicada para radiografiar una tubería o tanque y de esa manera define indirectamente la distancia fuente película.

En la técnica de una sola pared irradiada, la distancia fuente película es el radio nominal de la sección transversal de la tubería, ese valor no puede cambiar, pues es función del diámetro de la tubería.

Para que pueda cumplir con la medida máxima de penumbra geométrica establecida en el Código ASME V Art, 2, se debe relacionar el radio nominal con el espesor de la tubería.

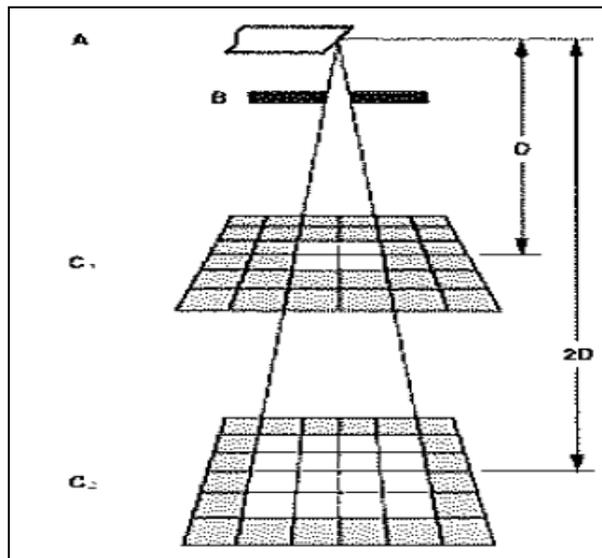
Para la técnica de irradiación en doble pared de tubería para obtener una sola imagen radiográfica, la distancia fuente película es el diámetro nominal de la tubería. Se aplica el criterio de penumbra geométrica para verificar que la técnica es adecuada para los distintos diámetros de tuberías existentes en estaciones de bombeo.

La técnica de irradiación a través de dos paredes de la tubería para obtener dos imágenes radiográficas de la soldadura, la distancia entre la fuente y la película se vuelve crítica ya que no existe una distancia máxima o definida por la medida de la tubería, por lo que se calcula una distancia mínima en relación con la penumbra geométrica, cumpliendo con el criterio establecido en el Código ASME V.

1.4.17 Ley inversa del cuadrado de la distancia.

Cuando se utiliza una fuente radiactiva, la intensidad de la radiación que llega al objeto irradiado, se rige por la distancia entre la fuente y el objeto y varía inversamente con el cuadrado de la distancia.

Fig. 4 Diagrama de la ley inversa del cuadrado de la distancia



Fuente: Kodak. (1980, pág. 30)

En la figura 4, se observa el diagrama explicativo de la ley inversa del cuadrado de la distancia.

Los rayos gamma se comportan de acuerdo con las leyes de la luz, que divergen cuando se emiten desde una fuente y al aumentar la distancia cubren un área cada vez más grande, su intensidad disminuye a medida que se alejan de la fuente. Aquel principio se ilustra en la figura 4. En el ejemplo, se supone que la intensidad de los rayos gamma emitidos por la fuente A tienen intensidad constante, pasan a través de la placa que tiene una abertura B de un área de 4 pulgadas cuadradas y llegan a la superficie de incidencia C1, que se encuentra a una distancia de 12 pulgadas desde la fuente (D). Entonces, cuando la superficie de incidencia es desplazada 12 pulgadas más lejos de la fuente, a C2, de modo que la distancia desde la fuente (2D) es igual a 24 pulgadas, el doble de su valor anterior, los rayos gamma cubrirán 16 pulgadas cuadradas, un área cuatro veces más grande que en C1. De ello se deduce, por lo tanto, que la intensidad de la radiación por pulgada cuadrada sobre la superficie de incidencia C2 es sólo un cuarto de la recibida en el nivel C1. Por lo tanto, la exposición que sería adecuada en C1, se debe aumentar cuatro veces con el fin de producir en C2, una radiografía de igual densidad. En la práctica, esto se puede hacer mediante el aumento del tiempo de exposición a la radiación.

1.4.18 Tiempo de exposición.

El cálculo del tiempo de exposición, es un tema muy importante para obtener placas radiográficas de buena calidad de imagen.

Este cálculo sirve para determinar un valor aproximado de tiempo al que debe estar expuesta la fuente radiactiva para lograr la ionización de los haluros de plata de la película radiográfica, que permiten formar la imagen latente. (Kodak, 1980)

1.4.19 Control de la calidad de imagen radiográfica.

El control de calidad de una placa radiográfica consiste en medir la densidad y observar el hilo sensible del(s) penetrámetro(s) (IQI).

El valor de densidad medido debe cumplir con el Código ASME V Art, 2. T-282.1, el cual establece que para radiografías hechas con rayos gamma la menor densidad admisible es 2.0 y la mayor 4.0; cuando se trata de un objeto que tiene diferentes espesores, la mínima densidad puede ser 1.3 y la máxima será 4.0, la tolerancia es de 0.05. Esas mediciones deben hacerse utilizando un densitómetro calibrado; los densitómetros deben calibrarse al menos cada 90 días. (ASME V, 2010)

En cuanto a los Indicadores de Calidad de Imagen, Código ASME V, T-276.1 (IQI- Image Quality Indicators), los de tipo alambre que son lo que se usan en la Industria Petrolera Ecuatoriana, son fabricados del mismo material como el que se va a inspeccionar, también se puede usar hilos hechos de material con menos capacidad de absorción de la radiación del que se va a inspeccionar. (ASME V, 2010)

1.5 Tintas Penetrantes

La inspección de soldaduras con tintas penetrantes, es una técnica superficial, se basa en detectar y ubicar a las discontinuidades que se encuentran abiertas a la superficie del material que va a ser inspeccionado.

El funcionamiento de las tintas penetrantes, se basa en una propiedad denominada capilaridad, que consiste en la capacidad de un líquido para penetrar espacios sumamente reducidos, cuyas aberturas son comparables al diámetro de un cabello humano (0.2 mm). Las tintas penetrantes entran en cavidades abiertas a la superficie del material; en soldadura, generalmente corresponden a fisuras y poros.

Este método se puede aplicar en materiales magnéticos y no magnéticos, en juntas soldadas donde por dificultad de accesibilidad o ubicación, la gammagrafía no puede ser usada. También se usa para inspeccionar soldaduras en materiales delgados, en donde las discontinuidades se manifiestan más bien en la superficie.

Las tintas penetrantes son de dos tipos: tintas visibles a la luz del día y tintas fluorescentes, que solo pueden ser vistas en luz ultravioleta (negra). Las Tintas Penetrantes visibles, son las que se utilizan para el control de calidad de soldadura y materiales en la construcción de estaciones de bombeo de petróleo. El ensayo es relativamente barato y rápido, la correcta detección de las discontinuidades depende del procedimiento, de la experiencia y agudeza visual del técnico.

1.5.1 Clasificación general del kit de insumos para la aplicación de tintas penetrantes.

Tabla 6 Clasificación de Procesos y Materiales para el Ensayo con Tintas Penetrantes.

TINTA PENETRANTE		
TIPOS	I	Tinta Penetrante Fluorescente
	II	Tinta Penetrante Visible
MÉTODOS	A	Lavable con Agua
	B	Pos Emulsificable-Lipofílico
	C	Solvente Removedor
	D	Pos Emulsificable-Hidrofílico
SENSIBILIDAD	(Los Niveles de sensibilidad aplican solamente para Tintas Penetrantes Tipo I. Las del Tipo II tienen una sola sensibilidad que no está representada en ninguno de los niveles establecidos para las Tintas Tipo I)	
	Nivel 1/2	Muy Baja
	Nivel 1	Baja
	Nivel 2	Media
	Nivel 3	Alta
	Nivel 4	Muy Alta
REVELADOR		
FORMAS	a	polvo seco
	b	Soluble en Agua
	c	Suspendido en Agua
	d	No acuoso, para Tintas Penetrantes Fluorescentes Tipo I
	e	No acuoso, para Tintas Penetrantes Visibles Tipo II
	f	Para aplicaciones Específicas
SOLVENTE REMOVEDOR		
CLASES	1	Halogenado
	2	No Halogenado
	3	Para aplicaciones Específicas

Fuente: (ASTM E-1417, 1999, pág. 2)

En la tabla 6, se describe la clasificación de los procesos y materiales, que incluyen tipos, métodos, y niveles de sensibilidad para las Tintas Penetrantes,

adicionalmente las formas para los reveladores y las clases para los solventes, que actualmente se usan en el Ecuador y que se puede conseguir en el mercado mundial.

1.5.2 Principios del ensayo con tintas penetrantes.

El principio fundamental del ensayo con tintas penetrantes no ha variado desde sus inicios cuando se realizaba con diesel como sustancia penetrante y polvo de tiza como revelador. Actualmente las sustancias que se ofrecen en el mercado son evoluciones de alto rendimiento comparadas con el origen de aquel método.

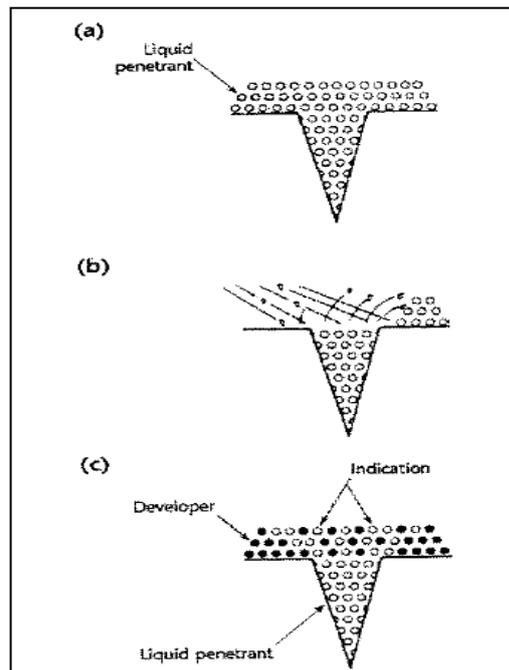
El proceso para la inspección con Tintas Penetrantes consta de seis pasos, que son los siguientes:

- Es muy importante que la superficie donde se va a realizar el ensayo se encuentre totalmente limpia y seca, ya que contaminantes sólidos o humedad pueden ingresar en las aberturas de las discontinuidades, reduciendo la efectividad del ensayo.
- Se aplica la tinta penetrante en la superficie que se quiere inspeccionar, se la deja que actúe durante un tiempo determinado, para que la tinta entre y llene totalmente la cavidad de la discontinuidad del cordón de soldadura.
- Remover el exceso de la Tinta Penetrante de la superficie inspeccionada; se debe hacerlo con cuidado, de manera indirecta usando un paño o tela absorbente embebido con agua o el solvente limpiador, con el objeto de evitar remover la tinta que ya se encuentra dentro de las discontinuidades.
- Posteriormente se esparce una capa fina de revelador en la superficie que antes se había colocado la Tinta Penetrante, eso se hace usando un spray o pulverizador; de esa manera se hacen visibles las discontinuidades, su acción absorbe la Tinta Penetrante contenida dentro de las discontinuidades y la

esparce en la superficie, alrededor de la discontinuidad. El revelador también crea un contraste en la superficie inspeccionada; entre la Tinta Penetrante que es de color rojo y el revelador que es de color blanco, haciendo que las indicaciones sean fácilmente visibles.

- Mediante un examen visual de las indicaciones de Tinta Penetrante en la superficie inspeccionada, el técnico evalúa e interpreta las discontinuidades para aplicar los criterios de aceptación/rechazo, de la norma ASME B31.3 para tuberías y API 650 para tanques; la última norma envía al Código ASME Sección VIII, Apéndice 8 en cuanto a los criterios aceptación/rechazo que deben utilizarse. (Tracy, 1999)

Fig. 5 Proceso de aplicación de Tintas Penetrantes



Fuente: (Tracy, 1999, pág. 34)

- Nota:** (a) Aplicación de la Tinta Penetrante.
(b) Remover el exceso de Tinta Penetrante con un paño húmedo.
(c) Aplicación del revelador que muestra las indicaciones en la superficie.

En la Figura 5, se puede apreciar el proceso de aplicación de Tintas Penetrantes sobre una discontinuidad, para ver el comportamiento de la Tinta Penetrante al inicio cuando es aplicada, cuando es removida y al final el revelado.

1.5.3 Sensibilidad.

El término sensibilidad en la aplicación del ensayo de Tintas Penetrantes se refiere a la habilidad para detectar discontinuidades.

Un ensayo de Tintas Penetrantes con alta sensibilidad es capaz de detectar discontinuidades muy pequeñas en comparación con un ensayo que tenga baja sensibilidad, el cual solamente puede detectar discontinuidades medianas o grandes. La sensibilidad depende de varios factores como la limpieza, el tipo de tinta y el procedimiento que se usa para su aplicación. (Tracy, 1999)

1.5.4 Propiedades del penetrante.

Conseguir un líquido que sea penetrante no es sencillo, ya que la capilaridad, que es la característica más importante, no depende solamente de una determinada propiedad de una sustancia. Algunas propiedades de los líquidos que parecen absolutamente necesarias, tienen poco o ningún efecto sobre la capacidad de los líquidos en penetrar las discontinuidades abiertas a la superficie. Por ejemplo, un material de baja viscosidad parece ser más penetrante que uno con alta viscosidad, pero no necesariamente es así, ya que muchos líquidos con alta viscosidad son excelentes penetrantes.

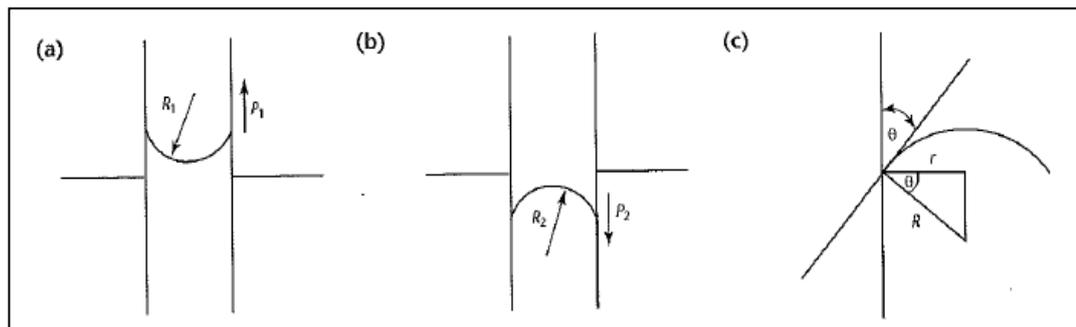
La habilidad penetrante de un líquido, se encuentra en función de los siguientes factores: mantener el colorante en la solución, la capacidad de distribuir el penetrante de forma uniforme y completamente sobre la superficie que va a ser

inspeccionada y llevar al penetrante dentro de cualquier discontinuidad existente en la superficie ensayada, durante un tiempo prudencial. (Tracy, 1999)

1.5.4.1 La presión capilar, el radio capilar y la tensión superficial.

La presión capilar es la fuerza que requiere el líquido para humedecer las paredes de la cavidad que finalmente será llenada por la Tinta Penetrante.

Fig. 6 Capilaridad de un Líquido.



Fuente: Tracy, N. (1999, pág. 85)

En la Figura 6 (a), se puede observar un líquido humedeciendo las paredes del volumen capilar por el que está ingresando, donde R_1 es el radio de curvatura del líquido al ingresar y la presión P_1 es positiva lo cual permite el ingreso del líquido. En la Figura 6 (b), se observa un líquido que no va a poder ingresar fácilmente en el volumen capilar ya que tiene un radio de curvatura R_2 negativo y una presión capilar también negativa, es decir, no está capacitado para humedecer las paredes de esa superficie capilar. En la Figura 6 (c), se muestra la influencia que tiene la abertura de la cavidad capilar (r) para modificar el ángulo de contacto θ del penetrante, en el sentido de que a medida que es más estrecho el espacio capilar, aumenta el ángulo de contacto, que hace que el esparcimiento de la Tinta Penetrante en la interior de la cavidad, sea menor.

Tabla 7 Presión Capilar P vs Tensión Superficial.

Tensión Superficial	Radio Capilar				
	1,0mm	0,1mm	0,01mm	1,0μm	0,5μm
	(4x10 ⁻² pulg)	(4x10 ⁻³ pulg)	(4x10 ⁻⁴ pulg)	(4x10 ⁻⁵ pulg)	(4x10 ⁻⁵ pulg)
Presión Capilar P					
N/m (lb/pulg)	Pa (lb/pulg ²)				
0,025 (1,7x10 ⁻³)	50 (7)	500 (70)	5000 (700)	50000 (7000)	100000 (200000)
0,035 (2,4x10 ⁻³)	70 (10)	700 (100)	7000 (1000)	70000 (10000)	140000 (20000)

Fuente: (Tracy, 1999, pág. 85)

En la tabla 7, se muestra el comportamiento que tienen dos sustancias penetrantes distintas (dos valores de tensión superficial distintos), que se asume tienen un ángulo de contacto similar ($\theta=0^\circ$), cada una de estas sustancias presenta valores de presión capilar y para cada uno de esos valores de presión capilar corresponde a un radio capilar (separación entre los bordes de una abertura capilar). La tensión superficial del agua es de 0.072 N/m que es el doble de la segunda sustancia. De la tabla 7 se deduce que mientras sea menor la tensión superficial de la sustancia, mejor será su capilaridad.

1.5.4.2 La viscosidad.

Los líquidos se esparcen en la superficie inspeccionada a una velocidad que depende del grado de viscosidad, pero también depende del tiempo disponible para esparcirse y del grado de rugosidad de la superficie.

La velocidad a la cual un líquido llenará un volumen capilar, es determinada principalmente por el grado de viscosidad, que está dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\pi r^4 T P}{8 V L} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Donde, T (seg.) es el tiempo para que un volumen V (mm^3) de líquido fluya a través de un tubo capilar con radio r (mm) y longitud L (mm), bajo la influencia de una presión capilar P (Pa), para encontrar η que es la viscosidad cinemática (St).

1.5.4.3 Volatilidad de la tinta penetrante.

Para que un líquido tenga una buena capacidad de penetración en espacios restringidos, con aberturas de un tamaño como el diámetro de un cabello humano (0.2mm), debe al mismo tiempo, poder mantener el colorante en la solución o en suspensión durante el tiempo suficiente para realizar la interpretación.

Un pequeño grado de volatilidad en la Tinta penetrante es una característica deseable en la detección de las discontinuidades, pues ayuda a intensificar el brillo del colorante y también evita la propagación excesiva de la tinta en la superficie, con lo que se evita que se exagere el tamaño de las indicaciones. Tener una alta volatilidad en una Tinta Penetrante no es deseable, porque afecta las características y tiempos del proceso, además de producir la evaporación del penetrante, lo cual puede ser molesto o incluso peligroso para la salud de los usuarios. (Tracy, 1999)

1.5.4.4 Capacidad humectante de la tinta penetrante.

La capacidad humectante es otra propiedad importante de la Tinta Penetrante.

Todas las superficies de los materiales tienen algún grado de rugosidad, por ello es necesario que la Tinta Penetrante tenga una buena capacidad humectante, a fin de que pueda esparcirse completamente sobre la superficie a inspeccionar. (Tracy, 1999).

Los materiales con alta capacidad humectante tienen el ángulo de contacto θ tendiendo a cero, lo que les permite humedecer fácilmente las paredes de las cavidades capilares y de esta manera generar un mecanismo para el llenado total de estas cavidades.

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN CON GAMMAGRAFÍA

2.1. Análisis de la Situación Actual

Actualmente en el Ecuador, la Gammagrafía se sigue usando de manera intensiva en la Industria Petrolera, sin embargo se pueden detectar algunas falencias en el trabajo cotidiano de los radiólogos.

Las empresas contratistas de Petroamazonas EP, la empresa pública encargada de la extracción del petróleo, están obligadas a escribir procedimientos para cada uno de sus servicios. Estos procedimientos, deben estar escritos acorde con las normas de referencia aplicables.

Las Normas no son didácticas y los procedimientos que actualmente se usan han heredado esa tendencia, por lo que las empresas los usan más bien como documentos de carácter formal.

Como resultado de la pasantía realizada en Coca en uno de los contratos de la empresa Radin, se pudo constatar que los procedimientos escritos no son de uso cotidiano, que no ha priorizado el conocimiento y el uso de las variables esenciales que están establecidas en el Código ASME, Sección V, Artículo 2.

En Estaciones de Bombeo el procedimiento más usado es el que corresponde a tuberías de proceso, ya que estas conectan entre sí las bombas, tanques de almacenamiento, los separados, los recipientes de presión y los demás equipos necesarios para darle continuidad a la labor de extracción de petróleo.

Con la experiencia obtenida en el campo, se detectaron seis temas considerados críticos en la aplicación de la gammagrafía como método de control de calidad de soldaduras.

Se escogió como método de análisis comparativo la matriz de Holmes, la cual permitió valorar cada uno de estas actividades y generar el orden de importancia que éstas tienen.

A continuación, en la Tabla 1 se muestra la Matriz de Holmes aplicada a la situación actual de la gammagrafía en el Ecuador.

Tabla 8 Matriz de Priorización de Holmes para el Análisis de Situación Actual de la Gammagrafía en el Ecuador.

¿CUÁL ES EL MAYOR INCONVENIENTE EN LA APLICACIÓN ACTUAL DE PROCEDIMIENTOS DE GAMMAGRAFÍA EN LA INSPECCIÓN DE SOLDADURAS EN ESTACIONES DE BOMBEO?	A. Procesamiento de Placas Radiográficas en Cuarto Oscuro	B. Interpretación Radiográfica	C. Manejo del Material Radiactivo	D. Seguridad Industrial	E. Calificación de la Placa Radiográfica	F. Variables Esenciales en Gammagrafía	TOTAL	ORDEN
A. Procesamiento de Placas Radiográficas en Cuarto Oscuro		1	0	1	0,25	0,5	2,75	2
B. Interpretación Radiográfica	0		0	1	1	0,75	2,75	2
C. Manejo del Material Radiactivo	1	1		1	0,5	0,75	4,25	1
D. Seguridad Industrial	0	0	0		0	0	0	4
E. Calificación del Procedimiento Radiográfico	0,75	0	0,5	1		0,25	2,5	3
F. Variables Esenciales en Gammagrafía	0,5	0,25	0,25	1	0,75		2,75	2

Fuente: Daniel Castro.

En la Tabla 8, se puede ver el puntaje que fue asignado comparando una actividad con otra (Ejemplo, A comparado con B); el mayor puntaje que se puede asignar es 1, significa que la actividad que recibió ese puntaje supera absolutamente, en complejidad para ejecutar ese trabajo, nivel de experiencia y efectos negativos que puede producir su aplicación, comparado con la otra actividad.

Los puntajes menores a 1, significan que no hay una gran diferencia en la complejidad entre las dos actividades que se están comparando.

El resultado de la matriz de Holmes, muestra que la actividad manejo de material radiactivo es la que hay que priorizar en las empresas, es decir, poner más recursos, en la capacitación, en el equipamiento, uso de instrumentos, monitoreo de radiación, registros de dosis personales recibidas. El uso de material radiactivo es trabajo peligroso e incluso existe la posibilidad de que se generen emergencias radiológicas que suelen ocasionar enfermedades catastróficas o inclusive la muerte de personas.

Los que obtuvieron la segunda posición, significaría que son muy importantes, todos por igual pero que no implican peligro para los trabajadores, a pesar de esto, su característica es la alta influencia que tienen sobre la calidad de la inspección.

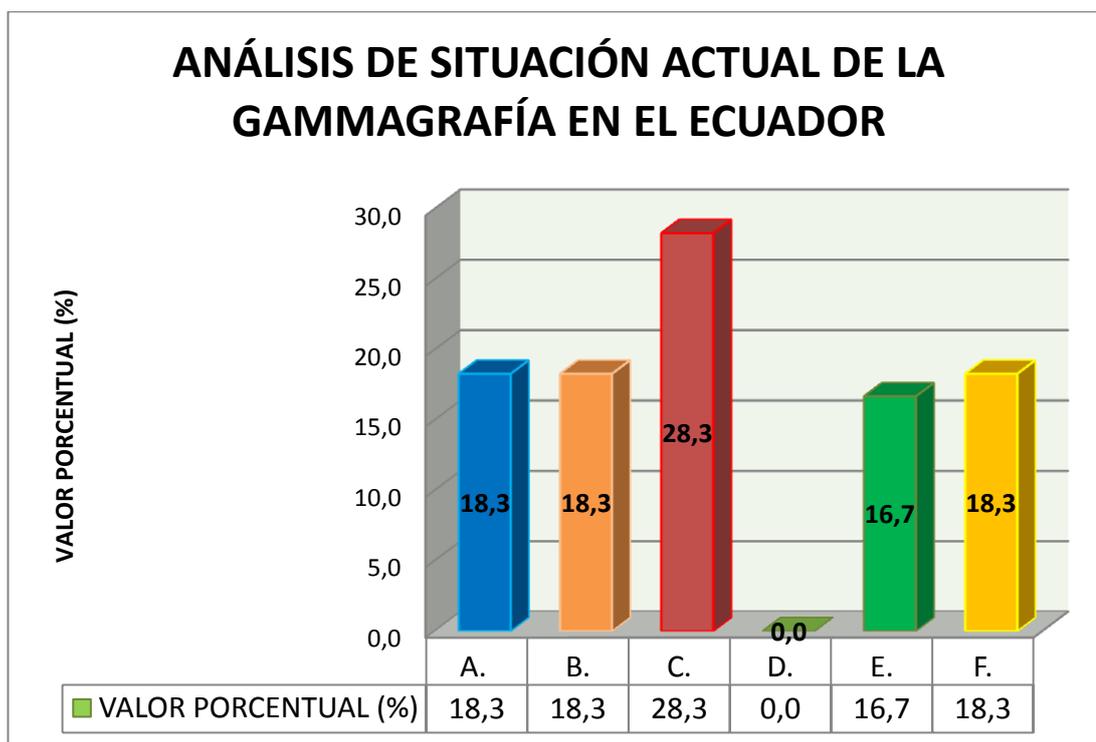
Tabla 9 Puntaje y Valores Porcentuales Obtenidos de la Matriz de Holmes.

