



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERIA MECANICA

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

**“Curso de Ensayos No Destructivos, Aplicado a Juntas Soldadas en
Facilidades Petroleras, Basado en la Norma ANSI/ASNT CP-105-2011”**

AUTOR: GABRIEL OMAR HERRERA SOLÓRZANO

DIRECTOR: ING. PATRICIO QUEZADA

CODIRECTOR: ING. EDWIN OCAÑA

SANGOLQUI, DICIEMBRE 2014

CERTIFICACION DE LA ELABORACION DEL PROYECTO

El proyecto “**Curso de Ensayos No Destructivos, Aplicado a Juntas Soldadas en Facilidades Petroleras, Basado en la Norma ANSI/ASNT CP-105-2011**” fue realizado en su totalidad por el Sr. Herrera Solórzano Gabriel Omar, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Sr. Ing. Patricio Quezada

Director

Sr. Ing. Edwin Ocaña

Codirector

Sangolquí, 10 de Diciembre del 2014

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Herrera Solórzano Gabriel Omar.

Declaro que:

La tesis proyecto de grado titulado “**Curso de Ensayos No Destructivos, Aplicado a Juntas Soldadas en Facilidades Petroleras, Basado en la Norma ANSI/ASNT CP-105-2011**”. Ha sido desarrollado con base a una investigación responsable, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en los párrafos correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra auditoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/ proyecto de grado en mención.

Sr. Gabriel Omar Herrera Solórzano

CC: 1715429492

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA**

AUTORIZACION

YO, GABRIEL OMAR HERRERA SOLÓRZANO

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la institución del trabajo **“Curso de Ensayos No Destructivos, Aplicado a Juntas Soldadas en Facilidades Petroleras, Basado en la Norma ASNI/ASNT CP1052011”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y auditoria.

Sangolquí, Diciembre 2014

GABRIEL OMAR HERRERA SOLÓRZANO

LEGALIZACION DEL PROYECTO

“Curso de Ensayos No Destructivos, Aplicado a Juntas Soldadas en Facilidades Petroleras, Basado en la Norma ANSI/ASNT CP-105-2011”

Elaborado por:

HERRERA SOLÓRZANO GABRIEL OMAR

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ING. JOSÉ PÉREZ

DIRECTOR DE LA CARRERA

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis Padres, Pedro Enrique Herrera Ordoñez y Emma Beatriz Solórzano Balarezo, quienes han sido un gran modelo a seguir con excelentes valores humanos. Me han inculcado excelente disciplina para desarrollar mis metas, me han enseñado el valor e importancia de los estudios, he aprendido de ellos a respetar mis horarios de trabajo y sobre todo han estado siempre para mí brindándome su apoyo, amor incondicional y todo lo necesario para culminar mis estudios; logrando así formar hijo con muy grandes valores y cualidades humanas, listo para afrontar todos los retos que se presenten en la vida futura.

Para mis hermanos, Fabricio y Paola, quienes siempre han estado presentes en mi vida universitaria, dándome aliento para conseguir todas mis metas planteadas y sin duda brindándome todo su amor y apoyo, muchas gracias por todas sus palabras.

Finalmente dedico con mucho amor este proyecto a mis pequeñas sobrinas y sobrino, Melina, Romina, Doménica y Oscar, quienes me han dado mucho amor, colmándome de felicidad y bendiciones, desde su llegada.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme una vida saludable, llena de experiencias muy valiosas, las cuales me han llevado a terminar mi carrera universitaria y cumplir todos mis objetivos.

A mis Familia por darme todo su apoyo incondicional y por siempre estar para mí brindándome todo su amor.

Un agradecimiento a la Compañía Radin por abrirme las puertas y permitirme conocer el mundo de los ensayos no destructivos aplicados a inspección de materiales.

A mi Director el Sr. Ing. Patricio Quezada y Codirector el Sr. Ing. Edwin Ocaña, por brindarme una guía profesional para el desarrollo del proyecto.

Finalmente a todos mis amigos y personas que han mostrado interés en el desarrollo de mi vida universitaria y me han brindado consejos u otras palabras de aliento.

Gracias a todos.

INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACION DE LA ELABORACION DEL PROYECTO.....	iii
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	iv
LEGALIZACION DEL PROYECTO	v
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
INDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xx
RESUMEN.....	xxi
CAPITULO I.....	1
GENERALIDADES	1
1.1 Descripción de la Empresa	1
1.2 Definición del Problema.....	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Alcance.....	5
1.5 Justificación	5
CAPITULO II.....	6
INTRODUCCION A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	6
2.1 Introducción	6
2.2 Propósito, Aplicación, Clasificación y Objetivo	6
2.3 Descripción de los Métodos de Ensayos No Destructivos.....	8
2.3.1 Ensayo Visual (VT)	8
2.3.2 Ensayo de Líquidos Penetrantes (PT)	9
2.3.3 Ensayo de Partículas Magnéticas (MT).....	11
2.3.4 Ensayo de Corrientes Inducidas (ET)	12
2.3.5 Ensayo de Ultrasonidos (UT)	14
2.3.6 Ensayo de Radiografía Industrial (RT).....	15
2.3.7 Ensayo de Fugas (LT)	17
2.3.8 Ensayo de Emisiones Acústicas (AET)	17
2.4 Calificación y Certificación del Personal.....	19
CAPITULO III.....	23
CURSO DE ENSAYO RADIOGRAFICO.....	23

3.1 Conceptos Básicos de Radiología.....	23
3.1.1 Definición de Radiografía Industrial	23
3.1.2 Materiales Radiactivos	24
3.1.3 Tipos de Radiación	28
3.1.4 Interacción de la Radiación con la Materia:	31
3.1.5 Fuentes Radiactivas y Equipo de Manejo	38
3.1.6 Técnicas de Exposición.....	49
3.1.7 Principios de Seguridad Radiológica	53
3.1.8 Organismo Regulador en Ecuador	65
3.2 Película Radiográfica	69
3.2.1 Principios de la Película Radiográfica.....	69
3.2.2 Procesamiento de Película	76
3.2.3 Calidad de la Imagen Radiográfica	83
3.3 Procesos de Soldadura Utilizados en Facilidades Petroleras de Ecuador	89
3.3.1 Soldadura de Arco con Electrodo Revestido (SMAW)	89
3.3.2 Soldadura de Arco con Núcleo Fundente (FCAW)	96
3.3.3 Soldadura de Arco Sumergido (SAW)	103
3.3.4 Soldadura de Arco de Tungsteno Protegida con Gas (GTAW)	110
3.4 Defectología en Depósitos de Soldadura	119
3.4.1 Concepto de Discontinuidad, Indicación y Defecto	119
3.4.2 Detección de Discontinuidades típicas en los Depósitos de Soldadura.....	120
3.5 Evaluación e Interpretación de Soldaduras Mediante Radiografía	135
3.5.1 Normas aplicadas en Facilidades Petroleras Ecuatorianas, Referentes al Uso de Ensayos No Destructivos	135
3.5.2 Resumen de Criterios de Aceptación/Rechazo Aplicados en Facilidades Petroleras Ecuatorianas para Evaluar el Resultado de las Radiografías Generadas por el Ensayo de Gammagrafía	142
3.5.3 Radiografías de Referencia en Depósitos de Soldadura.....	142
3.5.4 Reportes Generados para Constatar la Inspección.....	143
3.5.5 Preguntas para Evaluación Teórica sobre RT.....	144
CAPITULO IV	145
CURSO DE ENSAYO DE ULTRASONIDOS	145
4.1. Introducción	145
4.1.1 Definición de Ensayo de Ultrasonidos	145
4.1.2 Principios Básicos de la Acústica	146