INCONVENIENTES	PUNTAJE	VALOR PORCENTUAL (%)
A. Procesamiento de Placas Radiográficas en Cuarto Oscuro	2,75	18,3
B. Interpretación Radiográfica	2,75	18,3
C. Manejo del Material Radiactivo	4,25	28,3
D. Seguridad Industrial	0	0,0
E. Calificación del Procedimiento Radiográfico	2,5	16,7
F. Variables Esenciales en Gammagrafía	2,75	18,3
TOTAL	15	100,0

Fuente: Daniel Castro

En la Tabla 9, se aprecian los puntajes totales obtenidos del cálculo de la matriz de Holmes y su respectiva equivalencia porcentual, se puede observar que existe una diferencia del 10% entre la actividad que ocupa el primer lugar, por su nivel de peligrosidad, con relación a las actividades que ocupan el segundo lugar.

Fig. 7 Valoración Porcentual de las Actividades más Importantes en la Inspección con Gammagrafía.



Fuente: Daniel Castro

En la Figura 7, se observa mejor la importancia comparativa entre las actividades que implican la inspección con gammagrafía. Tres de ellas tienen el mismo nivel de importancia (A, B y F). La actividad C es la de mayor influencia con un porcentaje del 28.3%.

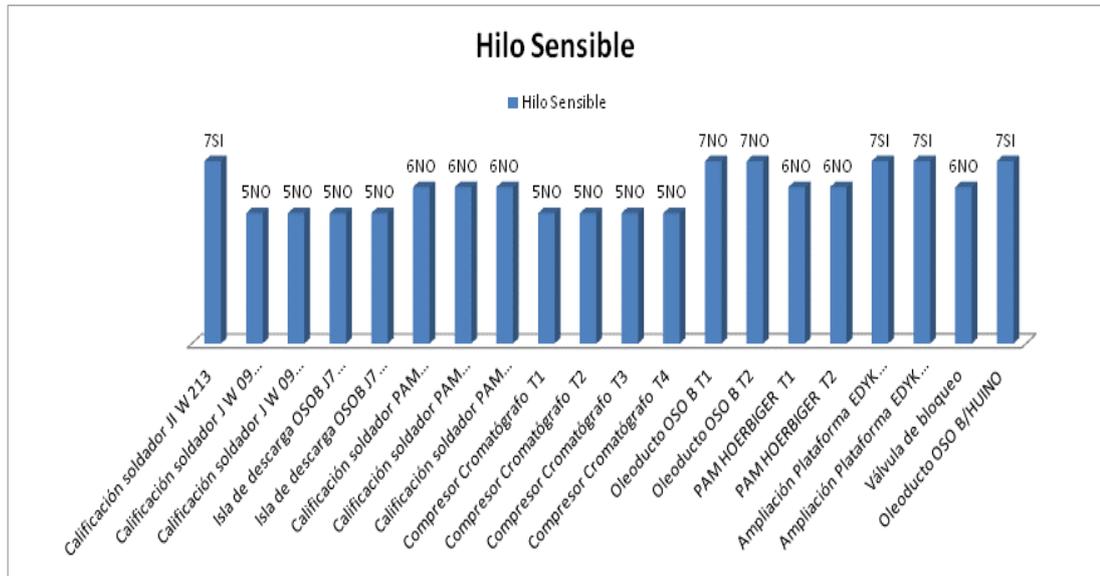
Tabla 10 Resultados de Placas Radiográficas tomadas con el Procedimiento Escrito de Gammagrafía Actual.

Procedimiento Anterior						
#	Proyecto	Tipo de tubería	Hilo Sensible	Visibilidad	Densidad	OBSERVACIONES
1	Calificación soldador JI W 213	D6" SCH80	7	SI	2,73	-
2	Calificación soldador J W 09 TA	D2" SCH80	5	NO	2,07	No se está usando el set de IQI correcto
3	Calificación soldador J W 09 TB	D2" SCH80	5	NO	2,05	No se está usando el set de IQI correcto
4	Isla de descarga OSOB J7 W202 T1	D4" SCH STD	5	NO	2,8	No se está usando el set de IQI correcto
5	Isla de descarga OSOB J7 W202 T2	D4" SCH STD	5	NO	2,04	No se está usando el set de IQI correcto
6	Calificación soldador PAM WPS001 T1	D4" SCH 80	6	NO	3	-
7	Calificación soldador PAM WPS001 T2	D4" SCH 80	6	NO	2,58	-
8	Calificación soldador PAM WPS001 T3	D4" SCH 80	6	NO	2,73	-
9	Compresor Cromatógrafo T1	D4" SCH STD	5	NO	3,08	No se visualiza de la manera correcta IQI
10	Compresor Cromatógrafo T2	D4" SCH STD	5	NO	3,45	No se visualiza de la manera correcta IQI
11	Compresor Cromatógrafo T3	D4" SCH STD	5	NO	3,15	No se visualiza de la manera correcta IQI
12	Compresor Cromatógrafo T4	D4" SCH STD	5	NO	3,18	No se visualiza de la manera correcta IQI
13	Oleoducto OSO B T1	D12" SCH 40	7	NO	2,58	-
14	Oleoducto OSO B T2	D12" SCH 40	7	NO	2,61	-
15	PAM HOERBIGER T1	D6" SCH STD	6	NO	2,7	-
16	PAM HOERBIGER T2	D6" SCH STD	6	NO	2,86	-
17	Ampliación Plataforma EDYK T1	D6" SCH 80	7	SI	2,8	-
18	Ampliación Plataforma EDYK T2	D6" SCH 80	7	SI	2,77	-
19	Válvula de bloqueo	D4" SCH 80	6	NO	2,15	-
20	Oleoducto OSO B/HUINO	D12" SCH 40	7	SI	2,6	-

Fuente: Daniel Castro.

En la tabla 10, se puede observar el análisis del procedimiento anterior de la revisión de las soldaduras en distintos tipos de tubería, se puede deducir que de las 20 radiografías revisadas, a 16 placas no se les visualiza el hilo sensible por las siguientes razones: el inadecuado cálculo de la penumbra geométrica y un tiempo de exposición incorrecto. Además se puede destacar que la densidad si cumple los parámetros dentro de los rangos establecidos.

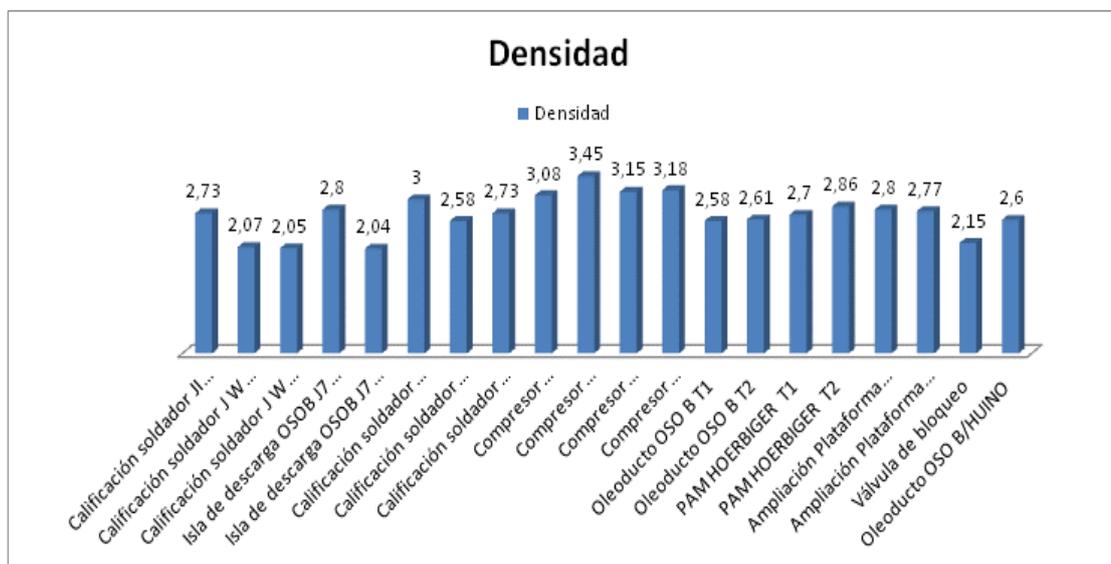
Fig. 8 Análisis de la visibilidad del hilo sensible



Fuente: Daniel Castro.

En la Figura 8, se muestra el análisis de la visibilidad del hilo sensible en cada una de las 20 placas radiográficas revisadas, se destaca que el que el hilo sensible número 5 del Set A del IQI no se puede ver de manera correcta porque los radiólogos usan el Set de IQI incorrecto.

Fig. 9 Análisis de la Densidad de las Placas Radiográficas.



Fuente: Daniel Castro.

En la Figura 9, se observa las mediciones de densidades tomadas en las 20 placas radiográficas revisadas, el rango de densidades se encuentra en un rango de 2.04 hasta 3.45.

2.2. Elaboración del Procedimiento

El Procedimiento de Inspección con Gammagrafía sirve para controlar la calidad en Soldaduras de Ranura en Juntas a Tope.

La inspección con gammagrafía debe hacerse en base a un procedimiento escrito. El procedimiento debe incluir las variables esenciales descritas en el Código ASME V artículo 2, T-221.1. Ver Anexo 1A.

La calificación del procedimiento consiste en demostrar en cada placa radiográfica, el cumplimiento de dos parámetros que determinan la calidad de la imagen radiográfica. El primer parámetro es la densidad, que debe ser medida utilizando un densitómetro calibrado, el valor medido de la densidad debe estar dentro del rango establecido en el Código ASME V Artículo 2, T-282.1, para radiografías realizadas con rayos gamma; ese rango es de mínimo 2.0 y máximo 4.0. El segundo parámetro es la identificación del hilo sensible, el cual debe observarse en cada placa radiográfica, cuando se usan indicadores de calidad de imagen (IQI) de tipo alambre. Este hilo sensible está determinado en el Código ASME V artículo 2, en la Tabla T-276, para los diferentes espesores de material de tuberías o planchas de acero.

2.3. Variables Esenciales

Las variables esenciales que se deben tomar en cuenta obligatoriamente para escribir este procedimiento son:

2.3.1. Tipo de material y rango de espesores a inspeccionar.

En la construcción de estaciones de bombeo mediante soldadura los diámetros de las tuberías pueden ir desde 3/4", 2", 3" y 4", 6", 8", 10", 14", 16" y 18", en un rango de espesores de pared desde 3mm hasta 40mm.

El material utilizado para la fabricación de tuberías para estaciones de bombeo de crudo es acero ASTM A106 Grado B (Specification For Seamless Carbon Steel Pipe For High-Temperature Service).

Tabla 11 Composición Química Acero ASTM A106 Grado B

	Composition, %		
	Grade A	Grade B	Grade C
Carbon, max ^A	0.25	0.30	0.35
Manganese	0.27–0.93	0.29–1.06	0.29–1.06
Phosphorus, max	0.035	0.035	0.035
Sulfur, max	0.035	0.035	0.035
Silicon, min	0.10	0.10	0.10
Chrome, max ^B	0.40	0.40	0.40
Copper, max ^B	0.40	0.40	0.40
Molybdenum, max ^B	0.15	0.15	0.15
Nickel, max ^B	0.40	0.40	0.40
Vanadium, max ^B	0.08	0.08	0.08

Fuente: ASTM A106. (2004, pág. 2)

En la tabla 11, se definen las propiedades químicas y mecánicas del acero ASTM A 106 Grado B.

Tabla 12 Propiedades Mecánicas ASTM A106 Grado B.

	Grade A (Explanatory Note 2)	Grade B	Grade C
Tensile strength, min, psi (MPa)	48 000 (330)	60 000 (415)	70 000 (485)
Yield strength, min, psi (MPa)	30 000 (205)	35 000 (240)	40 000 (275)

Fuente: ASTM A106. (2004, pág. 3)

En la tabla 12, se puede observar la diferencia en las propiedades mecánicas del acero ASTM A106 en sus diferentes grados. El grado B tiene un nivel medio de resistencia, por lo cual es utilizado en las líneas de flujo de las estaciones de bombeo.

En tanques de almacenamiento se realiza la inspección en las juntas soldadas a tope en planchas de acero ASTM A36, con espesores desde 4.78 mm hasta 19 mm.

Tabla 13 Composición Química del Acero ASTM A36

Product	Shapes ⁴	Plates ⁶					Bars			
		To 3/4 [20], Incl.	Over 3/4 to 1 1/2 [20 to 40], Incl.	Over 1 1/2 to 2 1/2 [40 to 65], Incl.	Over 2 1/2 to 4 [65 to 100], Incl.	Over 4 [100]	To 3/4 [20], Incl.	Over 3/4 to 1 1/2 [20 to 40], Incl.	Over 1 1/2 to 4 [40 to 100], Incl.	Over 4 [100]
Thickness, in. [mm]	All									
Carbon, max., %	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29	0.26	0.27	0.28	0.29
Manganese, %	0.80-1.20	0.80-1.20	0.85-1.20	0.85-1.20	...	0.60-0.90	0.60-0.90	0.60-0.90
Phosphorus, max., %	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Sulfur, max., %	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicon, %	0.40 max.	0.40 max.	0.40 max.	0.15-0.40	0.15-0.40	0.15-0.40	0.40 max.	0.40 max.	0.40 max.	0.40 max.
Copper, min., % when copper steel is specified	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

Fuente: (ASTM A-36, 2004, pág. 2)

Tabla 14 Composición Química del Acero ASTM A36

Plates, Shapes,^B and Bars:	
Tensile strength, ksi [MPa]	58–80 [400–550]
Yield point, min., ksi [MPa]	36 [250] ^C
Plates and Bars^{D,E}:	
Elongation in 8 in. [200 mm], min., %	20
Elongation in 2 in. [50 mm], min., %	23
Shapes:	
Elongation in 8 in. [200 mm], min., %	20
Elongation in 2 in. [50 mm], min., %	21 ^B

Fuente: (ASTM A-36, 2004, pág. 3)

En las Tablas 13 y 14, se definen las propiedades químicas y mecánicas, respectivamente del acero ASTM A36.

2.3.2. Isótopo radioactivo utilizado.

El isótopo que se utiliza para realizar la gammagrafía en soldaduras de tuberías y/o accesorios y planchas de acero en las estaciones de bombeo es un material artificial llamado Iridio 192 (Ir 192) que emite radiación ionizante gamma, que se obtiene mediante fisión o irradiación en un reactor nuclear.

Tabla 15 Coeficiente de Atenuación de Radiación Gamma

Selected attenuation data						
Material	Approximate Material Density (g/cm ³)	Approximate Half Value Thickness Inches (mm)				
		Ytterbium-169	Selenium-75	Iridium-192	Cobalt-60	Cesium-137
Concrete	2.35	1.140 (29.0)	1.180 (30.0)	1.700 (43.2)	2.400 (61.0)	3.00 (76.2)
Aluminum	2.65	-	1.100 (27.0)	-	-	-
Steel	7.80	0.170 (4.3)	0.315 (8.0)	0.512 (13.0)	0.827 (21.0)	0.900 (22.9)
Lead	11.34	0.032 (0.8)	0.039 (1.0)	0.200 (5.1)	0.500 (12.7)	0.250 (6.4)
Tungsten	17.80	-	0.032 (0.8)	0.130 (3.3)	0.310 (7.9)	0.225 (5.7)
DU	18.70	-	-	0.050 (1.3)	0.270 (6.8)	0.125 (3.2)

Fuente: QSA GLOBAL. (2012, pág.3)

En la Tabla 15, se muestra una fuente de rayos gamma con Ir 192 contenida en un proyector fabricado bajo los requerimientos de la norma ISO 3999:2004 por la

empresa Norteamericana Sentinel Qsa Global. El proyector es fabricado con Uranio empobrecido como blindaje, que constituye actualmente el mejor blindaje antirradiación, como puede verse en la Tabla 14, al examinar el coeficiente de atenuación del Plomo (lead) y del Uranio empobrecido (DU Depleted Uranium).

En el caso del Uranio empobrecido se requiere 1.3mm de espesor de Uranio para bajar a la mitad la intensidad de la radiación (mSv/h) de la fuente radiactiva Ir 192 que se encuentra contenida; comparado con el Plomo que es un material típico para blindajes antirradiación (Guantes y Mandiles de Plomo) que requiere 5.1 mm para reducir a la mitad la intensidad de la radiación.

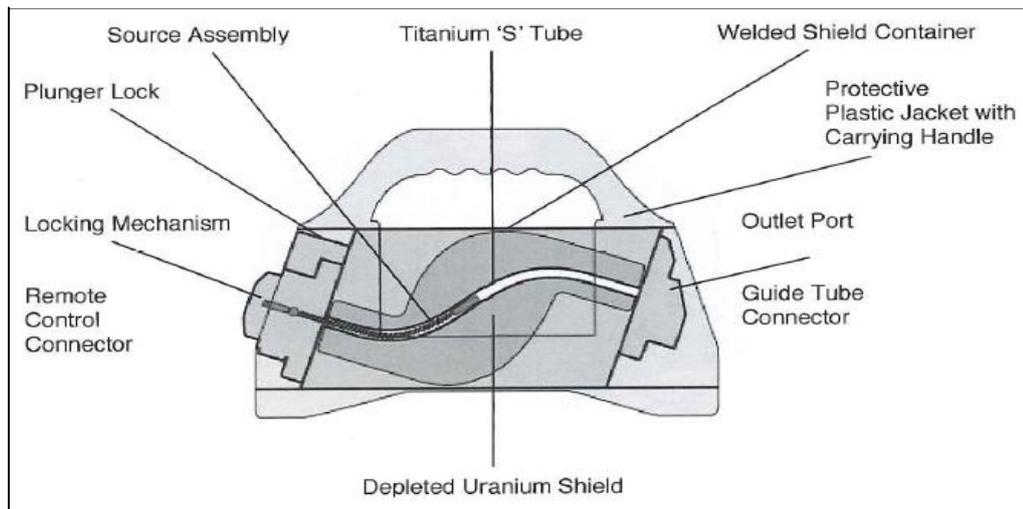
Tabla 16 Características de los proyectores Modelos Delta y Sigma

Model 880 Delta authorized contents						
Isotope	Assembly Model Number	Gamma Energy Range	Half Life	Approximate Steel Working Thickness	Device/Source Maximum Capacity	
Ytterbium-169	*	8-308 keV	32 days	2-20 mm	30 Ci	1.11 TBq
Selenium-75	A424-25W A424-25**	66-401 keV	120 days	3-29 mm	150 Ci	5.55 TBq
Iridium-192	A424-9 A424-23**	206-612 keV	74 days	12-63 mm	150 Ci	5.55 TBq
Cobalt-60	A424-19	1.17-1.33 MeV	5.27 years	50-150 mm	65 mCi	2.40 GBq
Cesium-137	A424-30	663 keV	30 years	12-63 mm	380 mCi	14.0 GBq
Model 880 Sigma authorized contents						
Isotope	Assembly Model Number	Gamma Energy Range	Half Life	Approximate Steel Working Thickness	Device/Source Maximum Capacity	
Ytterbium-169	*	8-308 keV	32 days	2-20 mm	30 Ci	1.11 TBq
Selenium-75	A424-25W A424-25**	66-401 keV	120 days	3-29 mm	150 Ci	5.55 TBq
Iridium-192	A424-9 A424-23**	206-612 keV	74 days	12-63 mm	130 Ci	4.81 TBq
Cobalt-60	A424-19	1.17-1.33 MeV	5.27 years	50-150 mm	25 mCi	925 MBq
Cesium-137	A424-30	663 keV	30 years	12-63 mm	380 mCi	14.0 GBq

Fuente: QSA GLOBAL. (2012, pág.2)

La tabla 16, muestra las características de los modelos más utilizados en el Ecuador para realizar la inspección con gammagrafía con fuentes de Ir 192 son el Delta y el Sigma.

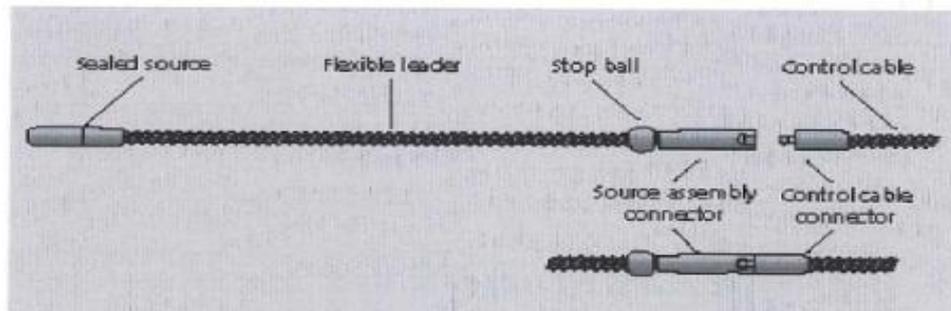
Fig. 10 Vista de Corte Proyector Rayos Gamma



Fuente: QSA GLOBAL. (2012, pág.1)

En la Figura 10, se detalla una vista en corte de un proyector, en el interior del tubo de Titanio en forma de “S” se encuentra contenida la fuente radiactiva Ir 192.

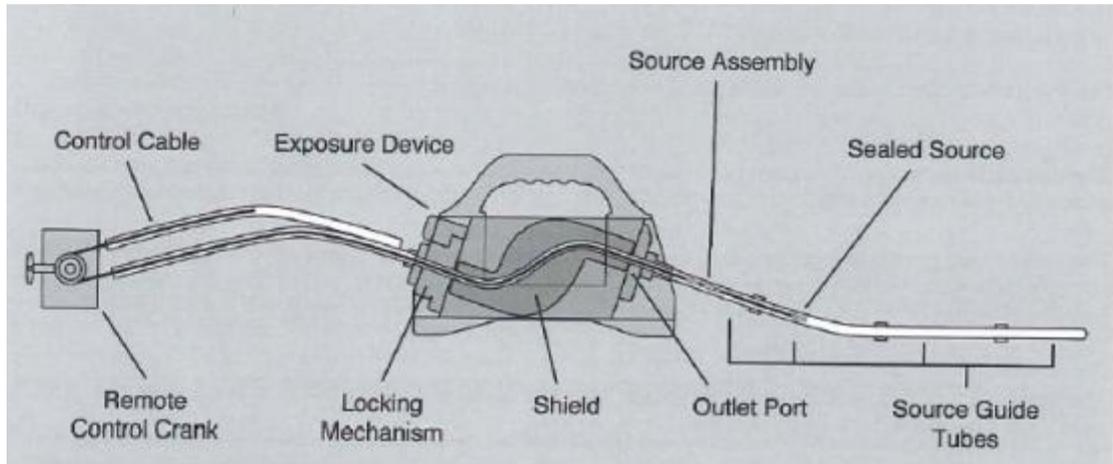
Fig. 11 Conexión de la fuente con el comando de control a distancia



Fuente: QSA GLOBAL. (2012, pág.21)

En la Figura 11, se observa a la izquierda una cápsula de acero inoxidable que contiene a la fuente radioactiva de Ir 192, lo que se puede ver a la derecha, es conocido como la cola que al final tiene el sistema de conexión con el cable del comando para operar el equipo a distancia.

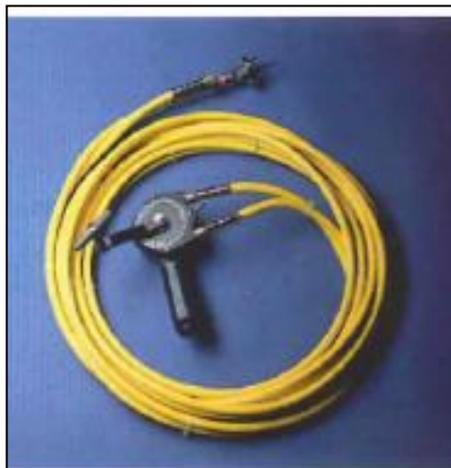
Fig. 12 Proyector cuando la fuente está expuesta al ambiente



Fuente: QSA GLOBAL. (2012, pág.23)

En la Figura 12, se puede observar al proyector conectado con el comando de control a distancia en la parte posterior (en el lado izquierdo de la Fig.) y en la derecha una manguera con la punta del proyector en su extremo que contiene la fuente radioactiva cuando está expuesta al ambiente.

Fig. 13 Comando para operar a distancia



Fuente: QSA GLOBAL. (2012, pág.26)

Fig. 14 Punta del Proyector



Fuente: QSA GLOBAL. (2012, pág.25)

En la Figura 13 y en la Figura 14, se puede observar el comando enrollado para operar la fuente radiactiva a una distancia de 20 metros y la punta del proyector que contiene la fuente cuando se encuentra expuesta al ambiente, respectivamente.

2.3.3. Distancia Mínima entre la Fuente y el Objeto a irradiar

La distancia que existe entre la fuente y el objeto, así como la distancia entre el objeto a inspeccionar y la película radiográfica son importantes, igual que el tamaño de la fuente, porque con estos tres valores se define la penumbra geométrica.

A medida que la distancia objeto-fuente aumenta, la definición de la imagen radiográfica aumenta, pero se incrementa el tiempo de exposición a la radiación, lo que puede perjudicar la salud de los radiólogos. En el Código ASME Sección V se establece un valor mínimo admisible para la distancia entre la fuente y el objeto, para un rango de espesores de material a radiografiar.

Tabla 17 Valores máximos de Penumbra geométrica

Material Thickness, in. (mm)	U_g Maximum, in. (mm)
Under 2 (50)	0.020 (0.51)
2 through 3 (50–75)	0.030 (0.76)
Over 3 through 4 (75–100)	0.040 (1.02)
Greater than 4 (100)	0.070 (1.78)

NOTE: Material thickness is the thickness on which the IQI is based.

Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 10)

En la Tabla 17, se muestra los valores permitidos de penumbra geométrica. En estaciones de bombeo los espesores de pared de tubería y de planchas se encuentran siempre bajo 50 mm, con lo que el valor de penumbra geométrica debe ser máximo 0.51 mm; con ese valor se calcula la distancia mínima que puede haber entre la fuente y el objeto a inspeccionar, para garantizar la calidad de imagen radiográfica.

Para calcular la distancia mínima entre la fuente y el objeto irradiado se aplica la siguiente ecuación (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 269).

Ecuación 2-1

$$U_g = \frac{Ft}{d_0}$$

Donde:

$U_g =$ Penumbra geométrica

$F =$ Tamaño de la fuente de radiación (diagonal)

$t =$ espesor del objeto irradiado (cuando el

objeto esta en contacto con la película)

d_0 = distancia mínima a usarse entre la fuente y el objeto irradiado

2.3.4. Distancia máxima entre el objeto y la película.

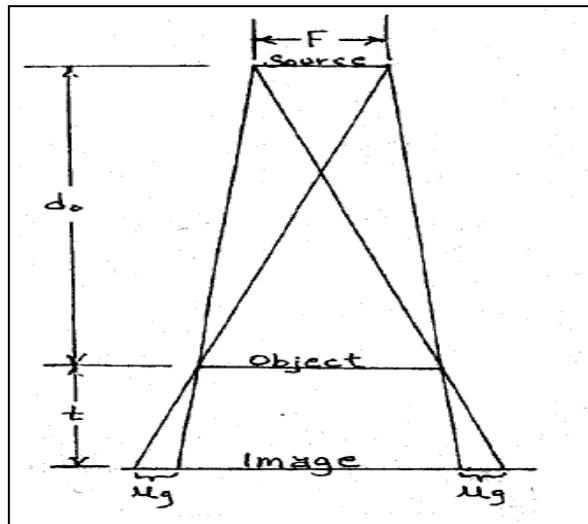
La distancia objeto irradiado-película no puede ser muy grande, pues de esa manera se minimiza la borrosidad en la imagen radiográfica. Para realizar la toma de la placa radiográfica es necesario, que la película esté lo más pegada como sea posible a la superficie del cordón de soldadura u objeto a radiografiar, para que no exista interferencia de radiación emanada por la fuente en la intercara entre la película y el objeto radiografiado.

Para lograr el ajuste, los radiólogos han desarrollado técnicas que resuelven el problema. En radiografías de tuberías, la técnica consiste en medir la longitud del cordón de soldadura a inspeccionar para cada diámetro de tubería, después se corta una cinta elástica de caucho de cierta medida, la cual se determina comprobando la presión que el caucho ejerce sobre la película, para que se fije posteriormente con ganchos sujetos en los extremos de la cinta; se debe tener cuidado con la presión que se aplica ya que la película es muy sensible a efectos mecánicos antes de ser irradiada.

En tanques se logra este mismo efecto, utilizando imanes para adherir la película a las paredes del tanque, con cuidado de no colocar los imanes sobre la película, en el sector donde se va a localizar la imagen del cordón de soldadura.

De esa manera se logra que la distancia entre el objeto y la película sea mínima, lo cual reduce notablemente el efecto de la penumbra geométrica.

Fig. 15 Penumbra Geométrica



Fuente: ASTM E 94. (2004, pág.6)

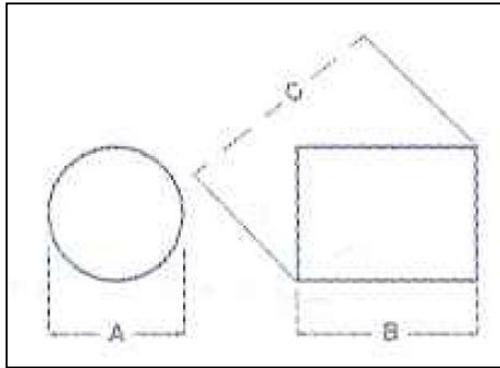
En la Figura 15, se puede apreciar el efecto geométrico de la radiación sobre la imagen en la película radiográfica.

2.3.5. Tamaño Máximo de la Fuente Radiactiva.

El tamaño de la fuente se puede obtener mediante información del fabricante o por manuales técnicos, curvas de caída, también por documentos que contengan el tamaño real o máximo de la fuente o punto focal. (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010). Ver Anexo 1B.

En el caso que se requiera comprobar el tamaño real de la fuente radiactiva, se puede optar por el procedimiento desarrollado en la Norma ASTM E 1114 (Método de Prueba Estándar para Determinar el Tamaño Focal del Iridio 192 en Radiografía Industrial.)

Fig. 16 Esquema forma fuente radiactiva Ir-192



Fuente: QSA GLOBAL. (2012).

Donde:

A= Diámetro del cilindro

B= Altura

C= Diagonal (dimensión máxima en el cilindro)

Fig. 17 Tamaño de la fuente radiactiva de Ir-192

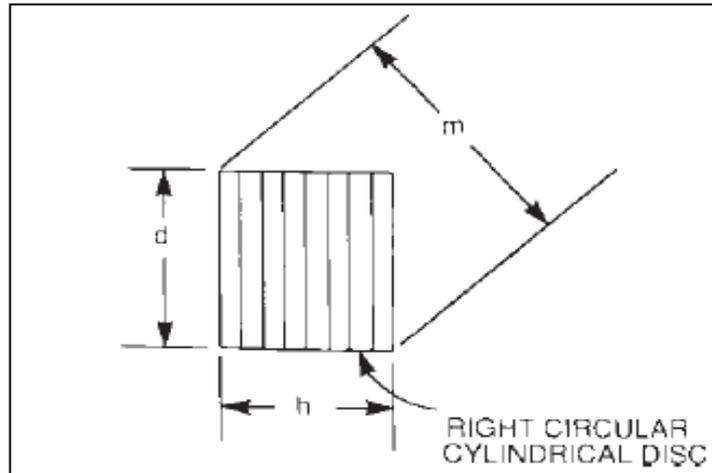
Radionuclide: <i>Ir192</i>		
ISO/ANSI Classification: <i>97E64515</i>		
IAEA Special Form Reference Number:		<i>USA/0335/S-96</i>
Measured Equivalent Activity on		<i>Apr-30-2014</i>
	<i>105.9 Ci</i>	<i>3.9 TBq</i>
Source Physical Size:		
	(mm)	(in)
Diameter	<i>2.700</i>	<i>0.106</i>
Length	<i>3.150</i>	<i>0.124</i>
Diagonal	<i>4.149</i>	<i>0.163</i>

Fuente: QSA GLOBAL. (2012).

En la Figura 16 y en la Figura 17, se puede ver que en el caso del isótopo Ir 192 utilizado para la inspección con gammagrafía, el certificado de la fuente del fabricante Sentinel Qsa Global muestra la geometría y las dimensiones de la fuente radiactiva.

La fuente tiene la forma de un cilindro uniforme circular según la Norma ASTM E 1114, como se muestra en la figura 16:

Fig. 18 Forma de la fuente radiactiva según ASTM E1114



Fuente: (ASTM E1114, 2003, pág. 4)

En la Figura 18, se aprecia la forma que tiene la fuente radiactiva de Ir-192, la fuente puede estar dispuesta en diferentes formas según el fabricante (ASTM E-1114), para el caso de la fuente radiactiva de la empresa Sentinel Qsa Global con proyectores modelo Delta son de forma cilíndrica circular cada disco.

2.3.6. Marca y Especificaciones de la Película Radiográfica

La marca de la película radiográfica es AGFA, que es la empresa líder a nivel mundial en el suministro de productos fotográficos. (AGFA NDT, 2002)

A la película radiográfica se le asigna una clase en particular (Clase I, Clase II, Clase III, W-A, W-B) si se ajusta a un rendimiento mínimo en cada uno de los cuatro siguientes parámetros: Gradiente (G) para las densidades $D = 2.0$ y $D = 4.0$, granularidad (σ_D) para una densidad $D = 2.0$, y la relación de gradiente/ruido para una densidad $D = 2.0$. (ASTM E1815, 1996)

Tabla 18 Sistema de Clasificación de Película Radiográfica.

Automatic Film Processing							
Developer: Type A							
Developer immersion time: XXX seconds							
Developer temperature: XX°C/YY°F							
Film Type ^A	ASTM System Class	Minimum Gradient G at		Minimum Gradient/ Granularity Ratio, G/σ_D , at $D = 2.0$ above D_o	Maximum Granularity, σ_D , at $D = 2.0$ above D_o	ISO Speed S	Dose, K_B , m Gy, $D = 2.0$
		$D = 2.0$ above D_o	$D = 4.0$ above D_o				
A	Special	5.4	9.1	360	0.015	32	29.0
B	I	4.5	8.4	281	0.016	64	14.0
C	I	4.4	7.6	232	0.019	100	8.7
D	I	4.4	7.6	169	0.026	200	4.6
E	II	4.4	7.6	142	0.031	320	3.2
F	III	4.0	5.2	114	0.035	400	2.5
G	W-A	4.2	6.5	225	0.019	100	8.6
H	W-B	4.1	5.3	170	0.025	300	5.0

^A Family of films ranging in speed and image quality.

Fuente: (ASTM E1815, 1996, pág. 2)

En la tabla 18, se encuentran los valores mínimos de rendimiento para la clasificación y el tipo de película.

Para la inspección con gammagrafía en las estaciones de bombeo se usan películas ASTM E1815 – 96, clase II, tipo E de 70mm de ancho x 90m de longitud, de marca AGFA-GEVAERT Structurix D7, tipo Roll Pack.

2.3.7. Pantallas Intensificadoras Utilizadas

Las pantallas intensificadoras de la radiación incrementan la acción fotográfica en la película. Permiten el paso de la radiación primaria hacia la película, absorben la radiación secundaria de mayor longitud de onda y por tanto de menor capacidad de penetración.

Las pantallas intensificadoras son láminas de plomo porque el plomo tiene átomos grandes lo que significa que posee muchos electrones disponibles en sus órbitas, lo cual aumenta la probabilidad de impacto entre la radiación y los electrones. Ese impacto produce efecto fotoeléctrico (Iluminación) y como

consecuencia un mejoramiento en la calidad de la imagen radiográfica, así como una disminución en la cantidad de tiempo requerido de exposición de la película a la radiación.

En el caso de la película AGFA Structurix D7, se usan pantallas que consisten en láminas muy delgadas de plomo adheridas a papel, para obtener una mayor consistencia; se usan dos pantallas, una a cada lado de la película, el grosor de la pantalla depende de la calidad de la radiación y puede variar su espesor desde 0,02mm a 0,15mm. El tipo de película Structurix D7 tiene pantallas de plomo de 0,027mm de grosor.

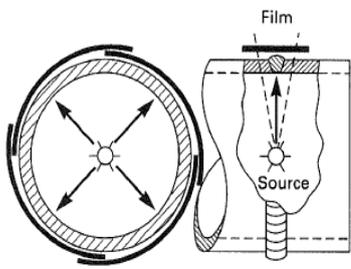
2.4. Técnicas para la Toma Radiográfica en Tuberías y Tanques.

2.4.1. Tuberías.

2.4.1.1. Técnica radiográfica una sola pared irradiada una sola imagen obtenida.

También llamada técnica panorámica, donde la radiación atraviesa solamente una de las paredes de la tubería (Soldadura) y es ésta la imagen que deberá observarse en la radiografía durante la evaluación de discontinuidades. Siempre que sea posible se debe preferir la aplicación de la técnica panorámica, ya que posee una mejor exposición a la radiación.

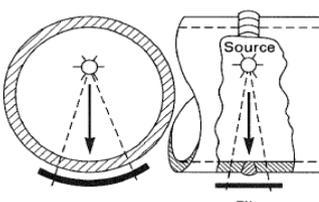
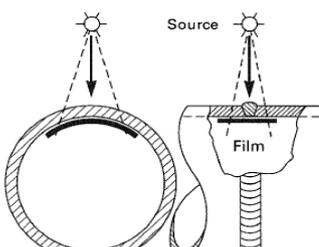
Fig. 19 Toma Panorámica con 4 Películas para Cubrir el Perímetro de la Tubería.

O.D.	Exposure Technique	Radiograph Viewing	Source-Weld-Film Arrangement		IQI		Location Marker Placement
			End View	Side View	Selection	Placement	
Any	Single-Wall T-271.1	Single-Wall	 <p>Exposure Arrangement — A</p>		T-276 and Table T-276	Source Side T-277.1(a) Film Side T-277.1(b)	Either Side T-275.3 T-275.1(c)

Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 34)

En la Figura 19, se puede ver la ubicación de la fuente radiactiva y las películas cuando se utiliza la técnica de una sola pared irradiada y una sola imagen obtenida.

Fig. 20 Técnica una sola pared irradiada una sola imagen obtenida utilizando una sola película.

Any	Single-Wall T-271.1	Single-Wall	 <p>Exposure Arrangement — B</p>		T-276 and Table T-276	Source Side T-277.1(a) Film Side T-277.1(b)	Film Side T-275.1 (b)(1)
Any	Single-Wall T-271.1	Single-Wall	 <p>Exposure Arrangement — C</p>		T-276 and Table T-276	Source Side T-277.1(a) Film Side T-277.1(b)	Source Side T-275.1 (a)(3)

Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 34)

En la figura 20, se puede ver una técnica complementaria a la que se ilustra en la Fig. 19 y se usa cuando se quiere tener una perspectiva diferente de una parte del perímetro de la tuberías. Por ejemplo, cuando existe duda en la interpretación radiográfica de un tramo del tubo y que por tanto requiere una nueva placa de esa sección, antes de dar un veredicto definitivo en un posible caso de reparación.

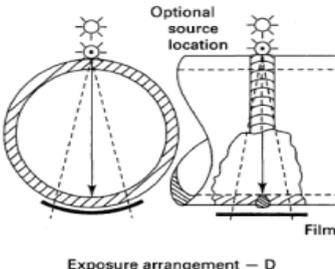
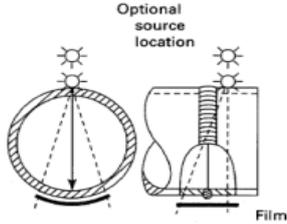
2.4.1.2. Técnica radiográfica doble pared irradiada y una sola imagen obtenida

La técnica se usa cuando no puede ser usada la técnica panorámica. La radiación atraviesa las dos paredes de la tubería.

Con esa técnica se obtiene una sola imagen de la soldadura en la placa radiográfica.

El inconveniente de la técnica es que se deben hacer tres o más tomas o placas radiográficas para completar el 100% del perímetro del cordón de soldadura a ser inspeccionado, a medida que aumenta el espesor y el diámetro de las tuberías es necesario aumentar a cuatro o más, el número de tomas para completar el perímetro porque los extremos de las placas muestran una imagen radiográfica borrosa, producto de la diferencia de energía (radiación) que incide en el centro de la película comparado con los extremos. La variación de radiación no puede ser menor a 15% ni mayor a 30% en ningún caso.

Fig. 21 Técnica Radiográfica, doble pared irradiada y una sola imagen obtenida.

O.D.	Exposure Technique	Radiograph Viewing	Source-Weld-Film Arrangement		IQI		Location Marker Placement
			End View	Side View	Selection	Placement	
Any	Double-Wall: T-271.2(a) at Least 3 Exposures 120 deg to Each Other for Complete Coverage	Single-Wall	 <p>Exposure arrangement – D</p>		T-276 and Table T-276	Source Side T-277.1(a) Film Side T-277.1(b)	Film Side T-275.1(b)(1)
Any	Double-Wall: T-271.2(a) at least 3 Exposures 120 deg to Each Other for Complete Coverage	Single-Wall	 <p>Exposure arrangement – E</p>		T-276 and Table T-276	Source Side T-277.1(a) Film Side T-277.1(b)	Film Side T-275.1(b)(1)

Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 35)

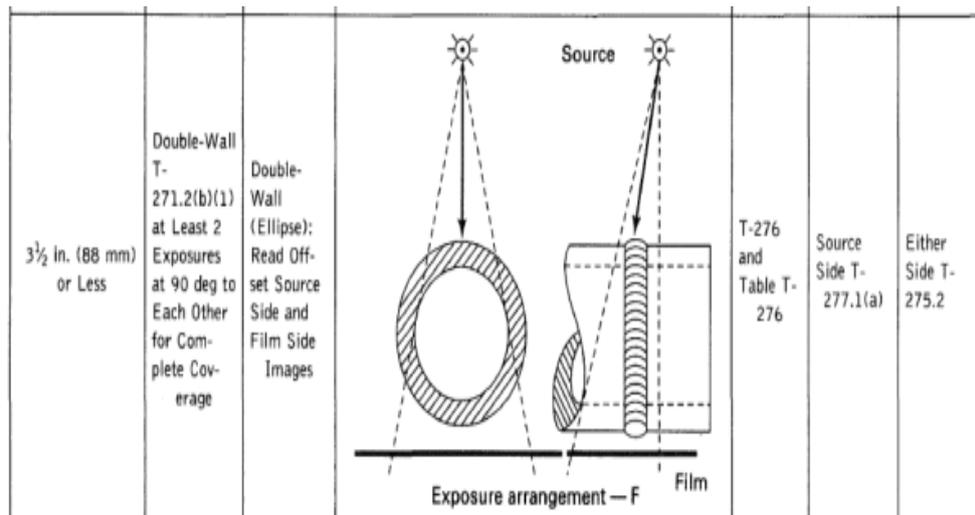
En la Figura 21, se puede observar que para en la técnica radiográfica antes mencionada, la fuente radiactiva puede estar en contacto con la tubería o ligeramente separada; la fuente puede estar coincidiendo con el eje de la soldadura o desviado para tener una mejor visualización de fisuras transversales, también se observa que la película radiográfica se debe colocar por fuera de la tubería.

2.4.1.3. Técnica radiográfica doble pared irradiada y dos imágenes obtenidas.

Esta técnica permite obtener dos imágenes de la soldadura en cada placa radiográfica, cada una de las cuales corresponde a una de las paredes irradiadas.

Se requiere dos placas radiográficas por junta y se usa cuando el diámetro nominal de la tubería es de 2.5 pulg. o menor. Está técnica también es llamada Técnica Elíptica.

Fig. 22 Técnica Elíptica



Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 35)

En la Figura 22, se muestra que la placa radiográfica no está rodeando a la tubería sino que se la coloca encima de una placa de madera y la fuente radiactiva se encuentra centrada respecto a la tubería pero desplazada respecto al eje de la soldadura; de esta manera se obtienen dos imágenes de la soldadura en la misma placa radiográfica. Se debe realizar dos tomas para examinar todo el perímetro de la junta, la segunda toma se debe hacer girando 90° la tubería en el sentido del eje de la soldadura, para diferenciar una toma de otra se coloca una letra A en la primera toma y una letra B en la segunda toma, ambas llevan puesto el mismo número de junta.

2.5. Tiempo de Exposición a la Radiación para la Toma Radiográfica

La necesidad de encontrar una manera práctica para determinar el tiempo de exposición aproximado, que permita hacer una prueba con una placa, antes de iniciar la producción, con un nuevo diámetro o con un nuevo espesor o una fuente radiactiva con actividad distinta a la que se estaba usando, obligó a desarrollar un modelo matemático empírico, basado en los datos de catálogos de los fabricantes de las películas radiográficas y en las variables más importantes relacionadas con la

atenuación de la radiación como son: la distancia fuente película, el espesor irradiado y la actividad de la fuente.

En la fórmula, se observan dos constantes que provienen de la información de los catálogos de los fabricantes de películas radiográficas. La constante 4.1 se usa cuando se va a trabajar con Iridio-192 y la constante 1.2 cuando se va a trabajar con película radiográfica ASTM Clase II.

$$t = \frac{4.1 * 1.2 * (dfp)^2 * 2^{\frac{e}{13.5}}}{A_a}$$

Ecuación 2-2

Donde

t = Tiempo de exposición de la radiación (seg.)

dfp = distancia fuente película (pulg)

e = espesor(s) irradiado(s) (mm)

1.2 = Constante para película Kodak AA (AGFA D7) y densidad 2.0 con revelado de 5 min a 20°C

4.1 = Constante correspondiente a trabajar con rayos gamma Ir-192

A = Actividad de la fuente radiactiva a la fecha [Ci]

En la Tabla 18 siguiente, se muestra el uso del tiempo de exposición calculado con la fórmula de la ecuación 2-2.

Tabla 19 Densidad Radiográfica por Prueba

DENSIDAD RADIOGRÁFICA DETERMINADA MEDIANTE PRUEBA				
DENSIDAD PLACA DE PRUEBA	DENSIDAD REQUERIDA (1)			
	1,5	2	2,5	3
	FACTOR			
2	0,7	1	1,3	1,6
2,5	0,54	0,76	1	1,2
2,75	0,48	0,68	0,89	1,1
3	0,43	0,61	0,8	1
Nota (1): Factor por el que se debe multiplicar al tiempo de exposición usado en la prueba.				

Fuente: Daniel Castro.

En la Tabla 19, se observa que en la columna de la izquierda constan valores de densidad medidos en una placa radiográfica de prueba, obtenida irradiando durante un tiempo de exposición calculado con la fórmula anterior. Si la densidad de la placa de prueba no es la adecuada con respecto a los requerimientos del cliente y del Código ASME, Sección V, Artículo 2, es necesario establecer cuál es esa densidad, interceptando el valor de la misma con el valor de la densidad deseada, así se obtiene el valor del factor que deberá ser multiplicado por el tiempo de exposición que fue calculado anteriormente, para así encontrar el nuevo tiempo de exposición necesario para obtener la nueva densidad.

2.6. Protección Radiológica y Dosis de Radiación

Es fundamental que todas las actividades realizadas con radiaciones ionizantes se sometan a normas de seguridad para proteger a las personas expuestas y al medio ambiente. También es muy importante que esas actividades sean monitoreadas y que las mediciones sean registradas y archivadas.

Los organismos mundiales que han emitido leyes y reglamentos generales para la protección radiológica son: UNCEAR (Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas), OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica), la OMS (Organización Mundial de la Salud).

El objetivo principal de la Protección Radiológica es evitar que ocurran efectos determinísticos y limitar la probabilidad que sucedan efectos estocásticos, a causa de radiaciones ionizantes en las personas

Los efectos determinísticos, se producen por una exposición directa o global de un tejido de una persona, como la piel, provocando la muerte de las células; su gravedad depende de la cantidad de dosis recibida. Se han establecido dosis máximas admisibles, antes de que se generen este tipo de efectos dañinos en las personas.

Los efectos estocásticos, son aquellos que se producen después de un largo tiempo de haber laborado con radiación o se manifiestan después de un tiempo de haber recibido una dosis fuerte de radiación. La Tabla 19 y Tabla 20, se ilustra las dosis máximas admisibles para los tejidos del cuerpo humano.