4.2 Equipo de Ultrasonidos.....	166
4.2.1 Instrumentación Pulso-Eco.....	166
Figura 125. Instrumentación básica pulso-eco.....	167
4.2.2 Transductores.....	170
4.2.3 Calibración.....	175
4.3 Métodos Básicos de Ultrasonidos.....	180
4.3.1 Escaneo por Contacto Usando Ondas Longitudinales.....	180
4.3.2 Escaneo por Contacto Usando Ondas Transversales y Haz Angular.....	184
4.3.3 Técnica de Distancia de la Trayectoria del Haz.....	185
4.3.4 Técnica de Transductores Múltiples.....	187
4.3.5 Técnica de Inmersión.....	188
4.4 Evaluación e Interpretación de Soldaduras Mediante Ultrasonidos.....	189
4.4.1 Detección de Discontinuidades Típicas en los Depósitos de Soldadura.....	189
4.4.2 Resumen de Criterios de Aceptación/Rechazo Aplicados en Facilidades Petroleras Ecuatorianas para Evaluar el Resultado de los Escaneos Generados por el Ensayo de Ultrasonidos.....	193
4.4.3 Escaneos de Referencia en Depósitos de Soldadura.....	194
4.4.4 Reportes Generados para Constatar la Inspección.....	194
4.4.5 Preguntas para Evaluación Teórica sobre UT.....	195
CAPITULO V.....	196
CURSO DE ENSAYO DE LIQUIDOS PENETRANTES.....	196
5.1 Definición de Ensayo de Líquidos Penetrantes.....	196
5.2 Principios Básicos del Ensayo de Líquidos Penetrantes.....	197
5.2.1 Proceso Básico del Ensayo de Líquidos Penetrantes.....	197
5.2.2 Clasificación de los Líquidos Penetrantes.....	198
5.2.3 Emulsionantes y Removedores.....	199
5.2.4 Tipos de Reveladores.....	199
5.3 Propiedades de los Líquidos Penetrantes, Emulsificadores, Removedores, y Reveladores.....	200
5.3.1 Líquidos Penetrantes.....	200
5.3.2 Emulsificadores ó Removedores.....	203
5.3.3 Reveladores.....	204
5.4 Mecanismo de Penetración, Emulsificación y de Revelación.....	204
5.4.1 Penetración.....	204
5.4.2 Emulsificación.....	206

5.4.3 Revelación.....	208
5.5 Procesos del Ensayo de Líquidos Penetrantes	208
5.5.1 Líquidos Penetrantes Removibles con Agua.....	209
5.5.2 Líquidos Penetrantes Pos-Emulsionables Lipófilos.....	210
5.5.3 Líquidos Penetrantes Pos-Emulsionables Hidrófilos.....	211
5.5.4 Líquidos Penetrantes Removibles con Solventes.....	212
5.6 Evaluación e Interpretación de Soldaduras Mediante Líquidos Penetrantes	213
5.6.1 Detección de Discontinuidades Típicas en los Depósitos de Soldadura Mediante Líquidos Penetrantes.....	213
5.6.2 Resumen de Criterios de Aceptación/Rechazo Aplicados en Facilidades Petroleras Ecuatorianas para Evaluar el Resultado de las Indicaciones Generadas por el Ensayo de Líquidos Penetrantes.....	216
5.6.3 Fotos con Indicaciones de Referencia en Depósitos de Soldadura.....	217
5.6.4 Reportes Generados para Constatar la Inspección.....	218
3.6.5 Preguntas para Evaluación Teórica sobre PT	218
CAPITULO VI	219
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	219
6.1 Conclusiones.....	219
6.2 Recomendaciones.....	220
BIBLIOGRAFÍA.....	221

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ensayo visual: con galgas (izquierda) y boroscopio (derecha)	9
Figura 2. Ensayo de líquidos penetrantes	10
Figura 3. Detección de discontinuidades mediante líquidos penetrantes	10
Figura 4. Ensayo de partículas magnéticas	12
Figura 5. Detección de discontinuidades mediante partículas magnéticas	12
Figura 6. Ensayo de corrientes inducidas	13
Figura 7. Detección de discontinuidades mediante corrientes inducidas	14
Figura 8. Ensayo de ultrasonidos convencionales.....	14
Figura 9. Detección de discontinuidades mediante ultrasonidos	15
Figura 10. Ensayo de radiografía	16
Figura 11. Detección de discontinuidades mediante radiografía.....	16
Figura 12. Detección de discontinuidades mediante el ensayo de fugas	17
Figura 13. Ensayo de emisiones acústicas en el cual ocho sensores permiten localizar la propagación de la fisura	18
Figura 14. Detección de discontinuidades mediante emisiones acústicas.....	19
Figura 15. Norma SNT-TC-1A y certificación NDT nivel III	20
Figura 16. Norma ANSI/ASNT CP-189.....	20
Figura 17. Norma ACCP y certificación ACCP nivel II	21
Figura 18. Norma 9712:2012 y certificación ISO 9712:2012 nivel II.....	22
Figura 19. Radiactividad vs tiempo	28
Figura 20. Ión (se muestra un electrón desplazado y el espacio que se genera)	32
Figura 21. Efecto Fotoeléctrico (fotón incidente expulsa un electrón del orbital)	33
Figura 22. Dispersión Compton (fotón incidente expulsa un electrón y genera fotón de baja energía)	34
Figura 23. Producción de pares (electrón y positrón de un fotón incidente)	34
Figura 24. Ley del inverso cuadrado.....	36
Figura 25. Desintegración del cobalto-60, con vida media de 5.27 años	39
Figura 26. Desintegración del cesio-137, con vida media de 31 años	40
Figura 27. Esquema de desintegración del iridio-192. Los números en las flechas son números de rayos gamma por 100 desintegraciones.....	41
Figura 28. (a) diagrama de encapsulación doble, (b) diagrama del pigtail, (c) cables de manejo y pigtails fabricados por diferentes compañías, (d) celda caliente	43

Figura 29. Equipo de exposición ANSI I junto con la manivela y el tubo guía	44
Figura 30. Equipo de exposición ANSI I, (a) posición de blindaje, (b) fuente en tránsito, (c) posición de exposición	44
Figura 31. Equipo de exposición ANSI I, (a) posición de blindaje, (b) fuente en tránsito, (c) posición de exposición	45
Figura 32. (a) Diagrama de colimador, (b) diferentes tipos de colimadores.....	47
Figura 33. Equipos de exposición para cobalto-60.....	47
Figura 34. (a) Posición de blindaje, (b) posición de exposición, (c) equipo de exposición ANSI II.....	48
Figura 35. (a) Contenedor de fuente nueva, (b) intercambio de fuentes, (c) esquema del cambio de fuentes	49
Figura 36. Arreglos posibles al aplicar técnica de pared simple.....	50
Figura 37. Técnica de pared doble – visualización de pared simple	51
Figura 38. Técnica de pared doble – visualización de pared doble.....	52
Figura 39. Técnica de pared doble – visualización de pared doble (alternativa).....	53
Figura 40. “Tasa de dosis” vs “distancia”, usando una fuente de Iridio-192 con 3TBq (81 mCi).....	57
Figura 41. (a) “Tasa de dosis” vs “distancia”, usando una fuente de Iridio-192 con 37GBq (1 Ci), (b) misma gráfica en escala logarítmica.	59
Figura 42. Gráficas de atenuación para rayos gamma (a) plomo), (b) acero.....	60
Figura 43. Varios modelos de medidores de radiación, (a) geiger-mueller, (b) medidor con detector externo, (c) medidor con alarma automática, (d) medidor con detector externo, (e) cámara de ionización.....	61
Figura 44. (a) Visión interior de un dosímetro tipo lápiz, (b) dosímetro tipo lápiz.....	63
Figura 45. Dosímetro de película.....	64
Figura 46. Dosímetro TLD	64
Figura 47. Alarma de tasa de dosis.....	65
Figura 48. Principios geométricos de la formación de sombras: (a) planos del objeto y la película perpendicular a los rayos gamma desde la fuente pequeña, (b) perpendicular – fuente pequeña más cerca al objeto, (c) perpendicular - fuente pequeña más lejos del objeto, (d) perpendicular - fuente más grande, (e) oblicuo – planos paralelos del objeto y la película, fuente pequeña, (f) oblicuo - planos del objeto y película no paralelos, fuente pequeña.....	71
Figura 49. Umbra geométrica.....	72