Tabla 20 Dosis de Radiación Máxima aplicada en el Ecuador

ORGANO	DOSIS MÁXIMA PERMITIDA	
Cuerpo entero, gónadas, médula ósea	5 rem/año	3 rem/trimestre
Hueso, piel de todo el cuerpo tiroides	30 rem/año	15 rem/trimestre
Manos, antebrazo, pies, tobillos	75 rem/año	40 rem/trimestre
Todos los otros órganos	15 rem/año	8 rem/trimestre
Personal femenino en edad reproductiva	1,25 rem/trimestre	
Mujer en estado de gravidez	1 rem/período de embarazo	
Miembros del público en general	10% de los límites establecidos para el Personal Ocupacionalmente Expuesto	

Fuente: (Comisión Internacional de Protección Radiológica, 1990)

En la Tabla 20, se puede observar las dosis máximas permitidas por la Subsecretaría de Control, Investigación y Aplicaciones Nucleares del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador. Si las dosis de radiación máximas son sobrepasadas por las personas o trabajadores, los efectos serán graves en cuanto a la disminución de la expectativa de vida de la persona.

En Estados Unidos una de cada 5 personas muere a causa del cáncer. La mayoría de científicos se han puesto de acuerdo con que, por cada 10 mSv (1 rem) de radiación que una persona recibe, la probabilidad de morir con cáncer incrementa en 1 posibilidad de 10000. Lo que significa que por cada 1 rem recibido a lo largo de la vida de una persona, se añade 1 posibilidad de 10000 de morir a causa del cáncer. (ASNT, 2004)

Tabla 21 Límites de Dosis de Radiación Recibida.

APLICACIÓN		PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO (POE)	PÚBLICO EN GENERAL
Dosis efectiva		20 mSv/año	1 mSv/año
Dosis Equivalente Anual	Cristalino	150 mSv/año	15 mSv/año
	Piel	500 mSv/año	50 mSv/año
	Manos y Pies	500 mSv/año	---
Mujer Embarazada		2 mSv/período de embarazo	---
Nota: 1 Sv = 100 rem ; 1 rem = 10 mSv			

Fuente: (Comisión Internacional de Protección Radiológica, 1990)

En la Tabla 21, en la columna de la izquierda se establecen los límites de dosis que pueden recibir las personas que trabajan con radiaciones ionizantes, cada uno de estos límites se refiere a un tipo de tejido de esa persona; en la columna de la derecha se establece los mismo para el público, personas que no están en contacto frecuente con radiaciones ionizantes. También consta el valor de la dosis efectiva máxima para una persona que trabaja directamente con radiación durante todo el año. Este valor no puede superar 20 mSv (2 rem/año); es decir que si la persona ha alcanzado 20 mSv en 6 meses de trabajo, este individuo tendrá que dejar el trabajo con radiación por al menos 6 meses, hasta completar el año. Si la persona ha recibido más radiación que este límite de dosis efectiva permitido, no podrá trabajar con radiaciones ionizantes por un período que se calcula relacionando el exceso de la dosis por año; por ejemplo, si alguien recibió 50 mSv, entonces no podrá laborar en los próximos 2 años y medio, se tendrá que hacer exámenes médicos periódicos y estar atento a cualquier síntoma anómalo.

La Protección Radiológica se concentra en los seres humanos, pero también busca garantizar la protección para otras especies y el medio ambiente.

En el campo de la Inspección de las soldaduras con gammagrafía, se considera que la exposición es ocupacional, porque las personas que reciben dosis de radiación ionizante son los trabajadores como consecuencia de su actividad laboral. (OIEA, 1996)

2.6.1. Control de la dosis.

El trabajo con gammagrafía se realiza con fuentes radiactivas artificiales y selladas, que provocan una exposición externa; ya que la fuente de radiación

ionizante proviene del exterior del cuerpo. Se puede disminuir la exposición a la radiación en el trabajo, utilizando a la vez los siguientes criterios:

- Minimizar el tiempo de exposición.
- Maximizar la distancia de la fuente de radiación con las personas.
- Blindar la fuente de radiación o interponer un blindaje entre ella y la persona expuesta.

El tiempo de exposición a la radiación es directamente proporcional a la dosis recibida por la persona. La dosis total entonces está representada por la siguiente ecuación:

$$Dosis\ Total = Tasa\ de\ Dosis * Tiempo\ de\ exposición$$

Ecuación 2-3

La distancia entre la fuente de radiación y las personas es un criterio muy efectivo y económico para disminuir la dosis de exposición, ya que la radiación de una fuente de rayos gamma decrece con el cuadrado de la distancia; esto se puede calcular a través de la ley inversa del cuadrado de la distancia, que se expresa matemáticamente por la ecuación siguiente:

$$I_1 d_1^2 = I_2 d_2^2$$

Ecuación 2-4

Donde:

$I_1 =$ Tasa de dosis mediada en el punto 1

$d_1 =$ Distancia desde el punto 1 hasta la fuente de radiación

$I_2 =$ Tasa de dosis mediada en el punto 2

$d_2 =$ Distancia desde el punto 2 hasta la fuente de radiación

El blindaje sirve para atenuar la radiación; los mejores blindajes son los colimadores y éstos son más eficientes cuando se los fabrica de Tungsteno, pero son más costosos que los hechos de Plomo. Ver Anexo 1C.

Fig. 23 Colimador Direccional de Tungsteno para Iridio 192



Fuente: Daniel Castro.

En la Figura 23, se muestra el colimador que sirve para direccionar la radiación; es decir, permite que la radiación salga solo por el orificio que se muestra en la fotografía, blindado el entorno.

2.7. Calificación del Procedimiento para Inspección con Gammagrafía en Tuberías.

La calificación del procedimiento se realiza en cada placa radiográfica. Ver Anexo 1D.

Consiste en verificar dos parámetros:

2.7.1. Indicadores de calidad de imagen radiográfica.

Se debe observar en el negatoscopio, en la placa radiográfica, el hilo sensible correspondiente al espesor de pared de la tubería, en el lugar donde está el(os) Indicador(es) de Calidad de Imagen (IQI). Ver Anexo 1E

Se debe distinguir nítidamente el hilo sensible, sino no es así, el procedimiento tiene alguna falla como por ejemplo, no se está cumpliendo con el valor máximo admisible de penumbra geométrica, para el espesor irradiado; lo cual a su vez podría ser causado porque la distancia fuente película, es muy corta o porque el contacto de la película con el objeto no es el más íntimo posible.

2.7.2. Densidad de la placa radiográfica.

Con la placa en la pantalla del negatoscopio encendido, se debe medir la densidad de la película, con un densitómetro calibrado, en el lugar donde se encuentra la imagen del IQI, junto al hilo sensible.

La lectura tiene que estar dentro del rango de 2.0 hasta 4.0.

La densidad de la placa radiográfica en todos los puntos no es uniforme, como el caso de irradiar tuberías de diámetro mayor a 12 pulgadas, donde la distancia desde la fuente radiactiva hasta el centro de la placa radiográfica, es notablemente mayor que la distancia desde la fuente hasta los extremos de esa placa. Entonces, la diferencia de lectura de densidades comparadas entre el centro de la placa con los extremos va a ser también notable; la Norma permite diferencias, pero no pueden superar el 30%. La densidad medida en el hilo sensible del IQI que se encuentra en el centro de la placa radiográfica será menor que la densidad que se mida en los extremos, donde la distancia es más corta y por lo tanto recibe mayor cantidad de radiación.

Se utilizan indicadores de calidad de imagen (IQI) del tipo alambre, para el caso de tuberías. A continuación en la Tabla 10, se muestra la disponibilidad de IQI tipo alambre: A, B, C y D.

Tabla 22 Disponibilidad de Sets IQI Tipo Alambre.

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

Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 8)

En la tabla 22, se puede ver los Sets usados en la inspección. El set A es para tuberías para espesor menor a 6 mm. El set B se usa con tuberías incluso de 50 mm de espesor. Los sets C y D se utilizan cuando es espesor es mayor que 50 mm. Cada Set tiene 6 alambres de diferente diámetro, uno de esos alambres será el hilo sensible que deberá observarse en la placa radiográfica.

A continuación se observa la Tabla 23, que sirve para identificar el hilo sensible en función del espesor nominal del objeto irradiado. Como puede notarse en esta tabla, no es indiferente colocar este penetrámetro del lado de la fuente radiactiva que detrás del objeto irradiado; lo que ocurre es que el hilo sensible que se debe observar es diferente para el mismo espesor, eso sucede porque es diferente la distancia entre la fuente y el IQI.

Tabla 23 Selección del Hilo Sensible en Función del Espesor Nominal del Objeto Irradiado.

ESPESOR NOMINAL DEL MATERIAL EN PULGADAS (mm)	IQI	
	LADO DE LA FUENTE	LADO DE LA PELÍCULA
	HILO SENSIBLE	HILO SENSIBLE
Hasta 0,25 (6,4)	5	4
mayor que 0,25 hasta 0,375 (6,4 hasta 9,5)	6	5
Mayor que 0,375 hasta 0,50 (9,5 hasta 12,7)	7	6
Mayor que 0,50 hasta 0,75 (12,7 hasta 19)	8	7
Mayor que 0,75 hasta 1,00 (19 hasta 25,4)	9	8
Mayor que 1,00 hasta 1,50 (25,4 hasta 38,1)	10	9
Mayor que 1,50 hasta 2,00 (38,1 hasta 50,8)	11	10
Mayor que 2,00 hasta 2,50 (50,8 hasta 63,5)	12	11
Mayor que 2,50 hasta 4,00 (63,5 hasta 101,6)	13	12
Mayor que 4,00 hasta 6,00 (101,6 hasta 152,4)	14	13
Mayor que 6,00 hasta 8,00 (152,4 hasta 203,2)	16	14
Mayor que 8,00 hasta 10,00 (203,2 hasta 254)	17	16
Mayor que 10,00 hasta 12,00 (254 hasta 304,8)	18	17
Mayor que 12,00 hasta 16,00 (304,8 hasta 406,4)	20	18
Mayor que 16,00 hasta 20,00 (406,4 hasta 508)	21	20

Fuente: Código ASME, Sección V, Artículo 2.

Tabla 24 Densidades Mínimas y Máximas Admisibles en la Placa Radiográfica.

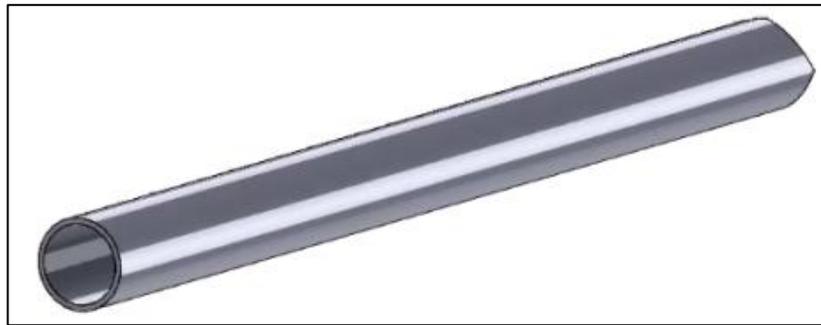
RANGO DE DENSIDAD PERMITIDAS		
Densidad Mínima (-15%)	Densidad en hilo sensible del Penetrómetro (IQI)	Densidad Máxima (+30%)
2,04	2,40	3,12
2,13	2,50	3,25
2,21	2,60	3,38
2,30	2,70	3,51
2,38	2,80	3,64
2,47	2,90	3,77
2,55	3,00	3,80

Fuente: Davis, J. M. (2001, pág 10)

En la Tabla 24, se puede apreciar las lecturas mínimas y máximas que se pueden tolerar en una placa radiográfica, comparando la lectura en el IQI junto al hilo sensible y los valores medidos en otros lugares de la placa.

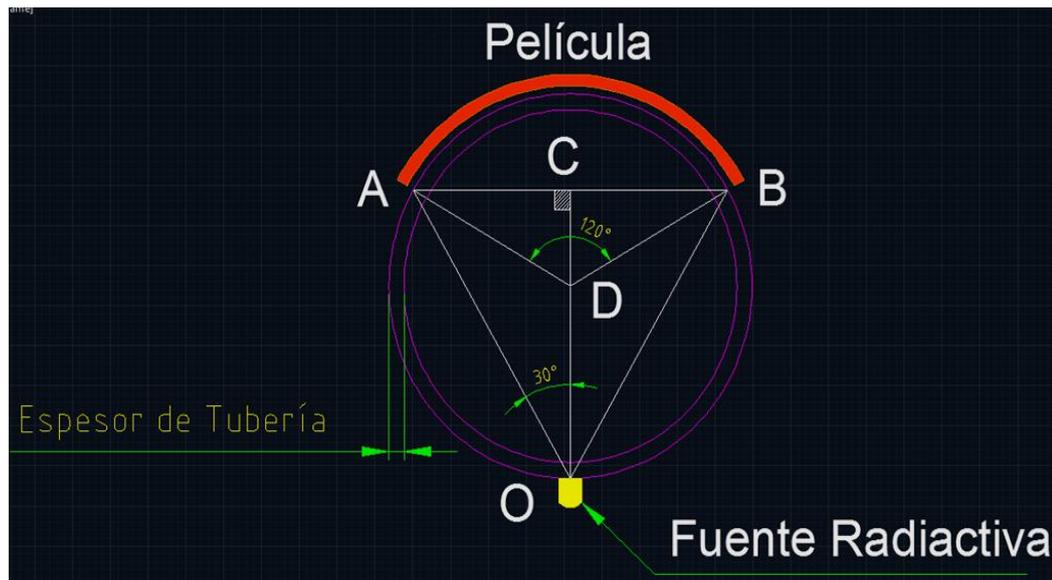
A continuación, se detalla un cálculo que permite determinar la distancia desde la fuente radiactiva hasta uno de los extremos de la placa radiográfica, en una de las tres tomas que deben hacerse con la Técnica Doble Pared Irradiada y Una Sola Imagen para una tubería de diámetro de 16 pulgadas. Ver Anexo 1F.

Fig. 24 Tubería de Acero ASTM A106 Gr. B de diámetro de 16 pulg.



Fuente: Daniel Castro.

Fig. 25 Dibujo en Autocad de Ubicación de la Película y Fuente Radiactiva.



Fuente: Daniel Castro.

A continuación se presenta la resolución del cálculo de la distancia OA, que es necesaria para conocer la cantidad de energía incidente en un extremo de la película y verificar si cumple los requerimientos de la Norma de Referencia ASME, Sección V, Artículo 2.

Resolución:

$$\sin \theta = \frac{AC}{AD}$$

$$\overline{AD} = \frac{d_{ext}}{2} = (radio) = \frac{16 \text{ pulg.}}{3} = 8 \text{ pulg.}$$

$$\overline{AC} = \sin \theta * (\overline{AD}) = \sin 60^\circ * (8 \text{ pulg.}) = 7 \text{ pulg.}$$

$$\overline{CD} = \sqrt{(\overline{AD})^2 - (\overline{AC})^2} = \sqrt{(8 \text{ pulg.})^2 - (7 \text{ pulg.})^2}$$

$$\overline{CD} = 3.8 \text{ pulg.} \cong 4 \text{ pulg.}$$

$$\overline{OC} = \overline{CD} + \overline{OD}$$

$$\overline{OD} = \frac{d_{ext}}{2} = \frac{16 \text{ pulg.}}{3} = 8 \text{ pulg.}$$

$$\overline{OC} = 4 \text{ pulg.} + 8 \text{ pulg.} = 12 \text{ pulg.}$$

$$\overline{OA} = \sqrt{(\overline{OC})^2 + (\overline{AC})^2} = \sqrt{(12 \text{ pulg.})^2 + (7 \text{ pulg.})^2}$$

$$\overline{OA} = 13.89 \text{ pulg.}$$

$$\frac{(16 \text{ pulg.})^2}{(13.89 \text{ pulg.})^2} * 100\% = 132.7\%$$

132.7% – 100% = 32.7% *más energía que en el centro de la película*

La distancia entre la fuente y la película es igual al diámetro externo de la tubería (16 pulg.) y el cálculo estableció que la distancia desde la fuente hasta uno de los extremos de la placa es menor e igual a 13.89 pulg. Con esa distancia de referencia y considerando la Ley del Inverso del Cuadrado de la Distancia, es posible

estimar es incremento de densidad que tendrá la placa radiográfica en los extremos comparada con el centro de la placa. En los extremos será 32.7% más densa que en el centro.

Como se ilustra en la Tabla 23, ese valor no puede exceder el 30% para mantener la calidad de la imagen radiográfica. Para solucionar este inconveniente, lo que se deberá hacer, es que en vez de tomar 3 placas radiográficas en tuberías de diámetro mayor a 12 pulgadas, se debe realizar 4 tomas, lo que reducirá la diferencia entre la distancia desde la fuente radiactiva hasta el centro de la placa y la distancia de la fuente hasta uno de los extremos. El efecto de esto es que la diferencia de densidad estará dentro del rango, es decir, será menor que el 30%.

La implicación de que tiene el cálculo es que en proyectos grandes como oleoductos en donde la cantidad de las juntas soldadas es notable, por ejemplo 8000 juntas, el costo para la empresa contratista para la inspección radiográfica será notablemente menor con solo 3 tomas, pero la calidad de la imagen radiográfica será también mucho menor y los resultados serán poco confiables.

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN CON TINTAS PENETRANTES

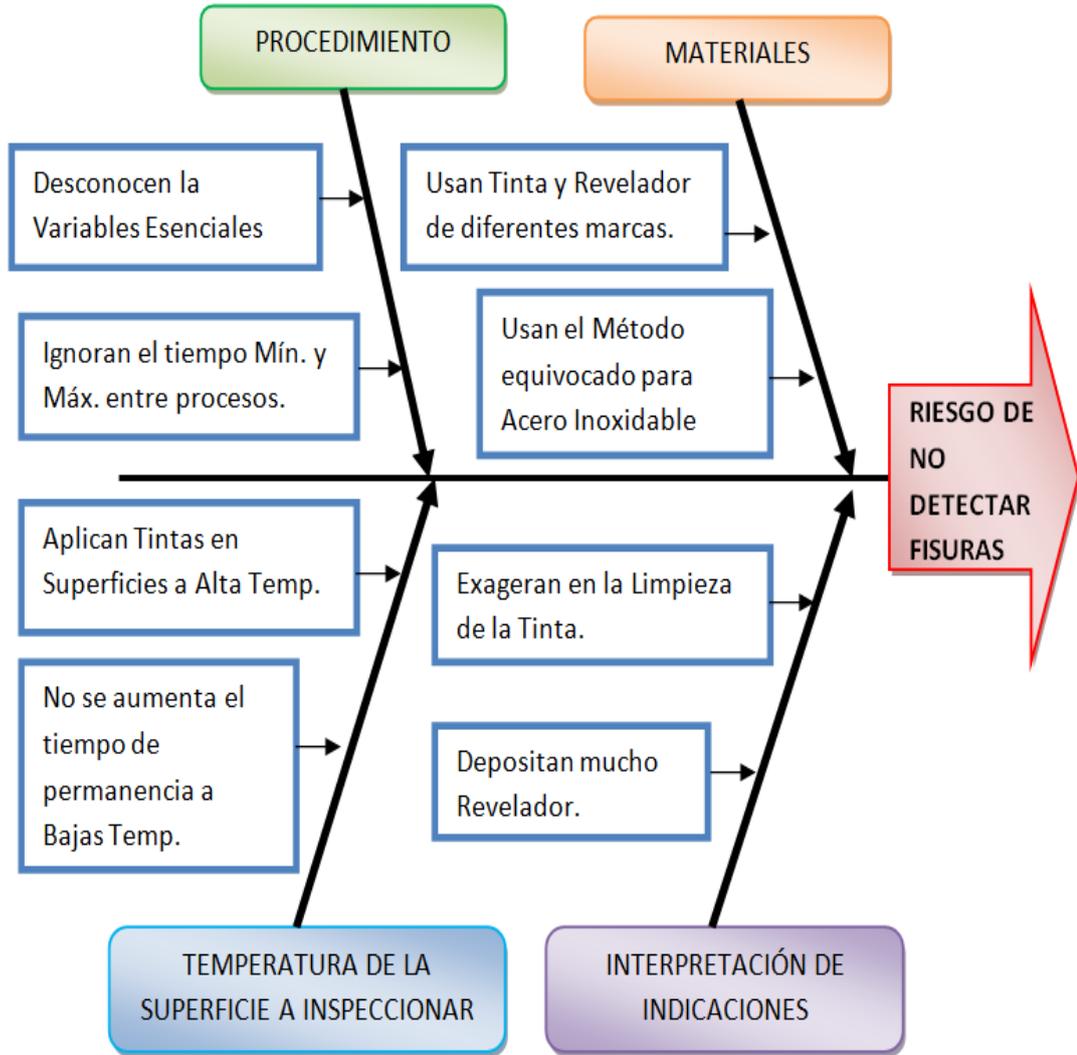
3.1. Análisis de la Situación Actual

Después de haber estudiado los factores principales que intervienen en la Inspección con Tintas Penetrantes, se detectó un efecto negativo, relacionado con la posibilidad de que el ensayo esté dejando de detectar fisuras y otras discontinuidades en los depósitos de soldadura, es decir que el inspector no las visualice y por tanto los defectos de soldadura no sean eliminados. La insuficiencia en la aplicación y luego el exceso de limpieza de la Tinta Penetrante provoca que las indicaciones aparezcan tenues y en la interpretación se consideren no relevantes.

Como consecuencia de aquello, las fisuras conducen a derrames de petróleo, incendios y explosiones en Estaciones de Bombeo y Refinerías. Esos eventos constituyen, riesgo de perjuicio a la vida de las personas, de las demás especies y del medio ambiente.

Posteriormente, se generan problemas económicos, sociales y políticos ya que la Industria del petróleo sostiene el presupuesto del Ecuador.

Fig. 26 Diagrama Causa-Efecto (Ishikawa) para Analizar Gráficamente la Situación Actual en el Ecuador para Inspección con Tintas Penetrantes.



Fuente: Daniel Castro.

En la Figura 26, se puede observar el Diagrama de Ishikawa, que ayuda a identificar, categorizar y poner de manifiesto posibles causas que podrían estar propiciando no detectar fisuras en los cordones de soldadura inspeccionados.

El diagrama en la Fig. 26, fue elaborado en base a cuatro variables esenciales del ensayo con Tintas Penetrantes, describiendo en cada una de ellas, dos errores más frecuentes cometidos por los usuarios.

En el diagrama Causa-Efecto, se resalta que no se usan procedimientos escritos y por ende no se los califica. Eso hace que los inspectores no den importancia a las variables esenciales, las cuales producen una afectación directa al desempeño a todo el proceso de inspección.

Tampoco se cumplen los tiempos normalizados para cada etapa; exceder los tiempos o en otros casos no alcanzar los mínimos establecidos por los fabricantes o las Normas, conlleva a la disminución de la calidad del ensayo y por tanto su confiabilidad.

Se identificó que la principal falla existente con relación a los materiales usados en el proceso actual de inspección, es la mezcla de marcas y métodos que no son corresponden entre sí. Los fabricantes aconsejan no mezclar las Tintas Penetrantes, Removedores y Reveladores de distintas marcas, por el riesgo de provocar corrosión u otro daño permanente en la pieza ensayada.

En el oriente ecuatoriano las temperaturas del ambiente generalmente son muy altas con altos niveles de humedad, lo que a ciertas horas del día provocan que la superficie inspeccionada también esté muy caliente y al momento de realizar el ensayo, la Tinta se seque e imposibilite la acción de extracción del revelador; no se pueda detectar las indicaciones y se repita el ensayo más de una vez, gastando tiempo y dinero.

A eso se suman, criterios equivocados que se manejan actualmente y que conllevan, por ejemplo, a remover con exageración el exceso de Tinta Penetrante o depositar revelador en exceso, los cuáles inciden en la efectividad para la interpretación final de las indicaciones.

Los errores que se cometen en el control de calidad de las soldaduras en las Estaciones de Bombeo, pueden desembocar en que el servicio de inspección mediante Ensayos No Destructivos se vuelva inútil, es decir, no se alcanza el objetivo primordial, que es encontrar en los cordones de soldadura, discontinuidades, sobre todo fisuras.

3.2. Elaboración del Procedimiento

El Procedimiento de Inspección con Tintas Penetrantes Visibles se utiliza para controlar la calidad de Soldaduras de Filete o de Ranura más Filete en juntas soldadas en T y a Traslape.

Para la inspección con el ensayo no destructivo Tintas Penetrantes es necesario un procedimiento escrito, puede haber un procedimiento principal o un procedimiento específico para cada aplicación. (ASTM E-1417, 1999)

El procedimiento escrito tiene que incluir las variables esenciales, descritas en el Código ASME V artículo 6, T-621.1. (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010). Ver Anexo 1J

3.3. Variables Esenciales

Para cada una de las variables esenciales, se debe establecer un valor único o en su defecto un solo rango de valores y así debe constar en el procedimiento escrito.

3.3.1. Identificación de cualquier cambio en el tipo o grupo de materiales:

Tinta Penetrante, Solvente Limpiador, Removedor y Revelador.

Cada vez que hubiera un cambio en una de las variables esenciales, se hace necesario escribir un nuevo procedimiento antes de realizar el ensayo.

Cuando se cambia la marca o el tipo de uno de los elementos para aplicar Tintas Penetrantes (Penetrante, Removedor, Revelador), cambian también los parámetros utilizados, como temperaturas, tiempos de permanencia y otros.

No se puede usar Tinta Penetrante de una marca y Revelador de otra marca o removedor de otra marca, todo el kit para en ensayo debe ser de una misma marca. Así mismo, se debe tener cuidado que el recipiente tenga escrito en la etiqueta el tipo y el método que está previsto en el procedimiento para ser usado. No se puede usar un tipo por otro, ni un método por otro, a pesar que los recipientes sean de una misma marca.

3.3.2. Preparación de la superficie a ensayar.

El cordón de soldadura a ser inspeccionado y sus alrededores (al menos 25mm fuera de la soldadura) debe estar limpio, seco y libre de pintura, grasa, óxido, costras de oxidación a alta temperatura, escoria, chisporroteo de soldadura y cualquier otro material extraño que podría tapar las discontinuidades abiertas a la superficie, lo que afectaría a la interpretación final de las indicaciones.

La superficie a ensayar debe ser uniforme en lo posible, en cuyo caso, las irregularidades deben ser maquinadas mediante torno o fresa. Generalmente no se permite quitar el refuerzo de la soldadura con maquinado, por lo que para tener una superficie lista para aplicar la Tinta Penetrante, se cepilla al cordón de soldadura con una amoladora con un disco de cepillado para metal.

En la limpieza de la superficie también es permitido el uso de detergentes, solventes orgánicos, soluciones químicas y removedores de pintura. Todos estos agentes limpiadores deben cumplir con los requerimientos del control de contaminantes del Código ASME V, Art 6, T-641. En las aleaciones de base Níquel,

de Titanio y aceros inoxidable austeníticos y dúplex no es permitido el uso de agentes químicos que no sobrepasen el 1% en peso de azufre para aleaciones de Níquel y el 1% en peso de halógenos para aleaciones de Titanio y aceros inoxidable austeníticos y dúplex. (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 133)

Fig. 27 Aplicación del Limpiador Met-L-Check E-59A sobre la Superficie



Fuente: (Met-L-Check, 2009)

En la Figura 27, se muestra la aplicación del limpiador E-59A sobre la superficie a inspeccionar, antes de aplicar la Tinta Penetrante, para cumplir con los parámetros de limpieza aceptados por las Normas de Referencia.

Fig. 28 Cordón de Soldadura limpio antes de Aplicar Tinta Penetrante



Fuente: Daniel Castro

En la Figura 28, se puede observar la superficie de un cordón de soldadura después de la limpieza, la zona de la inspección se encuentra uniforme y sin suciedad que tape las discontinuidades de la soldadura.

3.3.3. Aplicación de la tinta penetrante.

La Tinta Penetrante que se utiliza en estaciones de bombeo es del tipo II, que corresponde a tinta coloreada visible a la luz del día, soluble en agua.

El color de la Tinta Penetrante es rojo intenso porque debe garantizar el mayor contraste con el color blanco del revelador, para mostrar a plenitud las indicaciones.

La Tinta Penetrante del Tipo II (Visible), será aplicada mediante un spray provisto por el fabricante y se lo hará sobre la superficie a examinar de manera de depositar una fina capa en forma continua y uniforme, desde una distancia mínima de 30 cm entre el spray y la superficie a ser ensayada e inclinando al spray ligeramente con un ángulo ascendente (positivo); esto es para asegurar que los sólidos, líquidos y gases contenidos dentro del recipiente salgan en las cantidades que fueron previstas por el fabricante, solo así se logrará usar el 100% del contenido.

Fig. 29 Aplicación de Tinta Penetrante Visible Met-L-Check VP-30



Fuente: (Met-L-Check, 2009)

En la Figura 29, se observa cómo se aplica la Tinta Penetrante Visible VP-30 de color rojo, el modo de aplicación es en spray de 310g. Ver Anexo 1K.

Los componentes a inspeccionar que sean muy grandes o largos, deberán ser inspeccionados por secciones. La Tinta Penetrante puede ser aplicada de diferentes modos como: spray, inmersión y brocha, que permitan cubrir toda la superficie a examinar.

Las temperaturas de la superficie a inspeccionar, la Tinta Penetrante y del medio ambiente no deben ser menores que 5°C y no deben ser mayores que 52°C antes de iniciar el ensayo. Es permitido el uso de calentadores o enfriadores en la superficie a inspeccionar. Cuando no sea posible modificar las temperaturas al rango aceptable de 5°C a 52°C, el procedimiento escrito, los materiales (Kit de Tintas Penetrantes) y el proceso deberán ser calificados bajo los nuevos parámetros. (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010) Artículo 6, T-652, T-653. (ASTM E-1220, 1999)

Tabla 25 Clasificación de la Inspección con Tintas Penetrantes por Tipos y Métodos.

Type I—Fluorescent Penetrant Examination
Method A—Water-washable (see Test Method E 1209)
Method B—Post-emulsifiable, lipophilic (see Test Method E 1208)
Method C—Solvent removable (see Test Method E 1219)
Method D—Post-emulsifiable, hydrophilic (see Test Method E 1210)
Type II—Visible Penetrant Examination
Method A—Water-washable (see Test Method E 1418)
Method C—Solvent removable (see Test Method E 1220)

Fuente: ASTM E-165. (2002, Pág. 2)

En la tabla 25, se observa que la Tinta Penetrante Visible del Tipo II solamente es aplicable para los métodos A (Lavable en agua) y C (con Solvente Removedor).

El método A, consiste en usar una tinta penetrante que es soluble en agua y por tanto no requiere otro tipo de solvente para extraer el exceso de tinta de la superficie después del tiempo de permanencia establecido. Es muy importante tener un control sobre la limpieza del exceso de tinta, pues hay algunas marcas de tintas que son más sensibles al contacto con el agua y fácilmente se sobrepasa el grado de limpieza adecuado. Una forma de resolver este inconveniente es generar un contacto indirecto con el agua, es decir con un paño o tela absorbente húmeda.

El método C, requiere usar un solvente distinto del agua como removedor del exceso de tinta penetrante que queda sobre la superficie inspeccionada. Cuando el penetrante es muy sensible al contacto con el agua, a pesar de tomar las precauciones en la limpieza, es necesario usar el solvente removedor; así se minimiza la remoción de tinta de las discontinuidades. (ASTM E-165, 2002)

En la empresa de control de calidad de soldadura Radin, se está usando la Tinta Penetrante Visible de marca Met-L-Check VP-30 fabricada en U.S.A. La Tinta VP-30, tiene una sensibilidad nivel 2, lo que se entiende como sensibilidad media, para Tinta Penetrante Visible Tipo II para Métodos A y C, esta sensibilidad es la máxima a la que puede llegar una Tinta Visible. Con el nivel medio de sensibilidad se pueden detectar discontinuidades de 50 μ y dependiendo de las condiciones de iluminación se podría detectar defectos con un tamaño de 30 μ . (Met-L-Check, 2009)

3.3.3.1. Tiempo de permanencia de la tinta penetrante.

Conocer el tiempo adecuado de permanencia que debe tener la Tinta Penetrante sobre el material a ser inspeccionado es crítico, ya que de este tiempo depende el éxito del ensayo para encontrar discontinuidades en la superficie.

La Tinta Penetrante necesita de un tiempo mínimo para que el líquido penetre y llene totalmente cualquier cavidad existente que se encuentre abierta a la superficie. Existen Tiempos de Permanencia determinados por las Normas de Referencia y los fabricantes del producto.

El tiempo de permanencia se mide inmediatamente después de la aplicación de la Tinta Penetrante y antes de limpiar el exceso de Tinta Penetrante sobre la superficie.

Tabla 26 Tiempo Mínimo de Permanencia de la Tinta Penetrante Visible después de su Aplicación.

Material	Forma	Tipo de Discontinuidad	Tiempo de Permanencia (minutos) (1)
			Tinta Penetrante
Aluminio, Magnesio, Acero, Latón, Bronce, Titanio y Aleaciones para Alta Temperatura	Fundiciones y Soldaduras	Pliegues de Doblado, Nido de Poros, Falta de Fusión y Fisuras (todas las formas)	5
	Materiales Forjados - Extrusiones, Trefilados, Planchas	Traslapes y Fisuras	10
Herramientas con punta de Carburo	Soldadura Fuerte, Soldaduras	Falta de Fusión, Nido de Poros, Fisuras	5
Plásticos	Todas las formas	Fisuras	5
Vidrio	Todas las formas	Fisuras	5
Cerámicos	Todas las formas	Fisuras	5

Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 130)

Nota (1): Los tiempos especificados aplican para un rango de temperaturas de 10°C hasta 52°C. Para temperaturas desde 5°C hasta 10°C, el tiempo de permanencia mínimo de la Tinta Penetrante debe ser 2 veces los valores enlistados en la tabla.

La tabla 26, proporciona una guía para la selección de tiempos de permanencia de la Tinta Penetrante para una variedad de materiales, formas, y tipos de discontinuidades, los tiempos mínimos fueron establecidos para el rango de temperaturas permitidas para la ejecución del ensayo.

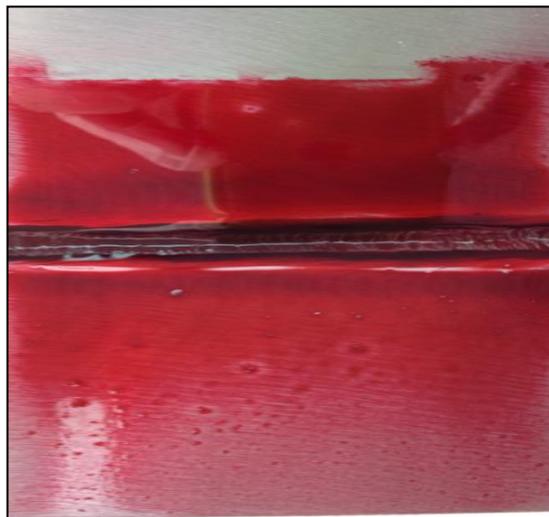
La inspección en las soldaduras de las Estaciones de Bombeo de Petróleo, se deberán utilizar un tiempo mínimo de 5 minutos de permanencia del penetrante. Actualmente en la empresa Radin se utiliza un tiempo de permanencia de 10 minutos, recomendado por el fabricante Met-L-Check y Normas de Referencia como ASTM E-165, ASTM E-1417.

3.3.4. Remover el exceso de tinta penetrante de la superficie.

La técnica para remover el exceso de Tinta Penetrante es un paso muy importante dentro del proceso de examinación de las soldaduras.

El concepto de exceso de Tinta Penetrante, corresponde a toda la Tinta que no logró ingresar a las cavidades de las discontinuidades abiertas a la superficie ensayada.

Fig. 30 Exceso de Tinta Penetrante en el Cordón de Soldadura



Fuente: Daniel Castro

En la Figura 30, se muestra el exceso de Tinta Penetrante sobre la superficie de un cordón de soldadura, ese exceso debe ser quitado completamente antes de la aplicación del revelador.

Después de haber dejado actuar a la Tinta Penetrante Visible durante el tiempo de permanencia especificado, el exceso de Tinta Penetrante en la superficie ensayada debe ser removido utilizando los Métodos A o C, dependiendo el caso.

3.3.4.1.Método A. Lavable con agua.

En el método A, se aplicará agua de manera directa sobre la superficie ensayada, utilizando un recipiente plástico con pulverizador; también se pueden usar otras formas como paño húmedo para limpiar a mano, equipos de pulverización de agua a presión con bombas y mangueras o por inmersión, para piezas pequeñas (la inmersión no debe superar 2 min). (ASTM E-165, 2002)

Para limpiar a mano se requiere de un paño o toalla absorbente que esté limpia seca y sea libre de pelusas; para la remoción de la Tinta, el paño debe estar humedecido pero no saturado de agua.

Después de la remoción de la Tinta, de manera inmediata, la superficie debe estar seca; en algunos materiales por su rugosidad o irregularidades queda agua en sus cavidades y no se secará de manera natural en poco tiempo, en ese caso corresponde usar algún método para acelerar el secado. Si al final del proceso de remoción se observa que aún sigue habiendo demasiada Tinta sobre la superficie, significa que es necesario volver a poner Tinta Penetrante (Para disolver la Tinta sin remover), es decir, repetir todo el proceso nuevamente.

La presión de agua para remover la Tinta debe ser menor a 40 psi y la temperatura del agua debe estar en el rango entre 10°C y 38°C. (ASTM E-165, 2002)

3.3.4.2. Método C. Solvente removedor sin halógenos.

En el método C, será obligatorio aplicar Solvente Removedor, de la misma marca que la Tinta; de manera indirecta, mediante un paño humedecido. Se debe evitar usar solvente en exceso (El revelador mostrará algunas trazas de Tinta cuando el grado de limpieza fue adecuado).

Fig. 31 Método C, adecuada limpieza (Izq.), Excesiva limpieza (Der.)



Fuente: Daniel Castro

En la Figura 31, se compara el resultado de la remoción del exceso de Tinta Penetrante con Solvente Removedor (Método C), realizado en la misma soldadura. Al lado izquierdo, se puede observar que el contraste del revelador tiene algunas trazas de Tinta Penetrante, lo que indica que se ha realizado una correcta limpieza. En el lado derecho, se muestra el resultado de una excesiva limpieza, que incluso ha removido casi totalmente la Tinta Penetrante de las discontinuidades.

Inmediatamente después que ha pasado el tiempo mínimo de permanencia, se procede a quitar la tinta en exceso; el paño que se utiliza debe estar seco, limpio y ser libre de pelusas, para poder humedecerlo ligeramente con el Solvente Removedor. Se

debe tener precaución en este proceso de remoción, pues existe el riesgo de limpiar la tinta contenida dentro de las discontinuidades abiertas a la superficie. El Método C no requiere de un proceso de secado posterior a su aplicación, porque el Solvente Removedor se evapora rápidamente.

Es prohibido aplicar el solvente directamente con el Spray sobre la Superficie. Un exceso de remoción de la Tinta mostrará indicaciones de color rosado tenue, como se puede ver en la Fig. 29 (lado derecho).

Cuando se excede el tiempo de permanencia de la Tinta Penetrante, el Solvente Removedor no logra limpiar completamente el exceso de tinta, entonces se deberá volver a impregnar nuevamente de Tinta Penetrante la superficie y repetir el ensayo.

El Solvente Removedor para Tipos I y II, Método C, Clase 2 no contiene elementos químicos del grupo de los halógenos (Cr, Br); lo cual significa que deben ser aplicados obligatoriamente en materiales que fueron seleccionados para resistir la corrosión y la fragilización, como los aceros inoxidable, el titanio, las aleaciones a base de níquel. En los aceros de bajo carbono no es necesario. (ASTM E-165, 2002)

3.3.5. Aplicación del revelador.

Se emplea un Revelador húmedo adecuado para el Tipo II (Tinta Penetrante Visible), Métodos A y C, Forma E no acuoso, es decir que las partículas de polvo se encuentran disueltas en suspensión en un solvente distinto del agua.

Cuando la pieza inspeccionada se encuentre completamente seca después de la remoción del exceso de Tinta Penetrante; sin que el tiempo de secado supere un minuto. En el caso de que se use Solvente Removedor, el secado es inmediato debido a la evaporación espontánea del solvente. El siguiente paso, es aplicar el Revelador.

La aplicación del Revelador se la puede hacer mediante spray o de alguna otra forma que asegure la completa cobertura de la superficie ensayada. La inmersión de las partes ensayas con Reveladores no acuosos es completamente prohibido.

El Revelador será aplicado sobre toda la superficie de manera uniforme y a una distancia mínima entre el spray y la superficie inspeccionada de 30 cm. El revestimiento blanco que provee el Revelador es básico para generar contraste y poder observar las indicaciones de la Tinta Penetrante de color rojo.

Hacer un depósito uniforme sobre la superficie; si se coloca muy poco revelador puede que no se muestren las discontinuidades y un exceso, puede enmascarar defectos de fabricación. Por tanto, se debe aplicar una película fina, lo cual es fundamental para la interpretación final.

Lo más importante de los Reveladores no acuosos es agitar el contenido del spray frecuentemente, para lograr que las partículas sólidas queden suspendidas uniformemente en el líquido; eso se comprueba con el color que tiene el Revelador, debe ser de color blanco tiza y se tiene que apreciar una mezcla pareja entre sólidos, líquidos y gases. (ASTM E-1417, 1999)

3.3.5.1. Tiempo de revelado.

El tiempo de revelado, comienza inmediatamente después que la capa del Revelador en la superficie inspeccionada este completamente seca; para el caso de del Revelador D-70 en spray, la evaporación es muy rápida por evaporación y el secado es instantáneo. (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010)

El tiempo mínimo y máximo de espera para iniciar la inspección es de 10 minutos y 1 hora, respectivamente o como lo indique el fabricante. Si se ha

sobrepasado el tiempo máximo de inspección, el ensayo tiene que repetirse completamente.

Fig. 32 Kit para el Ensayo con Tintas Penetrantes, Removedor, Tinta Penetrante, Agua y Revelador.



Fuente: Daniel Castro.

En la Figura 32, se observa el Kit completo para la aplicación del Ensayo; se puede ver al lado izquierdo de la Fig.6 el Solvente Removedor E-59, seguido por la Tinta Penetrante Visible VP-30, el pulverizador de agua y finalmente al lado derecho el Revelador D-70, todos los spray de la marca Met-L-Check.

3.3.6. Tiempo mínimo y máximo entre procesos incluido el secado.

Se debe establecer los tiempos mínimo y máximo para cada uno de los procesos que requiere la inspección con Tintas Penetrantes.

3.3.6.1. Tiempo de preparación de la superficie.

El tiempo mínimo para la preparación de la superficie antes de iniciar el ensayo, dependerá de la condición en la que se encuentre la pieza a inspeccionar. Dentro de las Estaciones de Bombeo los trabajos de soldadura en la construcción de nuevas instalaciones se realizan a diario, por este motivo los cordones de soldadura no tendrán demasiada suciedad y el tiempo mínimo para este proceso será 3 minutos. El tiempo máximo deberá ser de 5 minutos.

El período mínimo para cerciorarse que la superficie este seca después de la preparación y antes de aplicar la Tinta Penetrante Visible, es de 2 minutos; ya que el trabajo se realiza en el oriente ecuatoriano en horario de 7:00 a 18:00 con temperaturas que varían de 30°C hasta 40°C, lo que facilita un secado rápido de manera natural.

3.3.6.2. Tiempo de aplicación de la tinta penetrante visible.

El tiempo mínimo que debe demorar el proceso de aplicación de Tinta será de 10 minutos, que incluye el tiempo de permanencia, para temperaturas de entre 5°C y 52°C. Si las temperaturas son de 4° hasta 10°C el tiempo mínimo será de 20 minutos.

El tiempo máximo para este proceso podrá ser de 2 horas. (ASTM E-1417, 1999)

3.3.6.3. Tiempo de remoción del exceso de tinta penetrante.

El tiempo mínimo para remover la Tinta es de 1 minuto y el tiempo máximo podrá ser de hasta 2 minutos.

3.3.6.4. Tiempo de aplicación del revelador.

Todo el proceso de Revelado tendrá una duración mínima de 10 minutos y el tiempo máximo será de 1 hora para Reveladores no acuosos.

3.3.7. Disminución del tiempo de permanencia de la tinta penetrante.

Si la temperatura en la superficie a ensayar supera los 35°C es conveniente considerar un tiempo menor de permanencia de la Tinta, o hacer el trabajo en un horario en que la temperatura sea menor. En ese caso, se recomienda considerar un tiempo máximo de permanencia menor a 10 minutos, porque la Tinta se seca fácilmente.

Para establecer el tiempo de permanencia en esos casos, existe un procedimiento denominado calificación de la técnica para inspecciones a temperaturas superiores o inferiores al rango de 5°C – 52°C.

Fig. 33 Bloque Comparador para Tintas Penetrantes.



Fuente: Daniel Castro.

En la Figura 33, se muestra el bloque comparador para el procedimiento de calificación del ensayo a temperaturas fuera del rango recomendado. En el Anexo 1L constan las dimensiones y la manera como debe usarse e interpretarse los resultados. Básicamente el proceso consiste en ejecutar el ensayo de Tintas Penetrantes en uno de los bloques a temperatura dentro del rango y por tanto con el tiempo de permanencia y demás tiempos como se especifica en este procedimiento; se obtendrán indicaciones que serán fotografiadas para fines de registro y comparación. En un segundo bloque que es idéntico al anteriormente ensayado (mismo material, dimensiones y mismas indicaciones) entonces al ser ensayado a una temperatura que sobrepasa el rango permitido, es necesario calentar este bloque hasta llegar a la misma temperatura que tiene la superficie a ensayar, se lo puede hacer por cualquier medio disponible y establecer un tiempo de permanencia menor a 10 minutos. Si al comparador los dos bloques las indicaciones son idénticas, quiere decir que el nuevo

procedimientos queda calificada y por tanto es confiable. También esto implica escribir un nuevo procedimiento que es específico para trabajar a esa temperatura.

Una alternativa, es utilizar otro método de ensayo no destructivo, denominado partículas magnéticas secas en donde la temperatura no influye sobre el resultado. Si la temperatura es muy alta en la superficie a inspeccionar, el ensayo con Tintas Penetrantes no es confiable.

3.3.8. Incremento del tiempo para la interpretación final.

Si la tinta aparece en exceso sobre el revelador, es difícil establecer el tipo de discontinuidad, por ello, es conveniente en todos los casos, observar las superficies de los depósitos de soldadura en busca de discontinuidades, desde el mismo momento de la aplicación del revelador. Este chequeo se debe volver repetir, a partir de los 10 minutos después de la aplicación del revelador. Si el chequeo se hace después de un tiempo prudencial (máximo 1 hora), tampoco se verá afectada la evaluación; se deberá evitar evaluar las indicaciones después del tiempo máximo especificado, a menos que se observe que continúa saliendo tinta de las cavidades de las discontinuidades, en ese caso, es permitido prolongar el tiempo lo que fuera necesario. (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010) Artículo 6, T- 676.

Para las inspecciones con Tinta Penetrante Visible (Tipo II), se debe interpretar todas las indicaciones. Las piezas que no tienen indicaciones o que tienen indicaciones no relevantes, son aprobadas. Las piezas que tienen indicaciones relevantes pero que pueden aceptarse de acuerdo con los criterios de aceptación/rechazo, también son aprobadas.

Cuando existen indicaciones relevantes y existe la duda del inspector, se tiene que limpiar el revelador y volver a colocar nuevamente el revelador y el tiempo

mínimo que hay que esperar para una nueva evaluación es de 3 min, si después de este proceso no se encuentra la indicación quiere decir que fue una falsa indicación. Este proceso se los puede hacer máximo dos veces.

Cuando las indicaciones después de aplicar el revelador son de color rosado tenue, significa se ha limpiado demasiado el exceso de Tinta Penetrante porque se ha extraído alguna cantidad de tinta de las cavidades.

3.3.8.1. Criterios De Aceptación / Rechazo

Solamente un Inspector de Tintas Penetrantes Certificado ASNT SNT TC-1A Nivel II ó ASNT Nivel III, ejecutará la interpretación de los resultados.

Para evaluar las indicaciones, se utilizarán los siguientes Criterios de Aceptación / Rechazo:

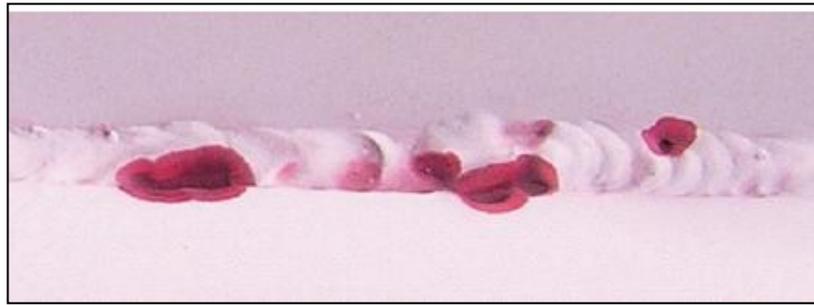
Los criterios de aceptación/rechazo, están establecidos en las normas de referencia:

- Para tanques, API 650 envía a ASME Sección VIII Apéndice 8.
- Para tuberías de Proceso, ASME B31.3 Tabla 341.3.2 (tubería para operar a baja o Sch40 y mediana presión o Sch80).
- Para estructuras metálicas soldadas, AWS D1.1 Sección 6, parte C, 6.10, Tabla 6.1

La norma de referencia será escogida, de acuerdo a la aplicación que va a tener la soldadura.

Para establecer los tamaños de las indicaciones, se deberá medir lo que muestra la tinta, aunque sea evidente que el tamaño propio de la discontinuidad sea menor.

Fig. 34 Indicaciones sobre un Cordón de Soldadura.



Fuente: (Met-L-Check, 2009)

En la Figura 34, puede verse que las discontinuidades tienen un tamaño menor que la indicación en la que están contenidas, lo cual se observa comparando el tamaño de las manchas rojas con la longitud de las líneas oscuras en su interior.