Figura 50. Construcción geométrica para determinar la penumbra geométrica (dónde la fuente es más pequeña que el objeto).....	73
Figura 51. Gráfico que relaciona la penumbra con el espesor del espécimen, para una fuente de 5 mm (0.2 in) de tamaño.....	74
Figura 52. Curvas características de tres tipos de película que relacionan la “exposición vs “densidad fotográfica resultante”	76
Figura 53. Esquema de laboratorio para revelado de película radiográfica	78
Figura 54. Marcas generadas en la película por estática: (a) mancha, (b) corona, (c) árbol.....	80
Figura 55. Marcas generadas en la película por no agitar la solución	82
Figura 56. IQIs tipo: (a) alambre, (b) agujero	83
Figura 57. Penetrámetros tipo agujero: (a) rectangular, (b) disco.....	84
Figura 58. Identificación del material del IQI tipo agujero.....	85
Figura 59. Identificación del material del IQI tipo agujero circular.....	86
Figura 60. IQI tipo alambre: ASTM estándar E747.....	87
Figura 61. Soldadura por arco con electrodo revestido	89
Figura 62. Diagrama del proceso (SMAW)	89
Figura 63. Capacidad de la posición de soldadura (SMAW)	90
Figura 64. Rango de espesor de metal base (SMAW).....	91
Figura 65. Diagrama de circuito (SMAW).....	92
Figura 66. Equipo requerido para operar (SMAW)	92
Figura 67. Electrodo recubiertos (SMAW).....	93
Figura 68. Sistema de clasificación AWS (SMAW).....	94
Figura 69. Guía de evaluación disponible para seleccionar electrodos de acero suave y de baja aleación.....	95
Figura 70. Tasas de deposición para varios electrodos	96
Figura 71. Soldadura de arco con núcleo fundente.....	96
Figura 72. Diagrama del proceso (FCAW).....	97
Figura 73. Rango de espesor del metal base (FCAW)	99
Figura 74. Diagrama del circuito (FCAW)	100
Figura 75. Tasa de deposición para electrodos de acero con núcleo de fundente	102
Figura 76. Soldadura de arco sumergido	103
Figura 77. Diagrama del proceso (SAW).....	104
Figura 78. Rango de espesor del metal base (SAW).....	105

Figura 79. Diagrama de circuito (SAW).....	106
Figura 80. Sistema de clasificación del fundente en el proceso de arco sumergido....	108
Figura 81. Sistema de clasificación del electrodo.....	109
Figura 82. Tasas de deposición de soldadura (SAW).....	109
Figura 83. Soldadura de arco de tungsteno protegida con gas.....	110
Figura 84. Diagrama del proceso (GTAW).....	111
Figura 85. Capacidad de la posición de soldadura (GTAW).....	112
Figura 86. Rango de espesor del metal base (GTAW).....	113
Figura 87. Esquema de configuración GTAW con un soplete de enfriamiento (a) por agua y (b) por aire.....	114
Figura 88. Condición del extremo del arco del electrodo de tungsteno.....	117
Figura 89. Comparación del arco de tungsteno con argón y helio.....	118
Figura 90. Concavidad de raíz.....	121
Figura 91. Radiografía con: concavidad de raíz.....	121
Figura 92. Convexidad de raíz.....	122
Figura 93. Radiografías con: convexidad de raíz.....	123
Figura 94. Inclusiones.....	124
Figura 95. Radiografías con: (a) inclusión de tungsteno, (b) inclusión de escoria.....	125
Figura 96. Fusión incompleta.....	126
Figura 97. Radiografías con: Falta de fusión.....	127
Figura 98. Falta de penetración.....	128
Figura 99. Radiografías con: falta de penetración.....	128
Figura 100. Porosidad.....	129
Figura 101. Radiografías con: porosidades.....	130
Figura 102. Inserción no consumida.....	131
Figura 103. Radiografía con: Inserción no consumida.....	131
Figura 104. Mordedura.....	132
Figura 105. Radiografía con: Mordeduras.....	133
Figura 106. Fisuras longitudinales.....	133
Figura 107. Fisuras transversales.....	134
Figura 108. Fisuras de raíz.....	134
Figura 109. Pesa en un resorte, posición de reposo.....	147
Figura 110. Pesa en resorte, extendido desde su posición de reposo.....	148

Figura 111. Trazo del movimiento periódico.....	148
Figura 112. Onda longitudinal	150
Figura 113. Onda transversal.....	151
Figura 114. Onda superficial	151
Figura 115. (a) haz de sonido con ángulo de incidencia, (b) ángulo de reflexión $i^{\circ} = r^{\circ}$	156
Figura 116. Ondas refractadas: transversal y longitudinal	157
Figura 117. (a) Fuente puntual, (b) Haz generado	159
Figura 118. Fuente puntual 2	160
Figura 119. Fuente puntual 3	161
Figura 120. Fuente puntual 4	161
Figura 121. Fuente puntual 5	162
Figura 122. Near field y far field.....	164
Figura 123. Amplitud de la onda vs propagación.....	164
Figura 124. Propagación del sonido.....	165
Figura 125. Instrumentación básica pulso-eco.....	167
Figura 126. A-scan.....	168
Figura 127. C-scan.....	169
Figura 128. S-scan.....	169
Figura 129. Sección de un transductor de contacto	170
Figura 130. Transductor de elemento simple	172
Figura 131. Transductor dual	172
Figura 132. Transductor de haz angular	173
Figura 133. Transductor de inmersión.....	174
Figura 134. Transductor con arreglo de fases.....	174
Figura 135. Transductor acústico electromagnético.....	175
Figura 136. Estándares de calibración UT	176
Figura 137. a) IIW tipo US-1 b) IIW tipo US-2 c) IIW tipo Mini.....	177
Figura 138. Bloque de calibración ángulo-haz	178
Figura 139. Bloque de calibración DSC.....	178
Figura 140. Bloque de calibración DC	179
Figura 141. Bloque de calibración RC	179
Figura 142. Gradillas de calibración.....	179

Figura 143. Medición de espesor con transductor de un elemento	180
Figura 144. Medición de espesor con transductor de dos elementos	181
Figura 145. Detección de laminaciones con transductor de un elemento	182
Figura 146. Discontinuidades en posición no favorable para el método.....	183
Figura 147. Detección de laminación en placa de espesor 3mm, técnica de múltiples ecos.....	183
Figura 148. Escaneo utilizando un transductor de haz angular y ondas transversales.....	184
Figura 149. Half skip distance, full skip distance y half skip position.....	185
Figura 150. Detección de discontinuidad en soldadura	186
Figura 151. Técnica de transductores múltiples.....	187
Figura 152. Técnica de inmersión	188
Figura 153. A-scan de concavidad de raíz.....	189
Figura 154. A-scan de convexidad de raíz.....	189
Figura 155. A-scan de inclusiones	190
Figura 156. A-scan de falta de fusión	191
Figura 157. A-scan de falta de penetración	191
Figura 158. A-scan de porosidades, (a) poro pequeño y grande, (b) agrupación de poros	192
Figura 159. Proceso básico del ensayo de líquidos penetrantes, (a) aplicación del penetrante, (b) remoción de excesos, (c) aplicación del revelador.....	197
Figura 160. Proceso pos-emulsionable, (a) aplicación del penetrante, (b) aplicación del emulsificador, (c) el emulsificador se mezcla con el líquido penetrante, (d) limpieza con agua del exceso de líquido penetrante.....	199
Figura 161. Relación entre el ángulo de contacto y la habilidad para humedecer	205
Figura 162. Relación entre el ángulo de contacto y el nivel del líquido dentro de un tubo de diámetro pequeño.....	206
Figura 163. Mecanismo de acción de emulsificador lipófilo	207
Figura 164. Mecanismo de acción de emulsificador hidrófilo	208
Figura 165. Proceso de líquidos penetrantes removibles con agua	210
Figura 166. Proceso de líquidos penetrantes pos-emulsionables lipófilos	211
Figura 167. Proceso de líquidos penetrantes pos-emulsionables hidrófilos.....	212
Figura 168. Proceso de líquidos penetrantes removibles con solvente	213
Figura 169. Indicación de golpe de arco	214
Figura 170. Fisuras en la zona afectada por el calor	214

Figura 171. Indicación de falta de penetración producida por líquido penetrante fluorescente.....	215
Figura 172. Indicación de porosidades producidas por líquido penetrante fluorescente.....	215
Figura 173. Indicación de fisuras tipo estrella producidas por líquido penetrante fluorescente.....	216
Figura 174. Mordedura en cordón de soldadura.....	216

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. “Vidas medias” vs “vidas restantes”.....	27
Tabla 2. Constantes de intensidad de iridio-192 y cobalto-60.....	36
Tabla 3. Valores de capa hemirreductora de materiales comunes.....	37
Tabla 4. Propiedades de tres radioisótopos comúnmente usados en gammagrafía	38
Tabla 5. Dosis máxima permitida por cuartos de año calendario (3 meses), para irradiación de todo el cuerpo	54
Tabla 6. Factores de calidad para radiación.....	55
Tabla 7. Factores que controla la sensibilidad radiográfica	75
Tabla 8. Valores para diseño de IQI tipo agujero.....	84
Tabla 9. Niveles típicos de calidad de imagen	86
Tabla 10. Tamaños y números de identificación de los IQI tipo alambre	87
Tabla 11. Equivalencias entre IQI tipo agujero y diámetro de IQI tipo alambre.....	88
Tabla 12. Metales soldables (SMAW).....	90
Tabla 13. Metales soldables (FCAW)	98
Tabla 14. Resumen de especificaciones para electrodos con núcleo de fundente.....	101
Tabla 15. Metales soldables (SAW).....	105
Tabla 16. Metales soldables (GTAW)	112
Tabla 17. Tamaño y capacidad de los sopletes para soldadura por arco de tungsteno con gas.....	115
Tabla 18. Tipo, tamaño y clasificación de los electrodos de tungsteno	116
Tabla 19. “Posibles defectos en procesos de soldadura”	119
Tabla 20. Velocidades del sonido para materiales típicos	153

RESUMEN

El presente proyecto de grado trata sobre los ensayos no destructivos de radiografía, ultrasonidos y líquidos penetrantes, aplicado a inspección de soldaduras en facilidades petroleras ecuatorianas.

Se explican los principios esenciales que rige cada uno de los ensayos no destructivos mencionados. Se ha incluido la descripción de los procesos de soldadura utilizados para la construcción de facilidades petroleras ecuatorianas y de los defectos comunes presentes en soldaduras utilizadas para la construcción de estas obras mecánicas.

También se presenta un resumen de las normativas de referencia utilizadas para aplicación de estos ensayos y un resumen de los criterios de aceptación/rechazo para evaluar juntas soldadas mediante los ensayos de radiografía, ultrasonidos y líquidos penetrantes. Entre las normas de referencia que se han tomado están: API 1104, ASME B31.3, ASME IX, API 650 Y ASME VIII DIV. 1

Se presentan, radiografías, escaneos de ultrasonidos (A-scan, S-scan y C-scan) y fotos de indicaciones generadas por el ensayo de líquidos penetrantes (con defectos típicos encontrados en soldaduras).

Finalmente, se incluyó ejemplos de informes diarios para registrar la inspección y un banco de preguntas por cada una de las técnicas mencionadas.

PALABRAS CLAVES: ENSAYO NO DESTRUCTIVO, ENSAYO DE RADIOGRAFIA, ENSAYO DE ULTRASONIDOS, ENSAYO DE LIQUIDOS PENETRANTES.

ABSTRACT

This graduation project is about radiographic testing, ultrasonic testing and liquid penetrant testing applied to weld inspection in Ecuadorian oil facilities.

The essential principles governing each one of these nondestructive methods are explained in this document. The description of welding processes used in the construction of Ecuadorian oil facilities and common defects present in weldings, also are included here.

A summary of the reference standards used to apply these methods, a summary of the acceptance/rejection to evaluate welded joints by radiographic testing ultrasonic testing and liquid penetrant testing is also presented. Within the standards used in this document we had mentioned: API 1104, ASME B31.3, ASME IX, API 650 and ASME VIII DIV. 1

Indications of radiographic testing, ultrasonic testing (A-scan, S-scan y C-scan) and by liquid penetrant testing (with typical defects found in welds) are presented in this document.

Finally, examples of daily reports to record the results of the inspection and a bank of questions for each of the above methods are included.

KEY WORDS: NONDESTRUCTIVE TESTING, RADIOGRAPHIC TESTING, ULTRASONIC TESTING, LIQUID PENETRANT TESTING.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Descripción de la Empresa

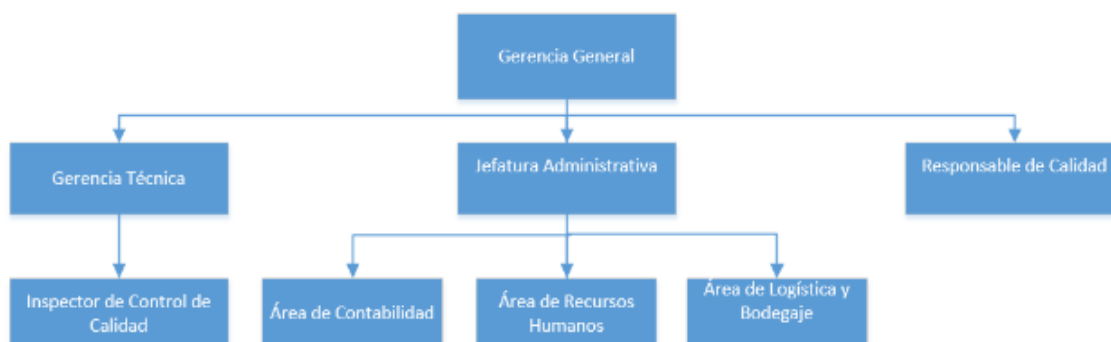
1.1.1 Antecedentes de la Empresa

La empresa **RADIN** es una compañía limitada, legal e independiente, constituida en la Superintendencia de Compañías del Ecuador con el expediente número 92005 e inscrita el 26 de Noviembre del 2001 bajo el N°4813 del Registro Mercantil, tomo 132.

Inició sus labores como proveedora de servicios para realizar control de calidad de soldaduras, exclusivamente. Este control de calidad lo realiza mediante la aplicación de ensayos no destructivos.

En la actualidad, ha acumulado 19 años de experiencia, pues sus primeras actividades las realizó el fundador de la compañía, desde el año 1995. Mantiene la actividad de control de calidad de soldaduras en Ecuador y durante dos años realizó una actividad paralela también en Panamá. El control de calidad lo ha realizado especialmente en la industria petrolera y otros proyectos de ingeniería como: centrales hidroeléctricas, oleoductos, gasoductos, poliductos, ampliaciones de refinerías, estaciones de bombeo, plantas térmicas para generación de electricidad, tanques de almacenamiento de petróleo, recipientes de presión, edificios y puentes metálicos soldados, acueductos y otros.

1.1.2 Estructura Orgánica de la Empresa



1.1.3 Misión

Brindar servicios para control de calidad en soldaduras, mediante ensayos no destructivos, con excelencia competitiva y tecnología de punta.

1.1.4 Localización

- ✓ Oficina Conocoto: Av. Lola Quintana N8-136 (Cantón Quito) y Autopista General Rumiñahui (sector puente 8).

1.1.5 Productos y/o Servicios

- Control de Calidad en Soldadura mediante:
 - ✓ Inspección con Radiografía Industrial
 - ✓ Inspección con Ultrasonidos Convencional y con Arreglo de Fases
 - ✓ Inspección con Tintas Penetrantes
 - ✓ Inspección con Partículas Magnéticas
- Capacitaciones y Certificaciones:
 - ✓ Cursos de Capacitación y Certificación ASNT Nivel II en las Técnicas de RT, PT, MT y UT.
 - ✓ Capacitación en Soldadura para Soldadores, Fiscalizadores y Supervisores de Obra.

- Otros servicios:
 - ✓ Elaboración y Calificación de Procedimientos de Soldadura, para diferentes tipos de materiales, procesos de soldadura y aplicaciones.
 - ✓ Calificación de Soldadores

1.2 Definición del Problema

Las industrias ecuatorianas, especialmente petroleras, utilizan métodos de soldadura para obtener ensambles definitivos de varias piezas metálicas, como resultado de esto obtenemos: tanques, oleoductos, manifolds, lanzadores, etc. Estas industrias contratan fiscalizadores para validar y verificar el cumplimiento de calidad de estas obras. Los fiscalizadores por requisito son profesionales de 3er nivel y en su mayoría ingenieros mecánicos.

En la actualidad, las universidades del país, que cuentan con la carrera de ingeniería mecánica, no tienen dentro de su pensum académico una materia referida al control de calidad de soldadura, considerando que alto número de sus egresados se dedican a la industria petrolera. Esto conlleva a que los profesionales dedicados a esta tarea no tengan el conocimiento necesario para el uso de normas en el control de calidad de la soldadura, escasa formación en ensayos no destructivos, desconocimiento de la norma para certificaciones del personal a su cargo que ejecuta los ensayos no destructivos.

Los fiscalizadores son los principales responsables para que las soldaduras tengan un alto nivel de confiabilidad, es decir que se pueda garantizar que no van a ocurrir posibles accidentes debido a fallas en la soldadura, accidentes como: derrames de petróleo, desprendimiento de piezas mecánicas, muertes debido a fisuras en tuberías de alta presión, etc. Una soldadura mal hecha significa un potencial accidente con sus respectivas implicaciones económicas, sociales, políticas y ambientales.

Actualmente algunas de las personas que se dedican a la labor de fiscalización, poseen conocimientos empíricos y muchas veces equivocados.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Elaborar un curso de ensayos no destructivos aplicado a juntas soldadas en facilidades petroleras ecuatorianas, dirigido a profesionales de 3er nivel basado en la norma ASNT.