Las indicaciones, serán medidas apropiadamente, utilizando un retículo, con unidades en [mm] ó [pulg].

Tabla 27 Criterios de Aceptación para la Inspección de Juntas en T y Traslapadas en Soldadura de Filetes en Tanques de Almacenamiento.

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/RECHAZO PARA TINTAS PENETRANTES SEGÚN API 650 – 2000, Ver: ASME SECCION VIII DIVISIÓN 1-2007, Apéndices 6 y 8	
Indicaciones Lineales Longitud: Mayores a 1.5mm	Indicaciones Redondeadas Diámetro: Mayores a 5mm Agrupadas y Alineadas: 4 o más, separadas entre si por 1.5mm o menos.

Fuente: (ASME VIII División 1, 2007)

En la Tabla 27, se refiere a que puede haber indicaciones lineales o redondeadas; se entienden como lineales cuando la longitud excede en al menos 3 veces al ancho de la indicación y redondeadas cuando la longitud es comparable al ancho. Se establecen los tamaños máximos de las indicaciones, lo que significa que

si se encuentran indicaciones de tamaños mayores o en mayor cantidad a la admisible, se tendrá que proceder a reparar la soldadura, de lo contrario queda aprobada la junta, es decir, apta para el uso.

Tabla 28 Criterios de Aceptación para la Inspección de Juntas en T y Traslapadas en Soldadura de Filetes en Estaciones de Bombeo, Pozos y Refinerías.

<p style="text-align: center;">CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/RECHAZO PARA TINTAS PENETRANTES SEGÚN ASME B31.3-2012, TABLA 341.3.2</p>
<p style="text-align: center;">Fisuras (A) No se Aceptan Fisuras de Ningún Tipo o Tamaño</p>

Fuente: (ASME B31.3, 2012)

En la Tabla 28, se establece que para las soldaduras de accesorios como: Weld- o -Lets, Thread- o -Lets o Sock- o -Lets, que sirven para conectar en las tuberías, instrumentos de medición de presión, temperatura, válvulas para tomar de muestras, etc., no se aceptan fisuras de ningún tipo o tamaño, es decir, si hay una indicación que es interpretada como fisura, se tiene que cortar esa soldadura y evaluar si puede reutilizarse el accesorio o cambiarlo, volver a soldar y volver a ensayar esa soldadura y repetir el proceso hasta que no se detecten indicaciones que no sea interpretadas como fisuras.

3.3.9. Intensidad de luz mínima aceptable.

La mínima cantidad de iluminación que se requiere para asegurar una correcta inspección es de 50 fc (foot-candel) equivalente a 500 lux, esto significa que se debe preferir la luz del sol y que debe estar bien iluminado el sitio de trabajo, acorde con ASME, sección V, Art. 6, T-676.3. En la norma ASTM E-165 se establece un umbral de iluminación más exigente igual a 100 fc (1000 Lx).

Por esa razón, solo se podrá evaluar las indicaciones del ensayo de Tintas Penetrantes, en un horario de 7:00 a 17:00 horas. En lugares donde se recibe la luz del sol de manera indirecta (trabajos bajo techo), se restringe el horario de 09:00 a 15:00, debido a la disminución de la intensidad de la luz solar.

3.3.10. Temperatura en la superficie a inspeccionar.

La temperatura de la superficie a inspeccionar es una limitación muy importante a considerar antes de realizar el ensayo. A ello se refiere el Código ASME Sección V, Artículo 6 y a la Norma ASTM E-165, las temperaturas a las cuales se debería realizar el ensayo de Tintas Penetrantes son de 5°C hasta 52°C.

Ese rango de temperaturas es una referencia, pero como el trabajo se realiza sobre Acero que retiene mucho el calor y no lo disipa fácilmente; por este motivo, cuando la superficie del ambiente es de más de 35°C, la temperatura de la superficie (tuberías y planchas de acero) es mucho mayor, lo que provoca la evaporación de la Tinta Penetrante en poco tiempo después de su aplicación y se tiene que considerar si conviene o no realizar la inspección en ese caso.

Para resolver este inconveniente, se ha propuesto que el ensayo solo se pueda llevar a cabo cuando las temperaturas de la superficie varíen en un rango desde 10°C hasta 35°C (se debe evitar trabajar a medio día); caso contrario es recomendable realizar la inspección con otro método de ensayo no destructivo, llamado partículas magnéticas secas.

3.3.11. Evaluación periódica del ensayo con tintas penetrantes.

Para que el ensayo con Tintas Penetrantes sea confiable, también es necesario que se realice una evaluación periódica de cada uno de los materiales que intervienen en la inspección. (ASTM E-1417, 1999)

Tabla 29 Frecuencia para Mediciones Periódicas que Permiten Evaluar el Ensayo con Tintas Penetrantes

Pruebas	Frecuencia
Rendimiento del Sistema	Diario
Presión de Agua para el Lavado	Cada Turno
Temperatura del Agua para el Lavado	Cada Turno
Intensidad de Iluminación	Diario
Limpieza del Área de Inspección	Diario
Tinta Penetrante (Método A) Contenido de Agua	Mensual
Removilidad de la Tinta Penetrante	Mensual

Fuente: ASTM E-1417. (1999, pág. 7)

Dado que la inspección de juntas soldadas dentro de estaciones de bombeo se realizan diariamente, la verificación del rendimiento de todo el proceso se la tiene que hacer de acuerdo a la Tabla 29.

En la Tabla 29, se muestra las mediciones más representativas que se deben hacer para el control de los parámetros del Ensayo y que él sea confiable.

La Removilidad de la Tinta Penetrante corresponde al control del envejecimiento o deterioro de la tinta. Se requiere el uso de placas que verifiquen que la tinta se pueda remover con los parámetros correctos, es decir, que después de aplicar el Revelador el contraste no sea completamente blanco, sino que se pueda observar trazas de la Tinta Penetrante.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- En el procedimiento con Gammagrafía, dos variables son de mayor relevancia, la distancia mínima entre la fuente y el objeto a irradiar y la distancia máxima entre el objeto y la película, porque ambas establecen el valor de la penumbra geométrica, que a su vez, es una de dos características que determinan la calidad de la imagen radiográfica. La penumbra geométrica es la borrosidad que impide la adecuada definición de las discontinuidades.
- La calidad de imagen radiográfica se controla utilizando indicadores de calidad de imagen (IQI) para detectar con la vista del radiólogo, el hilo sensible, establecido para cada espesor de pared de tubería. Se complementa midiendo la densidad de la placa radiográfica, que debe estar en el rango de 2.0 hasta máximo 4.0 para gammagrafía.
- Es muy importante para las empresas establecer a partir de qué diámetro se debe usar cuatro placas radiográficas en vez de tres, cuando se irradia tubería con la técnica doble pared irradiada y una sola imagen obtenida. Eso influye notablemente en los costos unitarios por concepto de metros de película radiográfica utilizada en cada proyecto, y dependiendo de su tamaño puede ser determinante para asegurar la utilidad o la quiebra de la empresa.

- De acuerdo a: la Tabla 23 y al cálculo realizado en la pág. 71, la diferencia máxima de hasta 30%, entre los valores de densidades (Código ASME V, Art, 2, T-282.2), sirvió para determinar que a partir de diámetros externos mayores que 10.75 pulgadas, sin importar el espesor, se hace obligatorio realizar cuatro tomas radiográficas; eso debido a la gran diferencia de longitudes entre las distancias desde el centro de la película y la fuente radiactiva, comparada con la distancia desde la fuente hasta uno de los extremos de la película, lo cual, influye en la cantidad de energía incidente en la película y a la vez en las densidades de la placa radiográfica.
- Acorde a la Norma: que está en la pág. 96, en el desarrollo del procedimiento para inspección con Tintas Penetrantes, se detectó que no es usual realizar una evaluación periódica y completa del ensayo, lo cual, controla la confiabilidad de la inspección, siendo en ese caso la variable más importante, evaluar mensualmente la Removilidad de la Tinta Penetrante; que verifica su funcionalidad, es decir, su propiedad capilar.
- De acuerdo a la Figura de la pág. 85, que las indicaciones aparezcan con un color tenue, provoca que exista la posibilidad de realizar una incorrecta interpretación o que las indicaciones no se consideren relevantes o no aparezcan en la superficie ensayada. Esto se debe a que hubo una inadecuada o insuficiente aplicación de Tinta Penetrante sobre la superficie y también hubo exceso de limpieza en la remoción de la Tinta.

- Se detectó que la temperatura del ambiente afecta directamente en la duración del tiempo de permanencia de la Tinta Penetrante. Si la temperatura en la superficie a ensayar supera los 35°C es conveniente considerar un tiempo menor a 10 minutos.
- De acuerdo al Anexo 1I, se concluye que el procedimiento escrito es calificado para realizar el control de calidad de las soldaduras en estaciones de bombeo. Esto se debe a que los parámetros del ensayo fueron aplicados de manera correcta, por lo tanto el hilo sensible 6 del IQI del Set A es totalmente visible y el rango de densidades de las placas radiográficas es de 2.0 a 4.0
- En ensayo con Tintas Penetrantes del Anexo 1N, permite llegar a la conclusión que los tiempos de permanencia, tiempo de revelado e interpretación, rango de temperaturas, remoción del exceso de tinta y el método de aplicación de Tinta, Revelador son los correctos para identificar discontinuidades abiertas a la superficie, por tal motivo el procedimiento escrito califica para inspección de soldaduras en estaciones de bombeo.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda a las empresas, el uso de Normas de Referencia para sus trabajos, ya que constituyen el nivel más alto de la información, a nivel profesional. Estos documentos están por encima de los textos, los catálogos y los manuales. Pero las Normas no son didácticas, por lo que también se recomienda, capacitarse en cursos de entrenamiento y aprovechar otros recursos disponibles en el medio, como la experiencia en el campo.
- Es recomendable que los inspectores, fiscalizadores y supervisores usen diariamente el procedimiento escrito, como una guía para una buena práctica en su trabajo cotidiano, que se verifique que cada parámetro haya sido aplicado dentro del rango de valores que fue establecido.
- Las personas y empresas interesadas en trabajar con Gammagrafía, deben tener conocimiento que desde el punto de vista legal, es necesario obtener una licencia institucional. Además deben contratar un oficial de seguridad radiológica, que debe tener licencia vigente y los trabajadores de la empresa, también deben tener una licencia ocupacional.
- Los procedimientos escritos para Ensayos No Destructivos, son el cimiento para el desarrollo de los conocimientos, la investigación y la fabricación de productos de buena calidad, capaces de competir en el mercado nacional e internacional. El procedimiento escrito, además, es una ayuda para los inspectores, para profesionales, tecnólogos e ingenieros de la rama mecánica o afines, que quisieran incursionar en las actividades de fiscalización, supervisión o inspección en la Industria Petrolera.

REFERENCIAS

- Abdou, M., Carnegie, A., Mathews, G., Mccarthy, K., Raghuraman, B., Wei, W., & Xian, C. (2011). Valor del Agua de Formación. *Oilfield Review*, 23(1), 14.
- AGFA. (1989). *Radiografía Industrial*. Barcelona: Agfa-Gevaert.
- Agfa Gevaert. (2012). *Health Care Revelador G-150*. Mortsel: Agfa-Gevaert N.V.
- AGFA NDT. (2002). *Structurix Film Systems Radiographic Film Systems*. Mortsel, Bélgica: Agfa-Gevaert.
- ANSI B36.10. (1979). *Dimensions and weights of steel pipe*. Washington, DC: American National Standard Institute.
- ANSI/AWS B1.0. (1980). *Guide for the Nondestructive Inspection of Welds*. Miami: American Welding Society.
- ASME B31.3. (2012). *Process Piping*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME V Boiler and Pressure Vessel Code. (2010). *Nondestructive Examination*. New York, New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME VIII División 1. (2007). *Rules for Construction of Pressure Vessels*. New York: American Society of Mechanical Engineers.
- ASNT. (2004). *Working Safely in Radiography*. Columbus: The American Society for Nondestructive Testing.

- ASTM A106. (2004). *Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High Temperature Service*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM A-36. (2004). *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E 94. (2004). *Standard Guide for Radiographic Examination*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E1114. (2003). *Standard Test Method for Determining the Focal Size of Iridium-192 Industrial Radiographic Sources*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E-1220. (1999). *Standard test Method for Visible Penetrant Examination Using Solvent-Removable Process*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E-1417. (1999). *Standard Practice for Liquid Penetrant Examination*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E-1418. (1998). *Standard Test Method for Visible Penetrant Examination Using the Water Washable Process*. West Conshohocken : American Society for Testing and Materials.
- ASTM E-165. (2002). *Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

- ASTM E1815. (1996). *Standard Test Method for Industrial Radiography*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E-999. (1995). *Standard Guide for Controlling the Quality of Industrial Radiographic Film Processing*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- AWS D1.6. (1999). *Structural Welding Code Stainless Steel*. Miami: American Welding Society.
- Bossi, R., Iddings, F., & Wheeler, G. (2002). *Nondestructive Testing Handbook Radiographic Testing* (Tercera edición ed., Vol. IV). (P. Moore, Ed.) Columbus, Ohio, USA: American Society for Nondestructive Testing.
- Cabrera, D. A. (5 de Agosto de 2011). *bvscuba Libros de Autores Cubanos*. Recuperado el 3 de Octubre de 2014, de bvscuba Libros de Autores Cubanos: <http://gsdl.bvs.sld.cu/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0imaginol--00-0---0-10-0---0---0direct-10---4-----0-11--11-mi-50---20-about---00-0-1-00-0-0-11-1-0gbk-00&a=d&cl=CL1&d=HASH015b1ecf3522955792b22e3c.6.3.fc>
- Comisión Internacional de Protección Radiológica. (1990). *Protection against Ionizing Radiation from External Sources*. New York: Pergamon Press.
- Davis, J. M. (2001). *Radiography mathematical Formulas and References for Nondestructive Testing*. Las Vegas: The Art Room Corporation.
- Flores, I. C. (2012). *Soldadura al Arco Eléctrico SMAW*. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ingeniería. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. Recuperado el 14 de Enero de 2015, de http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_08_MEC01.pdf

- Garrett, W., Splettstosser, H., & Titus, D. (1980). *Radiography in Modern Industry* (Cuarta edición ed.). (R. Quinn, & C. Sigl, Edits.) Rochester, New York, USA: Kodak.
- Kodak. (1980). *Radiography in Modern Industry* (Cuarta edición ed.). Rochester, New York, USA: Eastman Kodak Company.
- KODAK. (1990). *Chemicals for Industrial Radiographic Processing*. Rochester: Eastman Kodak Company.
- Met-L-Check. (9 de marzo de 2009). *Met-L-Check Company*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de Met-L-Check Company: http://www.met-l-check.com/pdf/products_data_sheets/products_data_sheets_visible_penetrant/vp_30__product_data_mlc_3_09.pdf
- Ness, S., & Sherlock, C. N. (1996). *Nondestructive Testing Handbook* (Vol. V). (P. Moore, & P. McIntire, Edits.) Columbus, Ohio, USA: American Society for Nondestructive Testing.
- OCP Ecuador. (2013). *OCP Ecuador*. Recuperado el 14 de enero de 2015, de OCP Ecuador: <http://ocpecuador.com/es/funcionamiento/como-funciona-una-estacion-de-bombeo>
- OIEA. (1996). *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. Vienna, Austria: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- QSA GLOBAL. (2012). *Operating and Maintenance Manual*. Burlington: Qsa Global.

Tracy, N. (1999). *Nondestructive Testing Handbook Liquid Penetrant Testing*
(Tercera edición ed., Vol. II). (P. Moore, Ed.) Columbus, Ohio, USA:
American Society for Nondestructive Testing.

Uribe, C. L. (2008). Soldadura GMAW - MIG/MAG. *Metal Actual*(14), 7.
Recuperado el 14 de Enero de 2015, de
http://www.metalactual.com/revista/10/procesos_soldadura.pdf

ANEXOS

ANEXO 1A

Variables Esenciales de procedimiento Radiográfico.

T-220 GENERAL REQUIREMENTS

T-221 Procedure Requirements

T-221.1 Written Procedure. Radiographic examination shall be performed in accordance with a written procedure. Each procedure shall include at least the following information, as applicable:

- (a) material type and thickness range
- (b) isotope or maximum X-ray voltage used
- (c) source-to-object distance (*D* in T-274.1)
- (d) distance from source side of object to film (*d* in T-274.1)
- (e) source size (*F* in T-274.1)
- (f) film brand and designation
- (g) screens used

T-221.2 Procedure Demonstration. Demonstration of the density and image quality indicator (IQI) image requirements of the written procedure on production or technique radiographs shall be considered satisfactory evidence of compliance with that procedure.

T-222 Surface Preparation

T-222.1 Materials Including Castings. Surfaces shall satisfy the requirements of the applicable materials specification or referencing Code Section, with additional conditioning, if necessary, by any suitable process to such a degree that the images of surface irregularities cannot mask or be confused with the image of any discontinuity on the resulting radiograph.

A lead symbol "B," with minimum dimensions of $\frac{7}{8}$ in. (13 mm) in height and $\frac{1}{16}$ in. (1.5 mm) in thickness, shall be attached to the back of each film holder during each exposure to determine if backscatter radiation is exposing the film.

T-224 System of Identification

A system shall be used to produce permanent identification on the radiograph traceable to the contract, component, weld or weld seam, or part numbers, as appropriate. In addition, the Manufacturer's symbol or name and the date of the radiograph shall be plainly and permanently included on the radiograph. This identification system does not necessarily require that the information appear as radiographic images. In any case, this information shall not obscure the area of interest.

T-225 Monitoring Density Limitations of Radiographs

Either a densitometer or step wedge comparison film shall be used for judging film density.

T-226 Extent of Examination

The extent of radiographic examination shall be as specified by the referencing Code Section.

T-230 EQUIPMENT AND MATERIALS

T-231 Film

T-231.1 Selection. Radiographs shall be made using industrial radiographic film.

Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 7)

ANEXO 1B

Certificado de la fuente radiactiva Iridio-192 de 108.3 (Ci) a la fecha de fabricación, utilizada en la inspección con gammagrafía.



QSA Global, Inc.
 40 North Avenue
 Burlington, MA 01803
 Telephone: (781) 272-2000
 Toll Free: (800) 815-1383
 Facsimile: (781) 273-2216

Source Certificate

Radiomulclide: *Ir192*
 ISO/ANSI Classification: *97E64515*
 IAEA Special Form Reference Number: *USA0335/S-96*
 Measured Equivalent Activity on *Nov-13-2014*
108.3 Ci **4.0 TBq**

Holder/Capsule # **13112G**
 Source Model: **A424-9**
 Product Code: **ICUCF100**
 Sales Order **284030** **RADINCEVALL CIA. LTDA.**

Source Physical Size:

	(mm)	(in)
Diameter	3.000	0.118
Length	2.750	0.108
Diagonal	4.070	0.160

Quality Control Tests *Nov-13-2014*

Wipe Test A: <0.00045 uCi
 Vacuum Bubble Test: Passed
 Tensile Test: Passed
 Wipe Test B: <0.00045 uCi

Decay Data:

Activity in Curies						
Date	Date +1	Date +2	Date +3	Date +4	Date +5	Date +6
108.3	107.3	106.3	105.3	104.3	103.3	102.4
101.4	100.5	99.5	98.6	97.7	96.8	95.9
95.0	94.1	93.2	92.3	91.5	90.6	89.8
88.9	88.1	87.3	86.4	85.6	84.8	84.0
83.3	82.5	81.7	80.9	80.2	79.4	78.7
78.0	77.2	76.5	75.8	75.1	74.4	73.7
73.0	72.3	71.6	71.0	70.3	69.6	69.0
68.4	67.7	67.1	66.5	65.8	65.2	64.6
64.0	63.4	62.8	62.2	61.6	61.1	60.5
59.9	59.4	58.8	58.3	57.7	57.2	56.6
56.1	55.6	55.1	54.6	54.0	53.5	53.0
52.5	52.1	51.6	51.3	50.6	50.1	49.7
49.2	48.7	48.3	47.8	47.4	46.9	46.5
46.1	45.6	45.2	44.8	44.4	44.0	43.5
43.1	42.7	42.3	41.9	41.5	41.2	40.8
40.4	40.0	39.6	39.3	38.9	38.5	38.2
37.8	37.5	37.1	36.8	36.4	36.1	35.8
35.4	35.1	34.8	34.6	34.3	33.8	33.5
33.2	32.9	32.5	32.2	31.9	31.6	31.3
31.1	30.8	30.5	30.2	29.9	29.6	29.4
29.1	28.8	28.5	28.2	27.9	27.7	27.5
27.2	27.0	26.7	26.5	26.2	26.0	25.7
26.6	26.2	25.9	25.8	25.6	25.3	25.1
23.9	23.6	23.4	23.2	23.0	22.8	22.6
22.4	22.1	21.9	21.7	21.5	21.3	21.1
20.9	20.7	20.5	20.4	20.2	20.0	19.8
19.6	19.4	19.2	19.1	18.9	18.7	18.5
18.4	18.2	18.0	17.8	17.7	17.5	17.3
17.2	17.0	16.9	16.7	16.6	16.4	16.2
16.1	15.9	15.8	15.6	15.5	15.4	15.2
15.1	14.9	14.8	14.6	14.5	14.4	14.2
14.1	14.0	13.8	13.7	13.6	13.5	13.3
13.2	13.1	13.0	12.8	12.7	12.6	12.5
12.4	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8	11.7
11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	10.9
10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.3	10.2
10.2	10.1	10.0	9.9	9.8	9.7	9.6
9.5	9.4	9.3	9.2	9.2	9.1	9.0
8.9	8.8	8.7	8.7	8.6	8.5	8.4
8.3	8.3	8.2	8.1	8.0	8.0	7.9
7.8	7.7	7.7	7.6	7.5	7.4	7.4
7.3	7.2	7.2	7.1	7.0	7.0	6.9
6.8	6.8	6.7	6.7	6.6	6.5	6.5
6.4	6.3	6.3	6.2	6.2	6.1	6.1
6.0	5.9	5.9	5.8	5.8	5.7	5.7
5.6	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.3
5.3	5.2	5.2	5.1	5.1	5.0	5.0
4.9	4.9	4.8	4.8	4.7	4.7	4.7
4.6	4.6	4.5	4.5	4.4	4.4	4.4
4.3	4.3	4.2	4.2	4.2	4.1	4.1
4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.8
3.8	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6

Activity in Tera-Becquerels

Date	Date +1	Date +2	Date +3	Date +4	Date +5	Date +6
4.00	3.96	3.93	3.89	3.85	3.82	3.78
3.75	3.71	3.68	3.64	3.61	3.57	3.54
3.51	3.48	3.44	3.41	3.38	3.35	3.32
3.28	3.25	3.22	3.19	3.16	3.13	3.10
3.08	3.05	3.02	2.99	2.96	2.93	2.91
2.88	2.85	2.83	2.80	2.77	2.75	2.72
2.70	2.67	2.65	2.62	2.60	2.57	2.55
2.52	2.50	2.48	2.45	2.43	2.41	2.39
2.36	2.34	2.32	2.30	2.28	2.25	2.23
2.21	2.19	2.17	2.15	2.13	2.11	2.09
2.07	2.05	2.03	2.01	1.99	1.98	1.96
1.94	1.92	1.90	1.89	1.87	1.85	1.83
1.82	1.80	1.78	1.76	1.75	1.73	1.72
1.70	1.68	1.67	1.65	1.64	1.62	1.61
1.59	1.58	1.56	1.55	1.53	1.52	1.50
1.49	1.48	1.46	1.45	1.43	1.42	1.41
1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32
1.31	1.29	1.28	1.27	1.26	1.25	1.23
1.22	1.21	1.20	1.19	1.18	1.17	1.15
1.14	1.13	1.12	1.11	1.10	1.09	1.08
1.07	1.06	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01
1.00	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95
0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.90	0.89
0.88	0.87	0.86	0.85	0.85	0.84	0.83
0.82	0.81	0.81	0.80	0.79	0.78	0.78
0.77	0.76	0.76	0.75	0.74	0.73	0.73
0.72	0.71	0.71	0.70	0.69	0.69	0.68
0.67	0.67	0.66	0.66	0.65	0.64	0.64
0.63	0.62	0.62	0.61	0.61	0.60	0.60
0.59	0.58	0.58	0.57	0.57	0.56	0.56
0.55	0.55	0.54	0.54	0.53	0.53	0.52
0.52	0.52	0.51	0.50	0.50	0.49	0.49
0.48	0.48	0.47	0.47	0.47	0.46	0.45
0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43
0.42	0.42	0.42	0.41	0.41	0.40	0.40
0.40	0.39	0.39	0.39	0.38	0.38	0.37
0.37	0.37	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35
0.35	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.33
0.32	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31
0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27
0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25
0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23
0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22
0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20
0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19
0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18
0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

Fuente: (QSA GLOBAL, 2012)

ANEXO 1C

CÁLCULO DE LA DISTANCIA SEGURA

El público que labora en sitios aledaños a la zona de irradiación y el personal de RADIN deberá localizarse por lo menos a una distancia en la que el contador de tasa de dosis marque un máximo de 2mR/h.