1.3.2 Específicos

- ✓ Investigar los *principios* que rigen los ensayos de: gammagrafía, ultrasonidos y líquidos penetrantes.
- ✓ Determinar las normas que establecen el uso adecuado de las técnicas: RT, UT y PT; para realizar *control* de calidad de soldaduras en facilidades petroleras.
- ✓ Determinar las normas que establecen los criterios de *aceptación/rechazo* para la interpretación de los resultados obtenidos en facilidades petroleras con la aplicación las técnicas ya mencionadas.
- ✓ Generar una fuente de radiografías, escaneos de ultrasonidos, y fotografías de tintas penetrantes, con defectos en soldaduras de facilidades petroleras; aplicando los principios investigados y las normativas de referencia pertinentes.
- ✓ Obtener un banco de preguntas de los métodos RT, UT, PT, para la evaluación de personal.

1.4 Alcance

- Curso de entrenamiento en las técnicas de: gammagrafía, ultrasonidos y líquidos penetrantes, basado en la norma ASNT CP-105.
- Banco de 20 preguntas por cada técnica mencionada, para la evaluación de personal.
- Banco de radiografías digitalizadas, escaneos de ultrasonidos, y fotos de tintas penetrantes con defectos comunes presentes en las soldaduras de facilidades petroleras.
- Resumen de los criterios de aceptación/rechazo de la normativa aplicada en facilidades petroleras de Ecuador, para cada una de las técnicas mencionadas.

1.5 Justificación

Al haber tenido la oportunidad de trabajar en una empresa dedicada al control de calidad de soldadura en facilidades petroleras, he podido observar varias falencias en el conocimiento de los profesionales dedicados a esta área, quienes como en cualquier campo de la ingeniería, deberían dominar estos conocimientos, pues deben controlar estos procesos y dirigir a las demás personas que intervienen en estos trabajos.

La empresa Radin, que actualmente labora en aproximadamente el 50% de los bloques petroleros entregados a Petroamazonas EP para hacer el control de calidad en soldadura, desea implementar un curso dirigido a profesionales de 3r nivel, que van a laborar como fiscalizadores de obra mecánica. Este curso va a desarrollarse en base a las directrices de la Sociedad Norteamericana de Ensayos No Destructivos (ASNT).

Para guiar esta tarea, la empresa RADIN ha asignado un inspector de ensayos destructivos certificado ASNT Nivel III y un Inspector de Soldadura Certificado AWS CWI, ambos ingenieros mecánicos.

CAPITULO II

INTRODUCCION A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

2.1 Introducción

Los ensayos no destructivos (sus siglas en inglés “NDT”), son métodos para investigar é inspeccionar materiales, sin causar daños en su estructura interna ó externa.

El uso de los NDT se enfoca principalmente en la detección de discontinuidades en la estructura interna de materiales, las cuales pueden generar fallas mecánicas, accidentes en instalaciones, deterioro de equipos, etc. Ejemplo de estas discontinuidades presentes en materiales son: fisuras, corrosión, porosidades, inclusiones de tungsteno, etc. Los NDT también son usados para la identificación y detección de características micro-estructurales en materiales (tamaño de grano, resistencia, etc).

La idea de brindar una predicción sobre la situación actual en que se encuentra el material analizado y la durabilidad que tiene ó tendrá, es una cualidad muy importante para varias industrias.

2.2 Propósito, Aplicación, Clasificación y Objetivo

1.- Propósito.- Actualmente los NDT son utilizados por varias industrias a fin de:

1. Asegurar la integridad y confianza de sus productos;
2. prevenir fallas, accidentes y evitar muertes humanas;
3. brindar mayor beneficio para el usuario;
4. asegurar la satisfacción del consumidor y mantener la reputación del fabricante;
5. ayudar a verificar un correcto diseño del producto;
6. controlar los procesos de manufactura;
7. reducir costos de manufactura;
8. mantener un nivel de calidad uniforme en los productos;
9. asegurar disponibilidad operacional de la maquinaria.

Con estas 9 razones mencionadas se puede tener una visión global del porqué la gran aceptación, importancia y crecimiento de los ensayos no destructivos.

2.- Aplicación.- Los NDT son una rama de la ciencia de materiales relacionada con la uniformidad, calidad, y disponibilidad de materiales. La ciencia de los ensayos no destructivos incorpora toda la tecnología para detección, medición y análisis de las propiedades de materiales, incluyendo discontinuidades.

Por definición los ensayos no destructivos son: métodos de ensayo para materiales ó estructuras sin romperlos ó afectar su funcionalidad, haciendo posible, analizar propiedades internas ó la detección de discontinuidades presentes en éstos. Los NDT se han convertido en una herramienta indispensable en la investigación, desarrollo, diseño de materiales, solamente aplicando el ensayo apropiado, se puede aprovechar al máximo los beneficios de la ciencia de materiales avanzada.

3.- Clasificación.- Cada método puede ser completamente caracterizado en términos de cinco factores principales:

1. fuente de energía ó medio para sondear el objeto (rayos-X, ondas de ultrasonido, radiación térmica, etc);
2. naturaleza de las señales, imagen resultante de la interacción con el objeto (atenuación de rayos X, retorno de ultrasonidos, etc);
3. modos de detección de las señales resultantes (foto emulsión, cristal piezoeléctrico, inductancia de la bobina eléctrica, etc);
4. método de indicación ó registro de señales (medición de la deflexión, trazo del osciloscopio, radiografía, etc);
5. principios para interpretar los resultados (indicación directa ó indirecta, cualitativa ó cuantitativa, etc).

En términos generales se los puede clasificar en seis categorías:

1. visual;
2. radiaciones ionizantes;
3. eléctricos-magnéticos;
4. vibraciones mecánicas;
5. térmicos;
6. químicos/electroquímicos.

4.- Objetivo.- El objetivo de cada método es proveer información sobre los siguientes parámetros del material:

1. discontinuidades ó separaciones (fisuras, vacíos, poros, etc);
2. estructura (tamaño de grano, desalineación, etc);
3. dimensión y metrología (espesor, diámetro, tamaño de la discontinuidad, etc);
4. propiedades físicas y mecánicas (reflectividad, conductividad, módulo elástico, velocidad sónica, etc);
5. composición y análisis químico (impurezas, composición química, etc);
6. respuesta dinámica y al esfuerzo (fatiga, crecimiento de la fisura, vibración, etc);
7. análisis de la imagen ó marca generada (contenido de la imagen, frecuencia del espectro, configuración de campo magnético, etc);
8. fuentes anormales de calor.

Las limitaciones de un método incluyen condiciones requeridas por el método (acceso, contacto físico, preparación, etc).

2.3 Descripción de los Métodos de Ensayos No Destructivos

A continuación se realizará una breve descripción de los métodos de ensayos no destructivos más utilizados en el campo industrial ecuatoriano.

2.3.1 Ensayo Visual (VT)

Su principio básico es la observación del objeto inspeccionado, se la puede realizar directamente (a través de los ojos) ó indirectamente (usando instrumentos ópticos). El objetivo del ensayo, es evaluar la presencia de

anormalidades y la conformación del objeto según la especificación dada por el fabricante. Este método debe ser el primer ensayo que se aplique para inspeccionar un objeto. El procedimiento consiste en tres pasos básicos:

1. limpiar la superficie del objeto que se inspecciona;
2. proveer iluminación adecuada;
3. observar e interpretar.

Un prerequisite indispensable para aplicar este ensayo es tener el conocimiento sobre el proceso por el cual ha sido fabricado el objeto, su historial de servicio, sus modos potenciales de fallo y experiencia relacionada en la industria. Este ensayo está limitado a la detección de discontinuidades superficiales (fisuras, desalineación, corrosión, desgaste, daños físicos) y es ampliamente utilizado para detectar y examinar discontinuidades superficiales asociadas con soldaduras. Cuando otros métodos de NDT ya han sido aplicados, el ensayo visual provee un útil complemento de verificación.



Figura 1. Ensayo visual: con galgas (izquierda) y boroscopio (derecha)

Fuente: (Visual NDT inspection, 2012)

2.3.2 Ensayo de Líquidos Penetrantes (PT)

Gracias a la acción capilar, los líquidos penetrantes se filtran por aberturas diminutas dispuestas en la superficie del material, indicando la localización de la discontinuidad. Las cavidades de interés pueden ser muy pequeñas, incluso invisibles a vista simple. La capacidad de un líquido para fluir a través de la superficie y entrar en las cavidades depende principalmente de:

1. una superficie libre de suciedad;
2. tensión superficial del líquido;
3. configuración de la cavidad;
4. ángulo de contacto del líquido;
5. capacidad del líquido para humedecer la superficie;
6. cavidades libres de suciedad ;
7. tamaño de la abertura de la cavidad;

El ensayo revela y localiza discontinuidades abiertas a la superficie de materiales sólidos no porosos ó rugosos y puede ser aplicado a materiales magnéticos y no magnéticos; particularmente es útil en materiales no magnéticos (aluminio, magnesio, etc) debido a que estos materiales no se pueden inspeccionar mediante partículas magnéticas. Hay dos variedades de este método, una utiliza un tinte visible, generalmente rojo para contrastar, y la otra utiliza un tinte fluorescente.

Los líquidos penetrantes son difíciles de remover completamente de la discontinuidad, esto puede ser un problema en ciertos materiales (el penetrante puede ser corrosivo para el material).

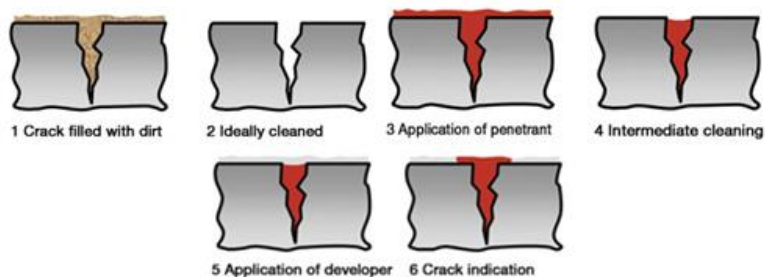


Figura 2. Ensayo de líquidos penetrantes

Fuente: (Karl Deutsch, 2014)



Figura 3. Detección de discontinuidades mediante líquidos penetrantes

Fuente: (Solar Atmospheres, 2014)

2.3.3 Ensayo de Partículas Magnéticas (MT)

Cuando el material ó parte bajo inspección es magnetizado, las discontinuidades que están en dirección generalmente transversal a la dirección del campo magnético generan campos de fuga, estos campos se forman en y sobre la superficie del material. Gracias a la presencia de estos campos y al uso de pequeñas partículas ferromagnéticas aplicadas sobre la superficie, se puede detectar discontinuidades existentes en el material. Estas partículas ferromagnéticas se agrupan y forman un trazo de la discontinuidad, indicando generalmente su localización, tamaño, forma y extensión; pueden ser aplicadas sobre una superficie como: partículas secas ó partículas húmedas (en un líquido portador, agua ó aceite).

La corriente eléctrica utilizada para generar el campo magnético puede ser corriente alterna (AC) ó corriente continua (DC). La diferencia primaria entre usar AC ó DC es que: los campos magnéticos generados con DC permiten la detección de discontinuidades que se encuentran a un nivel más profundo en el material inspeccionado.

Se puede magnetizar al material de dos maneras: la primera es pasando corriente a través del material y la segunda es colocando al material dentro de un campo magnético.

Algunos factores importantes en este ensayo son: la corriente de magnetización, dirección y densidad del flujo magnético, método de magnetización y propiedades del material a ser inspeccionado. El ensayo de partículas magnéticas se lo utiliza para localizar discontinuidades superficiales y ligeramente subsuperficiales dispuestas en materiales ferromagnéticos.

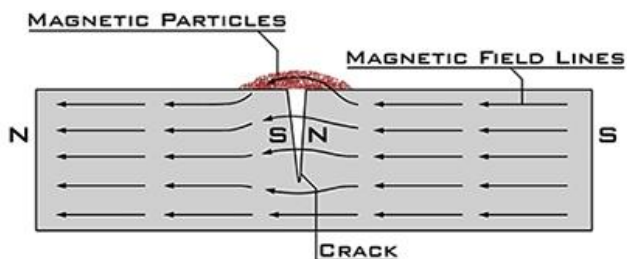


Figura 4. Ensayo de partículas magnéticas

Fuente: (The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, 2014)



Figura 5. Detección de discontinuidades mediante partículas magnéticas

Fuente: (U.S Department of Transportation, 2014)

2.3.4 Ensayo de Corrientes Inducidas (ET)

También es conocido como ensayo de corrientes parásitas, su principio básico es la inducción electromagnética, se lo utiliza para identificar ó diferenciar una gran variedad de condiciones estructurales y metalúrgicas en conductores eléctricos ferromagnéticos y metales no ferromagnéticos.

El objeto inspeccionado es colocado adyacente a una bobina eléctrica en la cual fluye corriente alterna de alta frecuencia, que genera un campo electromagnético alrededor de la bobina. Este campo primario hace que las corrientes parásitas fluyan hacia el objeto gracias a la inducción electromagnética. Inversamente, las corrientes parásitas afectadas por las discontinuidades, crean un campo magnético secundario de diferente magnitud y opuesto en dirección al campo primario. El resultado de esta interacción afecta al voltaje de la bobina, la cual mediante un circuito eléctrico registra estas discontinuidades.

La selección de la forma, dimensión y disposición de la bobina, está gobernada por: sensibilidad requerida para detectar las discontinuidades, tipo de discontinuidades que se busca y forma del objeto.

Se las llama corrientes remolino porque fluyen en curvas cerradas, en el objeto ó en el aire. Sus propiedades más importantes, amplitud y fase, son influenciadas por la disposición, las características de la instrumentación y por el objeto inspeccionado.

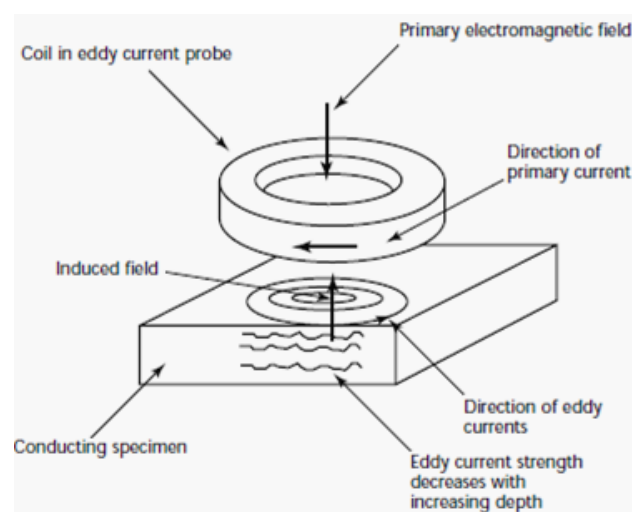


Figura 6. Ensayo de corrientes inducidas

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Mediante este ensayo se puede detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales. Un uso industrial importante es la inspección de tuberías en intercambiadores de calor. A menudo se lo utiliza para analizar tuberías de pequeños espesores en reactores de agua presurizados, generadores de vapor, condensadores de turbinas é intercambiadores de calor de aires acondicionados. También es usado en mantenimiento de aeronaves.

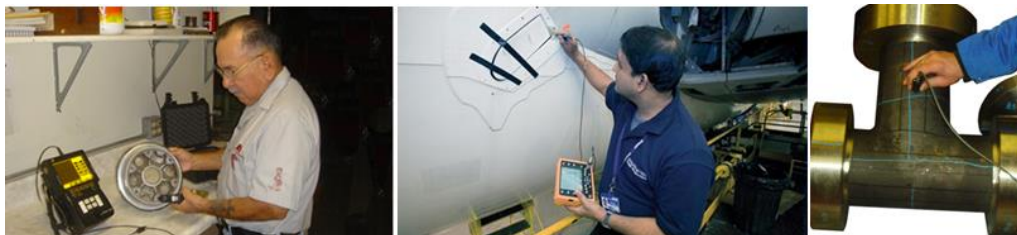


Figura 7. Detección de discontinuidades mediante corrientes inducidas

Fuente: (GE-Energy)

2.3.5 Ensayo de Ultrasonidos (UT)

El ensayo de ultrasonidos es un ensayo de tipo volumétrico, en el cual un haz de ondas sonoras de alta frecuencia (ultrasonidos) son emitidas desde un transductor hacia el objeto inspeccionado.

Para poder crear estas ondas, el transductor contiene un disco delgado fabricado con material cristalino con propiedades piezoeléctricas (como el cuarzo).

Cuando se induce corriente eléctrica en materiales piezoeléctricos, estos comienzan a vibrar, creando así movimiento y generando ondas ultrasónicas. Estas ondas viajan en todas las direcciones desde la fuente generadora. Van acompañadas de pérdida de energía (atenuación) y son reflejadas en interfaces (ondas que retornan).