EJEMPLO 1.

Calcular la distancia segura si se trabaja con una fuente de 925GBQ (o 25ci), sin y con colimador.

$$TDS = 20\mu\text{sv/h} \text{ (2mr/h)}$$

TDS = tasa de dosis segura

TDE = tasa de dosis emitida

TDE ATENUADA = tasa de dosis atenuada por colimador de tungsteno

DS = distancia segura

D= 1m (referencia)

Γ = factor gamma del ir192 = 0.13(mSv.m²/GBQ.h)

$$\frac{TDE}{TDS} = \frac{DS^2}{D^2}$$

(La Tasa De Dosis Es Inversamente Proporcional Al Cuadrado De La Distancia)

$$DS = \sqrt{\frac{TDE * D^2}{TDS}}$$

✓ **SIN COLIMADOR DE TUNGSTENO**

$$TDE = \Gamma * \frac{\text{Actividad}}{D^2}$$

$$TDE = (0.13(\text{mSv}\cdot\text{m}^2/\text{GBQ}\cdot\text{h}) * 925\text{GBQ})/1\text{m}^2$$

$$TDE = 120.25(\text{mSv/h}) = 120250\mu\text{Sv/h}$$

$$DS = \sqrt[2]{\frac{120250\mu\text{Sv/h} * 1\text{m}^2}{20\mu\text{Sv/h}}}$$

$$DS = 77.54 \text{ m}$$

$$DS = \sqrt[2]{\frac{TDE \text{ atenuada} * D^2}{TDS}}$$

✓ **CON COLIMADOR DE TUNGSTENO (ATENUACIÓN CON ESTE BLINDAJE 95%)**

$$\text{Factor de Atenuación Del Colimador} = 100\% - 95\% = 5\% = 0.05$$

$$TDE = 120250\mu\text{Sv/h}$$

$$TDE \text{ atenuada} = \text{atenuacion colimador de tungsteno} * TDE$$

$$TDE \text{ atenuada} = 0.05 * 120250\mu\text{Sv/h}$$

$$TDE \text{ atenuada} = 6012.5\mu\text{Sv/h}$$

$$DS = \sqrt[2]{\frac{TDE \text{ atenuada} * D^2}{TDS}}$$

$$DS = \sqrt{\frac{6012.5\mu\text{Sv/h} * 1\text{m}^2}{20\mu\text{Sv/h}}}$$

$$DS = 17.33\text{m}$$

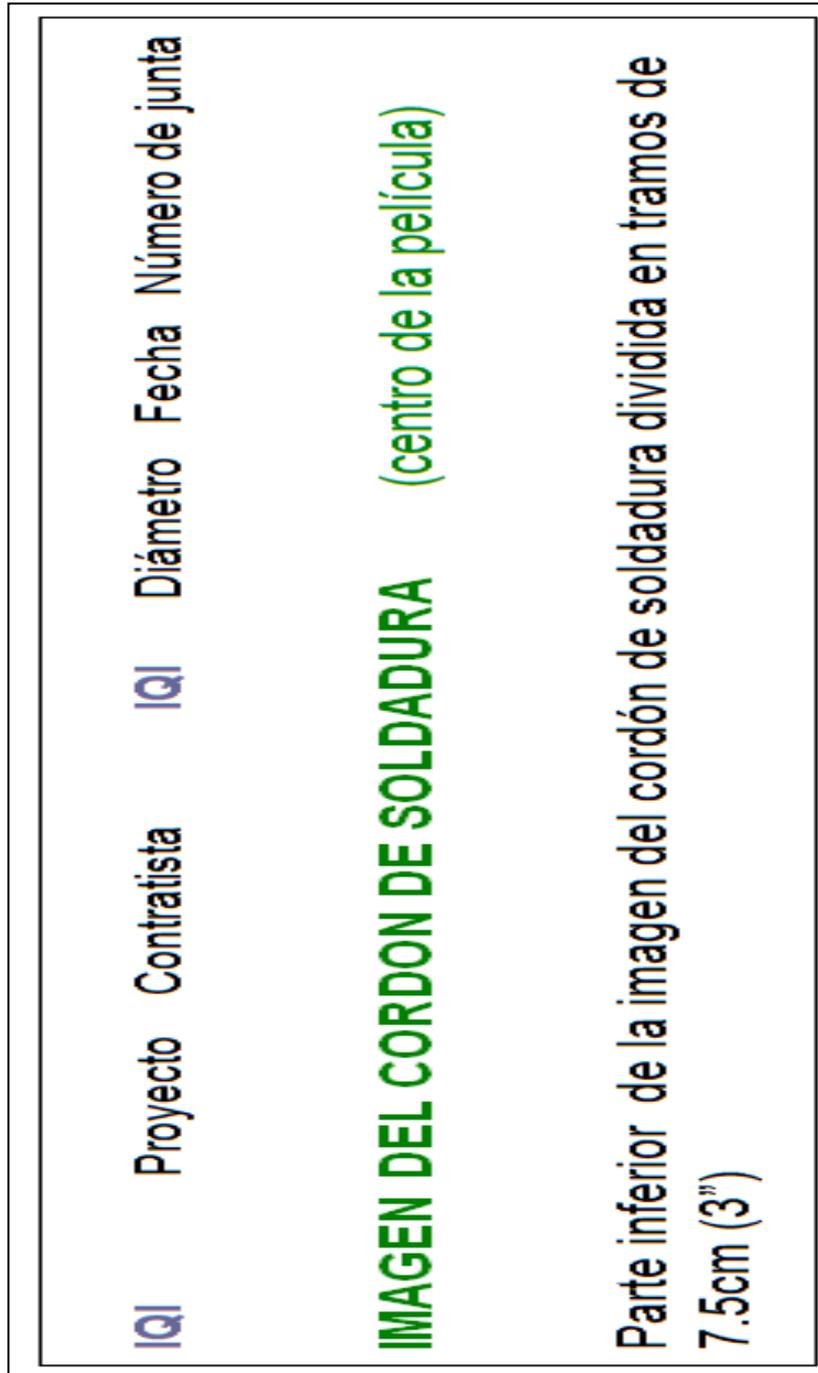
Tabla de actividad de la fuente radiactiva y la distancia segura mínima.

TABLA DE ACTIVIDAD MATERIAL RADIOACTIVO vs DISTANCIA SEGURA				
ACTIVIDAD FUENTE	ACTIVIDAD FUENTE	TASA DE DOSIS A 1 M	DISTANCIA SEGURA SIN COLIMADOR	DISTANCIA SEGURA CON COLIMADOR
CI	GBQ	MSV/H	(M)	(M)
100	3700	481	155.08	34.68
97.5	3607.5	468.975	153.13	34.24
95	3515	456.95	151.15	33.80
92.5	3422.5	444.925	149.15	33.35
90	3330	432.9	147.12	32.90
87.5	3237.5	420.875	145.06	32.44
85	3145	408.85	142.98	31.97
82.5	3052.5	396.825	140.86	31.50
80	2960	384.8	138.71	31.02
77.5	2867.5	372.775	136.52	30.53
75	2775	360.75	134.30	30.03
72.5	2682.5	348.725	132.05	29.53
70	2590	336.7	129.75	29.01
67.5	2497.5	324.675	127.41	28.49
65	2405	312.65	125.03	27.96
62.5	2312.5	300.625	122.60	27.41
60	2220	288.6	120.12	26.86
57.5	2127.5	276.575	117.60	26.30
55	2035	264.55	115.01	25.72
52.5	1942.5	252.525	112.37	25.13
50	1850	240.5	109.66	24.52
47.5	1757.5	228.475	106.88	23.90
45	1665	216.45	104.03	23.26
42.5	1572.5	204.425	101.10	22.61
40	1480	192.4	98.08	21.93
37.5	1387.5	180.375	94.97	21.24
35	1295	168.35	91.75	20.52
32.5	1202.5	156.325	88.41	19.77
30	1110	144.3	84.94	18.99
27.5	1017.5	132.275	81.32	18.18
25	925	120.25	77.54	17.34
22.5	832.5	108.225	73.56	16.45
20	740	96.2	69.35	15.51
17.5	647.5	84.175	64.87	14.51
15	555	72.15	60.06	13.43
12.5	462.5	60.125	54.83	12.26
10	370	48.1	49.04	10.97
7.5	277.5	36.075	42.47	9.50
5	185	24.05	34.68	7.75
2.5	92.5	12.025	24.52	5.48

Fuente: Daniel Castro

ANEXO 1E

Orden de ubicación de los datos de identificación en una película radiográfica:



Fuente: Daniel Castro

ANEXO 1F

Norma ANSI B36.10 para las dimensiones, espesor y pesos de las tuberías de acero

Dimensions and weights of steel pipe to ANSI B 36.10-1979		Dimensions and weights of steel pipe to ANSI B 36.10-1979		Dimensions and weights of steel pipe to ANSI B 36.10-1979		Dimensions and weights of steel pipe to ANSI B 36.10-1979	
masses des tubes acier suivant norme ANSI B 36.10-1979		masses des tubes acier suivant norme ANSI B 36.10-1979		masses des tubes acier suivant norme ANSI B 36.10-1979		masses des tubes acier suivant norme ANSI B 36.10-1979	
Diameter Nominal Size Inches	Outside diameter	Wall thickness Pouce mm	Weight lbs/ft kg/m	API Specifications 3/82 5/82	EPAASOUR Wt. ID XS XKS	Schedule 20 30 40 60 80 100 120 140 160 180	Identification
6	6.625	0.188	10.27	X	X	20	X
	6.625	0.188	20.76	X	X	30	X
	6.625	0.188	22.31	X	X	40	X
	6.625	0.188	23.86	X	X	STD	X
	6.625	0.188	25.41	X	X	XS	X
	6.625	0.188	26.96	X	X	XKS	X
	6.625	0.188	28.51	X	X		
	6.625	0.188	30.06	X	X		
	6.625	0.188	31.61	X	X		
	6.625	0.188	33.16	X	X		
	6.625	0.188	34.71	X	X		
	6.625	0.188	36.26	X	X		
8	8.625	0.250	16.03	X	X	20	X
	8.625	0.250	32.06	X	X	30	X
	8.625	0.250	48.09	X	X	40	X
	8.625	0.250	64.12	X	X	STD	X
	8.625	0.250	80.15	X	X	XS	X
	8.625	0.250	96.18	X	X	XKS	X
	8.625	0.250	112.21	X	X		
	8.625	0.250	128.24	X	X		
	8.625	0.250	144.27	X	X		
	8.625	0.250	160.30	X	X		
	8.625	0.250	176.33	X	X		
	8.625	0.250	192.36	X	X		
10	10.625	0.312	21.81	X	X	20	X
	10.625	0.312	43.62	X	X	30	X
	10.625	0.312	65.43	X	X	40	X
	10.625	0.312	87.24	X	X	STD	X
	10.625	0.312	109.05	X	X	XS	X
	10.625	0.312	130.86	X	X	XKS	X
	10.625	0.312	152.67	X	X		
	10.625	0.312	174.48	X	X		
	10.625	0.312	196.29	X	X		
	10.625	0.312	218.10	X	X		
	10.625	0.312	239.91	X	X		
	10.625	0.312	261.72	X	X		
12	12.625	0.375	27.61	X	X	20	X
	12.625	0.375	55.22	X	X	30	X
	12.625	0.375	82.83	X	X	40	X
	12.625	0.375	110.44	X	X	STD	X
	12.625	0.375	138.05	X	X	XS	X
	12.625	0.375	165.66	X	X	XKS	X
	12.625	0.375	193.27	X	X		
	12.625	0.375	220.88	X	X		
	12.625	0.375	248.49	X	X		
	12.625	0.375	276.10	X	X		
	12.625	0.375	303.71	X	X		
	12.625	0.375	331.32	X	X		

Fuente: (ANSI B36.10, 1979, pág. 5)

ANEXO 1G

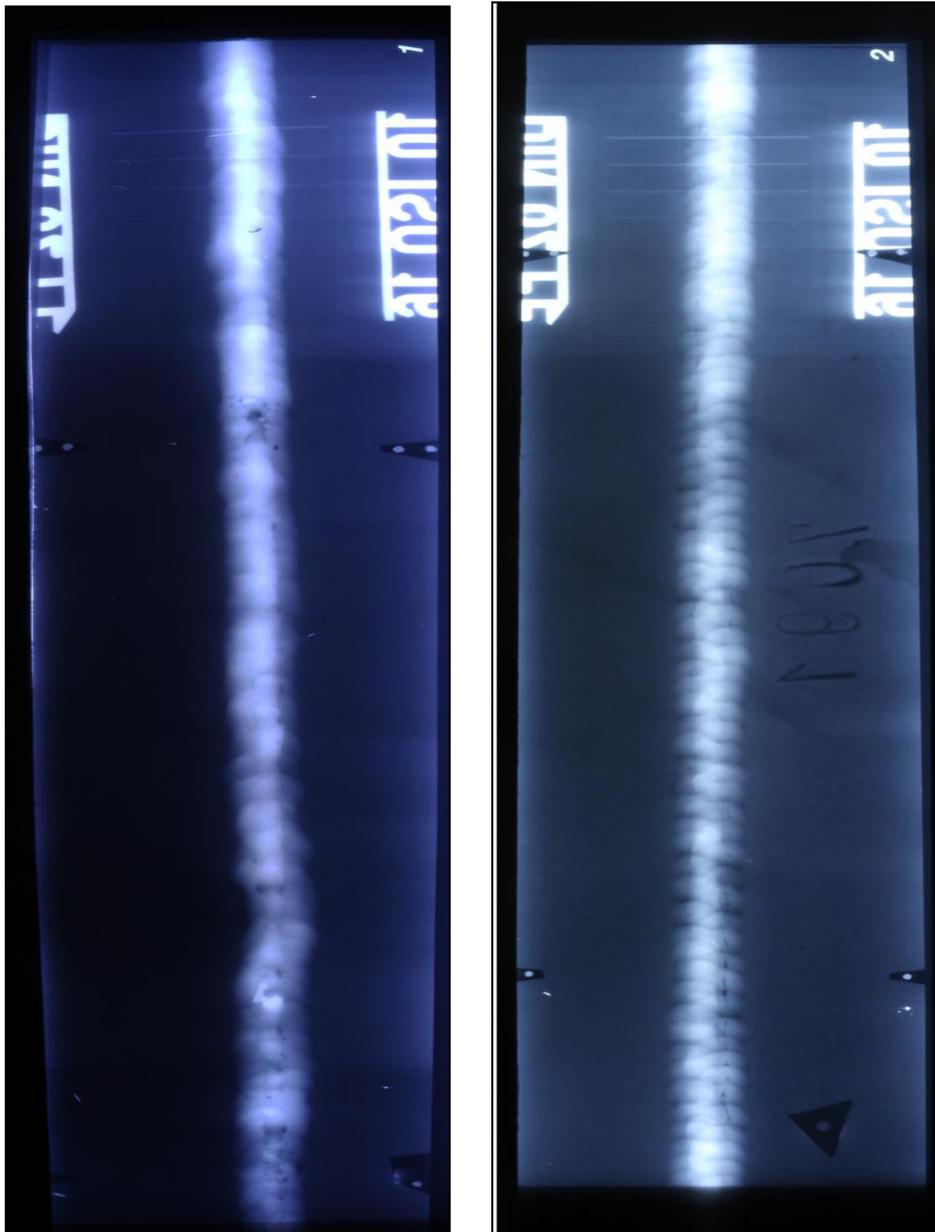
Metodología para el uso de la norma ISO 5817, que sirve para entrenamiento y evaluación de radiólogos en la interpretación de placas radiográficas.

ISO 5817 INTERPRETACIÓN RADIOGRÁFICA				
No. PLACA	ESPESOR (mm)	DISCONTINUIDADES	DEFECTOS ASME B31.3	
			SI	NO
1	5	IC, IF, P, ESJ, EU, CP	IF ESJ=24mm CP=10mm	IC Ok EU hacer Inspección Visual OK
2	5	IU, EC		IU= 70mm (Inspección visual, no es profundo) EC= 15mm (La densidad es igual al material base)
3	4	IF, P	IF= 25mm (No acepta los criterios de aceptación de la norma) P = Alineados = 4.5mm (Norma acepta máx. 6mm de longitud alineamiento)	
4	4	P, HB, IP, High Low	P = Dos poros de 2mm y 1.5mm (Norma Permite ¼ del espesor T del material) HB = 25mm (Norma permite 4T para sumatoria de longitudes)	IP = 2.7mm (Norma acepta máx. 38mm) High Low = 3mm OK
5	5	IU, IC, CP, High Low	High Low = 6mm	IU = Visualmente no presenta profundidad IC = OK es menor a la densidad del material base

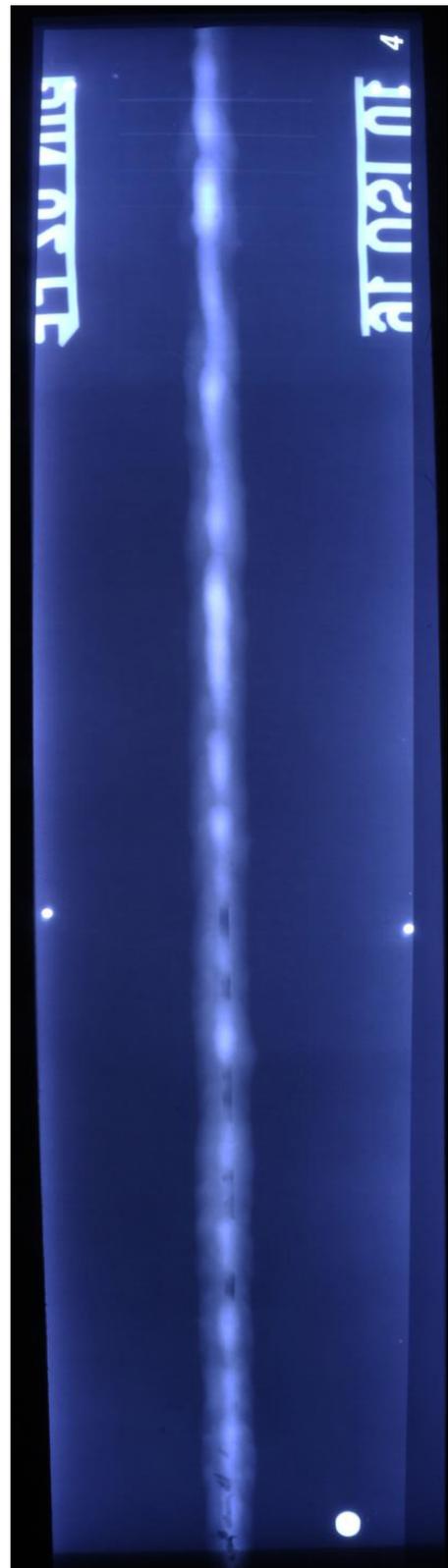
Fuente: Norma ISO 5817

El Método para el Uso de la Norma ISO 5817, básicamente se basa en el estudio de las 60 radiografías con discontinuidades en los cordones de soldadura.

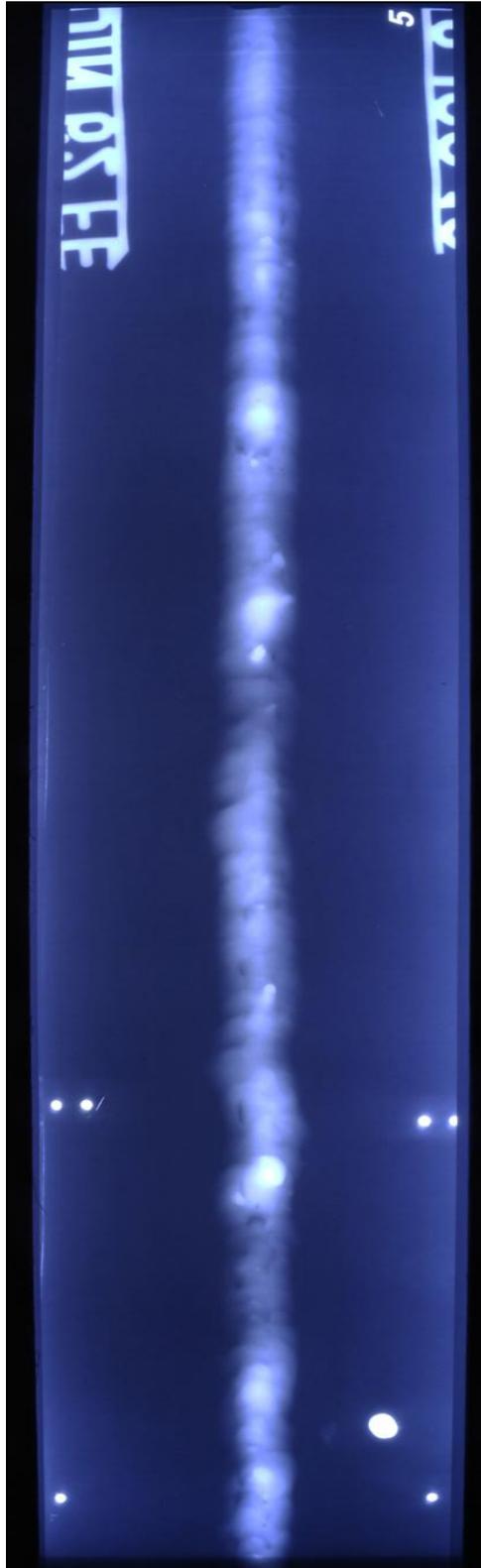
El entrenamiento del radiólogo consiste en primero por parte del Instructor identificar las discontinuidades que están presentes como se muestra en la tabla anterior, y el radiólogo con las discontinuidades ya representadas con sus símbolos debe encontrarlas en las radiografías que se muestran a continuación.



Fuente: Norma ISO 5817



Fuente: Norma ISO 5817



Fuente: Norma ISO 5817

Después de haber identificado, ubicado y medido las discontinuidades presentes en cada placa radiográfica, se procede a utilizar los Criterios de Aceptación/Rechazo de las Normas de Referencia correspondientes para evaluar e interpretar las discontinuidades y dar el veredicto de si constituyen o no defectos de soldadura.