Las ondas que chocan con las discontinuidades retornan hacia al transductor generan indicaciones en la pantalla del equipo utilizado, de esta manera se las puede interpretar.

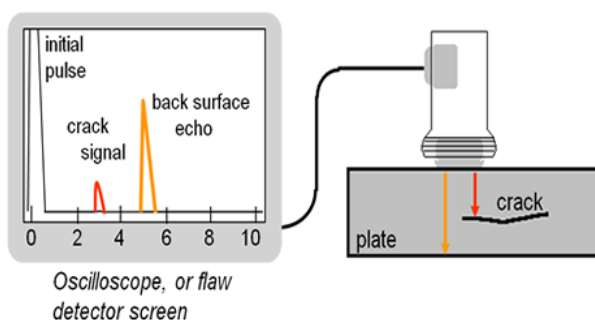


Figura 8. Ensayo de ultrasonidos convencionales

Fuente: (Iowa State University, 2014)

Este ensayo es utilizado ampliamente para inspeccionar metales y aleaciones usadas en ingeniería, principalmente para detección de discontinuidades subsuperficiales y medición de espesores en tuberías. Otras aplicaciones incluyen inspección de recipientes de presión, sistemas nucleares, vehículos de combustión, maquinaria, estructuras y puentes.



Figura 9. Detección de discontinuidades mediante ultrasonidos

Fuente: (Wikipedia, 2014)

Actualmente se han desarrollado variantes de esta técnica, las cuales están siendo altamente utilizadas en el campo industrial, entre estas técnicas tenemos: ultrasonidos con arreglo de fases, time of fly diffracción y ondas guiadas.

2.3.6 Ensayo de Radiografía Industrial (RT)

Es un ensayo de tipo volumétrico que puede ser aplicado a cualquier tipo de material. La fuente de radiación x ó gamma, penetra a través del objeto generando una imagen de su estructura interna, esta imagen es plasmada sobre detectores de radiación conocidos como película radiográfica.

Los factores importantes considerados en este ensayo son:

1. fuente de radiación,
2. geometría del objeto inspeccionado,
3. accesibilidad al objeto,
4. tipo de película,
5. tiempo de exposición y distancia.

Se basa en la diferencia de densidades existentes en el objeto. Al existir discontinuidades en la estructura interna del material (fisuras, falta de

fusión, porosidades, etc), la radiación es atenuada en diferentes cantidades y consecuentemente produce diferencias de densidad ópticas en la película.

La densidad de las discontinuidades es menor a la del material, si la energía de la fuente es muy alta ó muy baja para un espesor dado de material, podría existir bajo contraste en la imagen.

Un aspecto muy importante asociado con la radiografía industrial, es la seguridad radiológica, esto se debe a que ningún sentido humano puede detectar la presencia de radiación. Excesivas dosis de exposición a la radiación pueden causar daños permanentes e incluso la muerte.

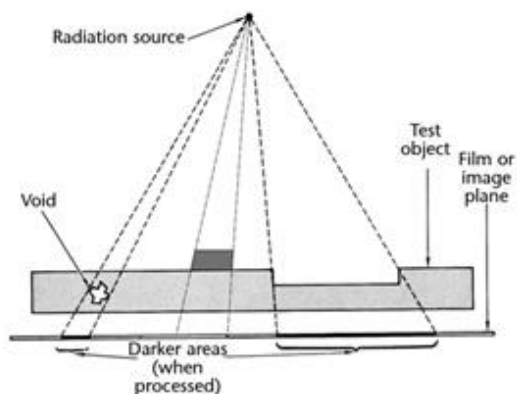


Figura 10. Ensayo de radiografía

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

Mediante este ensayo se detectan discontinuidades subsuperficiales que no pueden ser detectadas por ensayo visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e inclusive ultrasonidos. La radiografía es uno de los NDT más utilizados en el campo industrial. Cuando se utiliza radioisótopos como fuente de energía, el método se conoce como gammagrafía.



Figura 11. Detección de discontinuidades mediante radiografía

Fuente: (Wikipedia, 2014)

2.3.7 Ensayo de Fugas (LT)

El ensayo de fugas está relacionado con el flujo de líquidos ó gases en componentes presurizados ó sistemas que tienen como propósito contener fluidos. Los principios de este ensayo involucran la física del fluido (líquido ó gas) circulando a través de un medio donde existe diferencial de presiones ó acción capilar. Las fugas de fluido pueden propagarse desde el interior hacia al exterior ó viceversa, como resultado de la diferencia de presiones entre las dos regiones. Este método abarca básicamente las siguientes funciones: localización, medición y monitoreo de la fuga.

Un ensayo de fugas confiable disminuye costos, reduciendo el número de productos refabricados, reparos por garantías y devoluciones. Las razones más comunes para realizar este ensayo son: prevenir pérdidas de materiales costosos, pérdidas energéticas, contaminación hacia el medio ambiente, explosiones ó incendios potenciales y asegurar la confianza del componente ó sistema.



Figura 12. Detección de discontinuidades mediante el ensayo de fugas

Fuente: (Wikipedia, 2014)

2.3.8 Ensayo de Emisiones Acústicas (AET)

Las emisiones acústicas son ondas de esfuerzo generadas por movimientos repentinos en la estructura interna de materiales sometidos a tensión. Estas ondas excitan a los sensores piezoeléctricos situados sobre el material presentando así indicaciones en la pantalla del equipo utilizado, la presencia de discontinuidades que son la fuente clásica de una emisión acústica está relacionada con discontinuidades en procesos de deformación, como fisuras en crecimiento ó deformaciones plásticas.

La fuente de energía de una emisión acústica es la zona de esfuerzo elástico del material. Sin tensión no habrá emisión. Por lo tanto, un ensayo de emisiones acústicas usualmente es realizado en una prueba de carga antes de poner en servicio la estructura. A menudo una estructura será cargada hidrostáticamente incluso durante servicio.

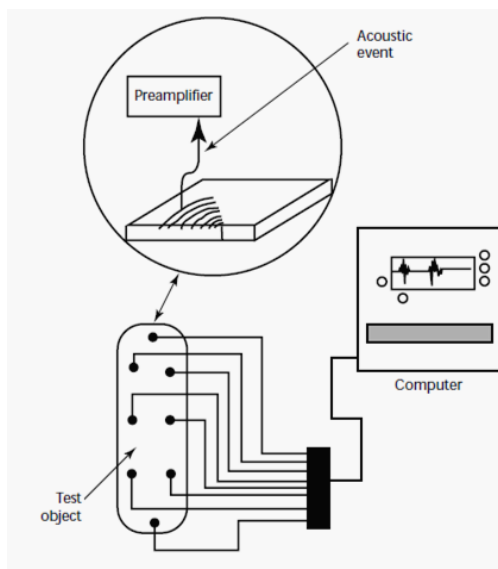


Figura 13. Ensayo de emisiones acústicas en el cual ocho sensores permiten localizar la propagación de la fisura

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

El equipo empleado es altamente sensible a cualquier tipo de movimiento en su frecuencia de operación (típicamente entre 20 a 1200 kHz).

El equipo no solo detecta fisuras en crecimiento y deformaciones del material, también detecta procesos como solidificación, fricción, flujo y transformaciones de fase. Por estos motivos este ensayo es también usado en procesos de inspección de soldadura, detección corrosión en tuberías, pérdida de lubricación en equipo rotativo, etc.

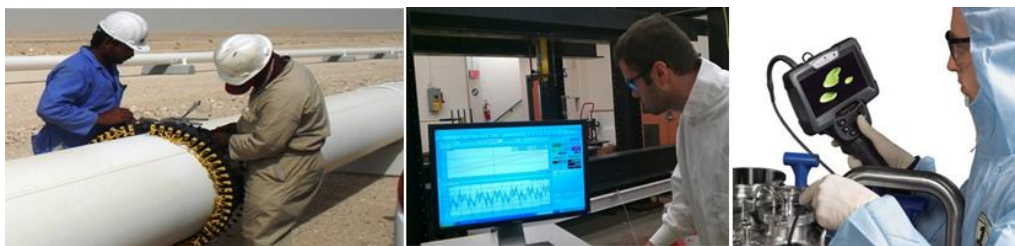


Figura 13. Detección de discontinuidades mediante emisiones acústicas

Fuente: (Wikipedia, 2014)

2.4 Calificación y Certificación del Personal

Uno de los aspectos más críticos en el proceso de ensayos no destructivos es la calificación del personal que ejecuta el ensayo. Es difícil determinar la exactitud de un ensayo solamente observando el proceso ó la documentación generada por conclusiones.