API 650

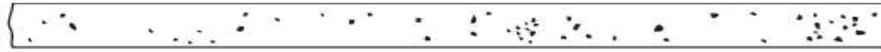
<p>t: Es el espesor nominal más delgado en la Junta Soldada Para Inspección en Juntas de Producción en tanques de almacenamiento de petróleo, separadores y Recipientes de Presión (Soldadura de Ranura en Juntas a Tope)</p>	
<p>CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/RECHAZO PARA RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL SEGÚN API 650 – 2000, Ver: ASME SECCION VIII DIVISION 1-2007, UW-51</p>	
<p>Fisuras, Falta de Fusión y Falta de Penetración No se Aceptan</p>	<p>Longitud: a) 6mm, para t hasta 19mm b) 1/3t, para t mayor a 19mm hasta 57mm c) 19mm, para t mayor a 57mm Agrupadas y Alineadas: Sumatoria de Longitudes hasta t en una Longitud de Referencia de 12t; excepto cuando la distancia entre 2 Indicaciones sucesivas exceda 6 veces el tamaño de la Indicación más grande</p> <p style="text-align: center;">Otras Indicaciones Lineales</p>
<p>Porosidad Interna y Otras indicaciones Redondeadas ASME VIII División 1, Apéndice 4 (Gráficas en Criterios de ASME B31.3) Máximo Tamaño Individual: 1/4 t o 4mm. Si entre 2 Poros existe una separación de 25mm o más pueden medir 1/3 t o 6mm. Aplica el que sea menor en ambos casos. Porosidad Alineada: Sumatoria de Diámetros de Poros en una Longitud Referencial de 12t, la sumatoria no debe superar t. Separación mínima entre Grupos = 3 veces (la Longitud del Grupo contiguo más grande) Porosidad Agrupada (Nido): Longitud máxima del grupo 25mm o 2t, Aplica el que sea menor. Donde exista más de 1 nido la Sumatoria de longitudes de nidos deberá ser máximo de 25mm, en una Longitud de Referencia de 150mm. Concentración de Poros: 12 Poros máximo = para t menor a 3mm en una Longitud de Referencia de 150mm y para t mayor o igual 3mm Consultar la Gráfica 4-3, 4-4, 4-5, 4-6</p>	

Fuente: Daniel Castro

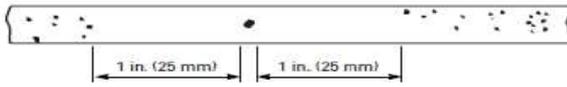
<p>** (Tw): Es el espesor nominal más delgado en la Junta Soldada)</p>		
<p>CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/RECHAZO PARA RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL SEGÚN ASME B31.3-2012, TABLA 341.3.2 (Para Inspección de Juntas Soldadas en Estaciones, Pozos y Refinerías)</p>		
<p>Figuras (A) Falta de Fusión (A) No se Aceptan</p>	<p>Inclusión de Escoria, Inclusión de Tungsteno, o Indicaciones Alargadas (G)</p>	<p>Concavidad Interna y Externa, Quemón (K) Ninguna Zona de la Soldadura debe ser más densa que el Material Base, es decir más oscura.</p>
<p>Falta de Penetración (B) Sumatoria de Longitud: Máximo 38mm, para una longitud de referencia de 150 mm</p>	<p>Longitud individual: $\leq 2T_w$ Ancho Individual: $\leq 3 \text{ mm}$ o $\frac{1}{4}T_w$, aplica el que sea menor. Sumatoria de Longitudes: $\leq 4T_w$ en una longitud de referencia de 150 mm.</p>	<p>Mordeduras (H) Profundidad: Deben ser marcadas las posiciones y evaluadas Visualmente para determinar su profundidad.</p>
<p>Porosidad Interna (E) ASME VIII División 1, Apéndice 4</p>		
<p>Para T_w menor o igual a 6mm Máximo Tamaño Individual: $\frac{1}{4} T_w$ o 1.5mm. Si entre 2 Poros existe una separación de 2.5mm o más pueden medir $1/3T_w$ o 2mm. Aplica el que sea menor en ambos casos.</p>		
<p>Porosidad Alineada (4 o más paralelas al eje de la soldadura): Sumatoria de Diámetros de Poros en una Longitud Referencial de $12T_w$, la sumatoria no debe superar T_w.</p>		
<p>Nido de Poros: Separación mínima entre Grupos = 3 veces la Longitud del Grupo; Longitud máxima del grupo 6mm.</p>		
<p>Para Concentración de Poros: 12 Poros máximo = para $T_w \leq 3\text{mm}$ en una Longitud de Referencia de 150mm. ($3 < T_w < 6\text{mm}$) Consultar la Gráfica 4-3</p>		
<p>Para T_w mayor a 6mm Máximo Tamaño Individual: $3/8T_w$ o 6mm. Si entre 2 Poros existe una separación de 2.5mm o más pueden medir $1/2T_w$ o 9mm. Aplica el que sea menor en ambos casos. 1.5mm para T_w mayor a 50mm.</p>		
<p>Porosidad Alineada (4 o más paralelas al eje de la soldadura): Sumatoria de Diámetros de Poros en una Longitud Referencial de $12T_w$, la sumatoria no debe superar $1.5T_w$.</p>		
<p>Nido de Poros: Separación mínima entre Grupos = 3 veces la Longitud del Grupo; Longitud máxima del grupo 6mm, para espesores menores a 19mm. Longitud máxima del grupo $1/2T_w$, para espesores entre a 19mm a 57mm.</p>		
<p>Para Concentración de Poros: Consultar Gráficas 4-4 hasta 4-6</p>		

Fuente: (ASME B31.3, 2012)

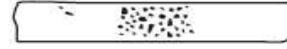
FIG. 4-3 Gráficos para espesores desde 3mm hasta 6mm



(a) Indicaciones redondeadas dispersas

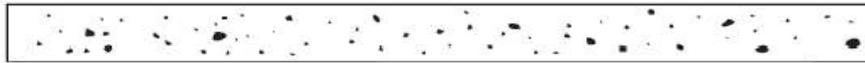


(b) Indicación Aislada

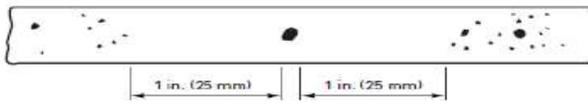


(c) Agrupada

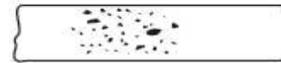
FIG. 4-4 Gráficos para espesores desde 6mm hasta 10mm



(a) Indicaciones redondeadas dispersas

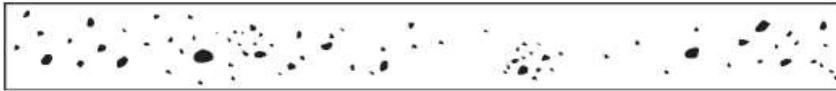


(b) Indicación Aislada



(c) Agrupada

FIG 4-5 Gráficas para espesores desde 10mm hasta 19mm:



(a) Indicaciones redondeadas dispersas



(b) Indicación Aislada

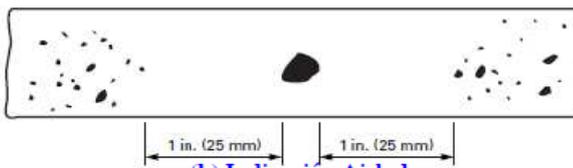


(c) Agrupada

FIG 4-6 Gráficas para espesores mayores a 19mm hasta 50mm:



(a) Indicaciones Redondeadas Dispersas



(b) Indicación Aislada



(c) Agrupada

ANEXO II

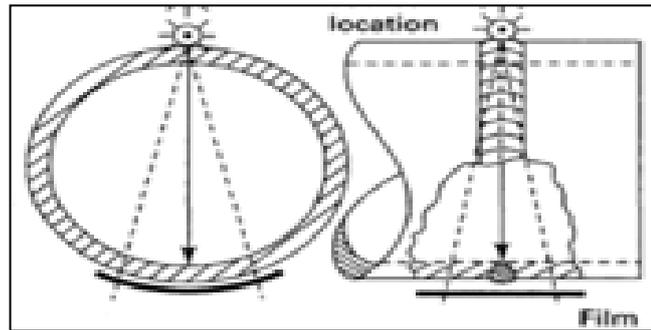
Se realizó la inspección de una junta soldada con proceso GTAW (Protección del arco 100% Argón, Electrodo de Aleación Tungsteno-Torio 2%, material de aporte varillas AWS ER70S-6 diámetro 2.4mm) la primera y segunda pasada y las restantes relleno y presentación con SMAW (Electrodo revestido AWS 7018, diámetro 2.4mm). Junta a tope soldadura de ranura en V Bisel 30°, con penetración total y directa, talón 1mm, separación de bordes en la raíz 4mm, controlada mediante gammagrafía, ejecutada en Coca-Ecuador en el Bloque 7 de Petroamazonas EP, para el proyecto Bayoneta Payamino 09. Las especificaciones de la tubería son: diámetro nominal 4 pulg., cedula 80, espesor 8.56 mm., material ASTM A-106 Gr. B de acuerdo a la Tabla 11 de la pág. 42.

Tuberías de 4 pulg. Sch. 80 inspeccionadas con gammagrafía.



De acuerdo a la pág. 72: se hizo la inspección con 3 tomas o 3 placas radiográficas ya que la tubería es de un diámetro menor a 12 pulg, con la técnica doble pared irradiada y una sola imagen obtenida como se indica en la pág. 55. Como se puede ver a continuación:

Ubicación de la Fuente radiactiva Ir-192 y película AGFA Structurix D7 en la tubería de 4 pulg, cedula 80.



Cálculo del Tiempo de Exposición:

Para la fuente Radiactiva Ir-192 con el número de serie 13112G, la actividad para el día 10 de marzo del 2015 que se realizó la inspección fue igual a 27.0 Ci, de acuerdo al Anexo 1B. Se calculó el tiempo de exposición de acuerdo a la ecuación 2-2 de la pág. 60.

$$t = \frac{4.1 * 1.2 * (dfp)^2 * 2^{\frac{e}{13.5}}}{A_a}$$

$$t = \frac{4.1 * 1.2 * (4 \text{ pulg})^2 * 2^{\frac{17.12mm}{13.5}}}{27.0 \text{ Ci}}$$

$$t = 7.02 \text{ seg.}$$

Cálculo de la Penumbra Geométrica:

La penumbra geométrica se calculó de acuerdo a la ecuación 2-1 de la pág. 49. Se puede observar que el resultado es menor que el valor máximo permitido, como se indica en la Tabla 17.

$$U_g = \frac{Ft}{d_0}$$

$$U_g = \frac{(3mm) * (8.56mm)}{114.3mm}$$

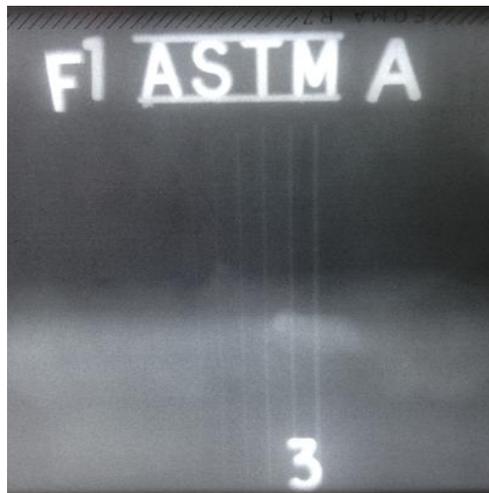
$$U_g = 0.22 \text{ mm}$$

El resultado final de las 3 tomas realizadas utilizando los parámetros del procedimiento escrito descritos en el capítulo II es el siguiente:

Radiografía toma 1 de la Junta 11 de 0" a 5"



Vista del hilo sensible 6 del IQI ASTM A en la toma 1



Radiografía toma 2 de la Junta 11 de 5" a 10"



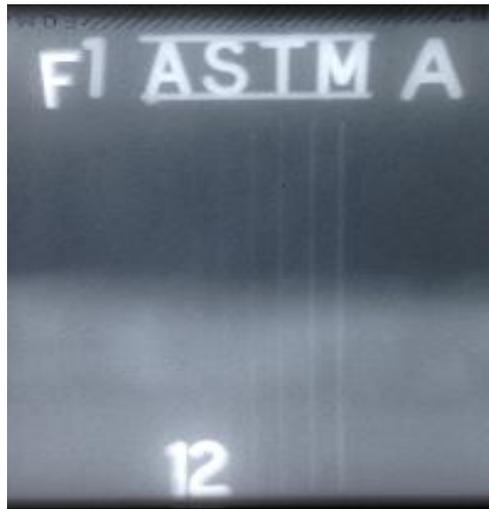
Vista del hilo sensible 6 del IQI ASTM A en la toma 2



Radiografía toma 3 de la Junta 11 de 10" a 0"



Vista del hilo sensible 6 del IQI ASTM A en la toma 3



Fuente: Daniel Castro.

En las 3 placas radiográficas se puede observar todos los indicadores de calidad (IQI) y el hilo sensible que en el caso de espesores de hasta 12.7 mm es el número 6, de acuerdo a la Tabla 23 de la pág. 69. Las densidades medidas en las placas fueron: 3.00, 2.77, 2.45, respectivamente como se muestra en el Anexo 1H y el rango de densidades es el permitido por la norma como se puede ver en la pág. 67.

Por lo tanto, el procedimiento escrito para el control de calidad de soldaduras en la construcción de estaciones de bombeo con Gammagrafía se ha calificado, acorde al Código ASME V, Artículo 2, T-282.1 como se muestra en la pág. 41.

ANEXO 1J

Variables Esenciales de procedimiento de Tintas Penetrantes.

2011a SECTION V

ARTICLE 6

TABLE T-621
REQUIREMENTS OF A LIQUID PENETRANT EXAMINATION PROCEDURE

Requirement	Essential Variable	Nonessential Variable
Identification of and any change in type or family group of penetrant materials including developers, emulsifiers, etc.	X	...
Surface preparation (finishing and cleaning, including type of cleaning solvent)	X	...
Method of applying penetrant	X	...
Method of removing excess surface penetrant	X	...
Hydrophilic or lipophilic emulsifier concentration and dwell time in dip tanks and agitation time for hydrophilic emulsifiers	X	...
Hydrophilic emulsifier concentration in spray applications	X	...
Method of applying developer	X	...
Minimum and maximum time periods between steps and drying aids	X	...
Decrease in penetrant dwell time	X	...
Increase in developer dwell time (Interpretation Time)	X	...
Minimum light intensity	X	...
Surface temperature outside 40°F to 125°F (5°C to 52°C) or as previously qualified	X	...
Performance demonstration, when required	X	...
Personnel qualification requirements	...	X
Materials, shapes, or sizes to be examined and the extent of examination	...	X
Post-examination cleaning technique	...	X

Fuente: (ASME V Boiler and Pressure Vessel Code, 2010, pág. 129)

ANEXO 1K

Datos del fabricante Met-L-Check para la Tinta Penetrante Visible VP-30



Met-L-Check®
PENETRANT PROFESSOR APPROVED

PRODUCT DATA SHEET
VP-30
Visible Penetrant

2
REV



01000

Typical Physical Properties	Product Availability
<p>Form: red liquid Density: 801 g/L Flash Point: >62.2°C (>144°F) Viscosity: 2.4 mm²/s Water Tolerance: > 5% Corrosion of aluminum: none Corrosion of carbon steel: none Corrosion of magnesium: none Corrosion of stainless steel: none Corrosion of titanium: none Chloride content: < 50 ppm (< 0.005%) Fluoride content: < 50 ppm (< 0.005%) Sulfur content: < 150 ppm (< 0.015%) Mercury: none VOC's: 533 g/L Ozone layer depleting substances: none PCB's: none</p>	<p>12 x 12oz (300ml) vol. aerosol (net wt 230g or 8oz) 12 x 16oz (400ml) vol. aerosol (net wt 310g or 10.9oz) 1 gallon (3.7L) metal can 5 gallon (18.9L) metal pail 55 gallon (208L) metal drum</p> <p style="text-align: center;">NSN #'s</p> <p>1 gallon 6850-01-267-7989 5 gallon 6850-01-223-2867</p> <p style="text-align: center;">Specifications</p> <p>AMS-2644E ASME B & PV code 07 sec V ASTM E-165 ASTM E-1417 Dassault IQ-1-0-1-20 ISO-3452-2005 NAVSEA-T9074-AS-GIB-010/271 PMUC RCC-M rev 2000</p>

The warranty shelf life of the product is 5 years from date of batch approval.

Transport: DOT: Bulk - Stain, not regulated in containers less than 119 gallons (450L).
DOT: Aerosol - Consumer Commodity ORM-D
IATA: Aerosol - Aerosol flammable, Flammable gas, class 2.1, UN 1950

Hazards: Combustible liquid & vapor See MSDS for detailed health, safety, and disposal information.
Classification: NFPA Health-1, Flammability-2, Reactivity-0.
EU- Xn: R48/20/65, R66; Xn, R22; Xi, R36/38, R53; Xi, Carc. Cat 3 R40
WHMIS (Canada) B3, D2B (bulk) A, B5, D2B (aerosol)
Human health hazards: Eye irritant. Vapors may cause drowsiness or dizziness.

First aid measures:
Eyes: Check for contact lenses and remove. Flush eyes with clean water holding eyelids open. Seek medical attention.
Skin: Remove contaminated clothing. Wash exposed area with soap and water. Apply moisturizing lotion. Launder clothing and clean shoes.
Swallowing: Do not induce vomiting. Small amounts are not expected to cause significant harm, call a physician.
Inhalation: Remove to fresh air.

Met-L-Check Company, 1639 Euclid Street, Santa Monica, California, 90404, U.S.A.
Phone: 310-450-1111, Fax: 310-452-4046, Email: info@met-l-check.com, Web: www.met-l-check.com

Fuente: (Met-L-Check, 2009)

ANEXO 1L

Método para realizar el control de Removilidad de Tintas Penetrantes y aprobar el ensayo a temperaturas no estándares a las del Código ASME sección V.

ARTICLE 6

2011a SECTION V

the test results obtained in accordance with II-640. These records shall be maintained as required by the referencing Code Section.

APPENDIX III — QUALIFICATION TECHNIQUES FOR EXAMINATIONS AT NONSTANDARD TEMPERATURES

III-610 SCOPE

When a liquid penetrant examination cannot be conducted within the standard temperature range of 40°F to 125°F (5°C to 52°C), the temperature of the examination shall be qualified in accordance with this Appendix.

III-630 MATERIALS

A liquid penetrant comparator block shall be made as follows. The liquid penetrant comparator blocks shall be made of aluminum, ASTM B 209, Type 2024, $\frac{3}{8}$ in. (9.5 mm) thick, and should have approximate face dimensions of 2 in. \times 3 in. (50 mm \times 75 mm). At the center of each face, an area approximately 1 in. (25 mm) in diameter shall be marked with a 950°F (510°C) temperature-indicating crayon or paint. The marked area shall be heated with a blowtorch, a Bunsen burner, or similar device to a temperature between 950°F (510°C) and 975°F (524°C). The specimen shall then be immediately quenched in cold water, which produces a network of fine cracks on each face.

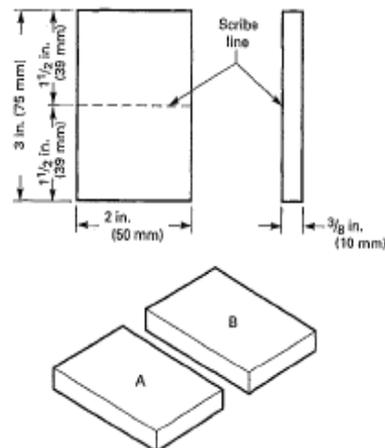
The block shall then be dried by heating to approximately 300°F (149°C). After cooling, the block shall be cut in half. One-half of the specimen shall be designated block "A" and the other block "B" for identification in subsequent processing. Figure III-630 illustrates the comparator blocks "A" and "B." As an alternate to cutting the block in half to make blocks "A" and "B," separate blocks 2 in. \times 3 in. (50 mm \times 75 mm) can be made using the heating and quenching technique as described above. Two comparator blocks with closely matched crack patterns may be used. The blocks shall be marked "A" and "B."

III-640 REQUIREMENTS

III-641 Comparator Application

III-641.1 Temperature Less Than 40°F (5°C). If it is desired to qualify a liquid penetrant examination procedure at a temperature of less than 40°F (5°C), the proposed procedure shall be applied to block "B" after the block and all materials have been cooled and held at the proposed examination temperature until the comparison is completed. A standard procedure which has previously been demonstrated as suitable for use shall be applied to block

FIG. III-630 LIQUID PENETRANT COMPARATOR
(NOTE: Dimensions given are for guidance only and are not critical.)



"A" in the 40°F to 125°F (5°C to 52°C) temperature range. The indications of cracks shall be compared between blocks "A" and "B." If the indications obtained under the proposed conditions on block "B" are essentially the same as obtained on block "A" during examination at 40°F to 125°F (5°C to 52°C), the proposed procedure shall be considered qualified for use. A procedure qualified at a temperature lower than 40°F (5°C) shall be qualified from that temperature to 40°F (5°C).

III-641.2 Temperature Greater Than 125°F (52°C). If the proposed temperature for the examination is above 125°F (52°C), block "B" shall be held at this temperature throughout the examination. The indications of cracks shall be compared as described in III-641.1 while block "B" is at the proposed temperature and block "A" is at the 40°F to 125°F (5°C to 52°C) temperature range.

To qualify a procedure for temperatures above 125°F (52°C), the upper and lower temperature limits shall be established and the procedure qualified at these temperatures. [As an example, to qualify a procedure for the temperature range 126°F (52°C) to 200°F (93°C), the capability of a penetrant to reveal indications on the comparator shall be demonstrated at both temperatures.]

III-641.3 Alternate Techniques for Color Contrast Penetrants. As an alternate to the requirements of III-641.1 and III-641.2, when using color contrast penetrants, it is

ANEXO 1M

Reportes diarios utilizados por la empresa Radin para realizar la inspección con Tintas Penetrantes.

		RADINCEVALL CIA. LTDA. Av. Lola Quintana N8 -136 (Entrada a Conocoto por la Autopista General Rumiñahui) Quito-Ecuador E-mail: radin@radin.com.ec Telefax: 2345 969		Celular: 09 9833501																																											
		REPORTE DE INSPECCIÓN DE SOLDADURA MEDIANTE TINTAS PENETRANTES				N° 01PT																																									
PROCEDIMIENTO INSPECCIÓN TINTAS PENETRANTES																																															
CLIENTE: PETROAMAZONAS-EP		PROYECTO: EUSAVOS NO DESTRUCTIVOS Calificación Procedimiento escrito		MUESTREO (%) 100%																																											
NORMA DE REFERENCIA ASME B31.3		MATERIAL BASE ASTM A 106 Gr. B / A 105		FECHA 10/04/15 LUGAR QUITO																																											
TINTA PENETRANTE MET-L-CHEK		Espec. VP-30 Tipo. II	REVELADOR MET-L-CHEK		Espec. D-70 Tipo. II																																										
TIEMPO PARA PENETRACIÓN TINTA 10 Min.		TIEMPO PARA REVELADO 10 Min.																																													
IDENTIFICACIÓN JUNTA SOLDADA KIT EDYACIONAL DE END		DIÁMETRO (pulgadas)	LONGITUD SOLDADURA ENSAYADA (m)	APROBADO SI NO																																											
J-1 PT (fisura)			0,075 m	[C] en la capa de presentación soldadura; Ubicada en un Bisel de la soldadura [C] = 0,025 m																																											
 <table border="1"> <tr> <td colspan="2">IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES</td> <td colspan="2">NÚMERO DE JUNTAS ENSAYADAS</td> <td colspan="2">01</td> </tr> <tr> <td>CP</td> <td>NIDO DE POROS</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>P</td> <td>POROSIDAD</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>FISURA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>EU</td> <td>MORDEDURA EN LA PRESENTACIÓN</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>EC</td> <td>FALTA DE MATERIAL PRESENTACIÓN</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>ACUMULACIÓN DE DEFECTOS</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> 						IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES		NÚMERO DE JUNTAS ENSAYADAS		01		CP	NIDO DE POROS					P	POROSIDAD					C	FISURA					EU	MORDEDURA EN LA PRESENTACIÓN					EC	FALTA DE MATERIAL PRESENTACIÓN					A	ACUMULACIÓN DE DEFECTOS				
IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES		NÚMERO DE JUNTAS ENSAYADAS		01																																											
CP	NIDO DE POROS																																														
P	POROSIDAD																																														
C	FISURA																																														
EU	MORDEDURA EN LA PRESENTACIÓN																																														
EC	FALTA DE MATERIAL PRESENTACIÓN																																														
A	ACUMULACIÓN DE DEFECTOS																																														
Representante del cliente  14/04/2015 Gabriel Herrera		Inspector ASNT NIVEL II  Ing. Oscar Cevallos																																													
Página 1 de 1		Original Copias: Amarilla, Verde, Celeste, Rosada																																													

Fuente: Daniel Castro.

ANEXO 1N

Se realizó la inspección con Tintas Penetrantes en una junta soldada entre placas, con proceso de soldadura SMAW (Electrodo revestido AWS 7018, diámetro 2.4mm) todas las pasadas en una junta a tope soldadura de ranura en V Bisel 30°, con penetración total, soldada por ambos lados, en posición plana, talón 2mm, separación de bordes en la raíz 2mm, ejecutada en Quito-Ecuador.

Las especificaciones del material son: Longitud 150mm, ancho 75mm, espesor 10mm., material ASTM A-36.

De acuerdo a la pág. 88: el tiempo de preparación de la superficie del cordón de soldadura tuvo una duración de 3.57 min, es decir no se sobrepasó el tiempo máximo.

Superficie limpia de la Placa de Acero A-36



Fuente: Daniel Castro.

La temperatura de la superficie al momento del ensayo fue de 22.8 °C, por lo tanto se encuentra acorde a los parámetros establecidos en la pág. 80.

Temperatura de la superficie antes de aplicar el ensayo.



Fuente: Daniel Castro.

De acuerdo a la pág. 94: la intensidad de luz no debería ser menor a 1000 lux, por lo tanto el ensayo se realizó en condiciones ideales con una intensidad de luz de 1197 lux.

Medición de la Intensidad de luz antes de comenzar la Inspección



Fuente: Daniel Castro.

Se aplicó la Tinta Penetrante Visible acorde con los parámetros descritos en la pág. 79, con un tiempo de permanencia de 10 minutos, se obtuvo una capa fina y uniforme.

Cordón de Soldadura con Tinta Penetrante.



Fuente: Daniel Castro.

De acuerdo a la Tabla 26 de la pág. 82, el tiempo de permanencia no puede ser mayor a 10 minutos. Se aplicó un tiempo de remoción del exceso de Tinta Penetrante de 0.40 segundos, como se muestra en la pág. 89.

Posteriormente se aplicó una fina capa de revelador sobre la soldadura y se esperó 10 minutos para realizar la interpretación.

Placa con Fisura en la capa de presentación de la soldadura



Fuente: Daniel Castro.

Después de un tiempo de 11.47 minutos de la aplicación del revelador, el ensayo sobre el la soldadura ha localizado una fisura de 25mm de longitud y su indicación de 35mm de longitud, localizada en uno de los biseles en la capa de presentación de la soldadura. De acuerdo a la Tabla 27 de la pág. 93, en los criterios de aceptación/rechazo de la Norma ASME B31.3, no se aceptan fisuras de ningún tipo o tamaño. Por tal motivo la junta soldada deberá ser reparada y posteriormente se tendrá que volver a repetir el ensayo.

Por lo tanto, el procedimiento escrito para el control de calidad de soldaduras en la construcción de estaciones de bombeo con Tintas Penetrante se ha calificado, acorde al Código ASME V, Artículo 6, T-621.1 como se muestra en la pág. 76.