La calidad del ensayo no destructivo tiene gran dependencia de las habilidades y conocimientos que posee el inspector. La Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos “ASNT”, es líder mundial en la calificación y certificación de personal que emplea estos ensayos. La ASNT, ha implementado tres programas principales para la calificación del personal.

1.- ASNT SNT-TC-1A Prácticas Recomendadas, nos brinda directrices para la calificación del personal que ejecuta ensayos no destructivos. Es una **práctica recomendada** que identifica los atributos específicos que deberían ser considerados cuando se califica personal. La SNT-TC-1A exige que el empleador desarrolle é implemente una práctica escrita (procedimiento) que detalle el proceso específico y cualquier limitación en la calificación y certificación del personal. Estas prácticas deber ser revisadas y aprobadas por un inspector ASNT nivel III.



Figura 14. Norma SNT-TC-1A y certificación NDT nivel III

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2014)

2.- **ANSI/ASNT CP-189 Estándares para Calificación y Certificación de Personal en Ensayos no Destructivos**, similar a la anterior pero la diferencia radica en que ésta **establece y norma** los **atributos específicos** necesarios para la calificación y certificación de personal que ejecuta ensayos no destructivos. No se la considerada como una *práctica recomendada* ya que es un estándar normativo.



Figura 15. Norma ANSI/ASNT CP-189

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2014)

3.- **ASNT - ACCP, Programa Central de Certificación**, es un proceso de certificación independiente. Actualmente consta con los atributos para la calificación y certificación de personal nivel II y nivel III que ejecuta ensayos no destructivos. El empleador de la ACCP evalúa las habilidades y

conocimientos de un individuo en la aplicación de los procedimientos de la compañía, utilizando técnicas designadas y equipos identificados para ensayos específicos.



Figura 16. Norma ACCP y certificación ACCP nivel II

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2014)

Una vez que se ha procedido a calificar al personal mediante uno de los tres programas mencionados anteriormente, se procede con la certificación del personal. Hay que tomar en cuenta que la certificación pertenece a al empleador, y solo puede ser utilizada en la empresa donde se la obtuvo, es decir, no puede ser utilizada en otra empresa, incluso si ésta brinda los mismos servicios de NDT.

En la mayoría de las industrias ecuatorianas que realizan NDT, se utiliza las prácticas recomendadas ASNT SNT-TC-1A para la calificación y certificación de personal. Cada empresa tiene su procedimiento interno de calificación, el cual debe ser diseñado y aceptado por un inspector ASNT nivel III.

Dentro de este procedimiento debe constar la sección de entrenamiento teórico; en esta sección se deben enseñar los principios que rige el ensayo no destructivo para el cual se está calificando al inspector. La ASNT ha clasificado los tópicos que deben ser consideradas para esta etapa de instrucción dentro de la norma ANSI/ASNT CP-105, tópicos que satisfacen las necesidades requeridas por la SNT-TC-1A.

En los últimos años también se ha desarrollado el programa internacional ISO. 9712 para calificación y certificación de personal. Este programa no es utilizado en Ecuador, sin embargo se lo detalla a continuación:

ISO 9712:2012, Ensayos no destructivos – Calificación y Certificación de Personal, este estándar internacional especifica los requerimientos de principios para la calificación y certificación de personal que practica ensayos no destructivos para la industria. La certificación cubre uno ó más de los siguientes métodos: AET, ET, LT, MT, PT, RT, UT, VT.

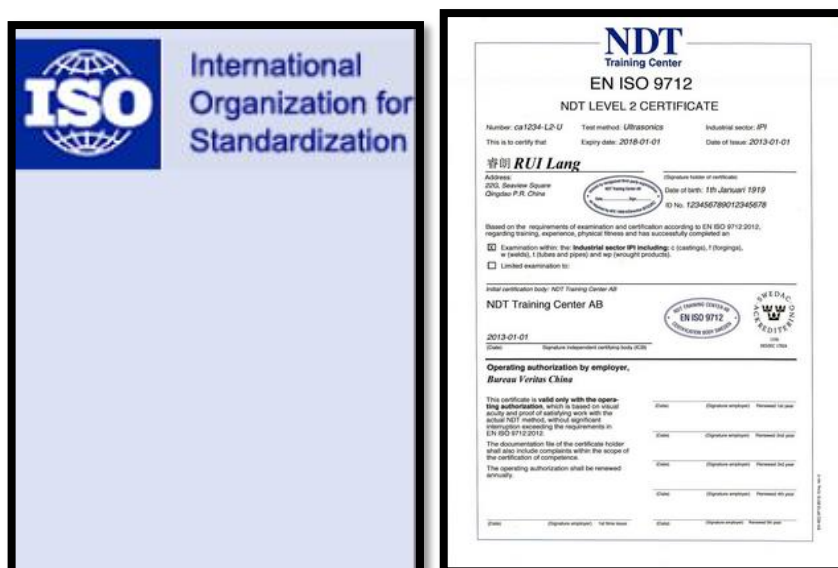


Figura 17. Norma 9712:2012 y certificación ISO 9712:2012 nivel II

Fuente: (ISO 9712:2012, 2014)

CAPITULO III

CURSO DE ENSAYO RADIOGRAFICO

El objetivo de este curso es presentar un medio de información donde se encuentre los principios que rigen el ensayo radiográfico, las normativas que hacen referencia a los NDT, un resumen de criterios de aceptación/rechazo basado en las normativas antes mencionadas (aplicados a RT) y finalmente resultados de referencia que se obtiene con este ensayo. Cabe recalcar que las normativas mencionadas, son las aplicadas en la construcción de facilidades petroleras en Ecuador.

A continuación se muestra los puntos como se desarrollará el curso:

3.1 Conceptos básicos de Radiología

3.2 Película Radiográfica

3.3 Procesos de Soldadura Utilizados en Facilidades Petroleras de Ecuador

3.4 Defectología en Depósitos de Soldadura

3.5 Evaluación e Interpretación de Soldaduras

Cada uno de los puntos antes mencionados contiene dentro de su estructura temas que se consideran importantes para el desarrollo e implementación de éste.

3.1 Conceptos Básicos de Radiología

3.1.1 Definición de Radiografía Industrial

La radiografía industrial, es el procedimiento mediante el cual se obtienen radiografías de una muestra de material (generalmente metales), utilizando rayos-x ó rayos gamma, cuando se utiliza radiación gamma, el método es conocido como gammagrafía.

La energía emitida por la fuente de radiación es aplicada a un lado de la muestra a examinar y por el otro se coloca un detector de radiación, llamado también "película radiográfica". Este detector generalmente es una

hoja de película contenida en una bolsa fina que lo aísla de la luz. De este modo se logra obtener una imagen de la estructura interna del material y se puede realizar los análisis deseados.

3.1.2 Materiales Radiactivos

3.1.2.1 Producción

Existen cuatro formas de producir materiales radiactivos:

1. radiactividad natural;
2. activación de neutrones;
3. fragmentos de fisión;
4. producción en un acelerador.

1.- Radiactividad natural.- Gran parte del material radiactivo que se utiliza en la actualidad se lo puede encontrar en la naturaleza. Este material proviene de tres fuentes:

1. Especies radiactivas con vidas medias comparable a la edad del planeta tierra: los elementos cuyo número atómico es mayor a 83 (bismuto), solo existen en forma radiactiva ;
2. Productos del decaimiento de las especies radiactivas de larga vida media: uno de los materiales provenientes del decaimiento de especies con larga vida media, es el Torio, el cual comienza como Torio-232 y termina como plomo-208, luego de 10 pasos de decaimiento;
3. Material bombardeado por rayos cósmicos: el constante bombardeo de rayos cósmicos hacia la tierra produce un campo de neutrones y protones, los cuales interactúan con el nitrógeno, oxígeno, y argón existente en la atmósfera produciendo cantidades considerables de hidrogeno-3 (tritio), carbón-14, berilio-10, argón-39 y otros 15 nucleídos radiactivos más.

2.- Activación de neutrones.- Esta técnica está relacionada con grandes flujos de neutrones generados en reactores nucleares, mediante ésta se produce la mayoría de isótopos (átomos de un mismo elemento,

cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones) usados en la gammagrafía.

Ocurre cuando se bombardea un isótopo estable con neutrones, éste los captura y se convierte en un isótopo no estable (radiactivo). El cobalto-60 y el Iridio-192 vienen del bombardeo de neutrones a sus isótopos estables cobalto-59 e iridio-191.

La producción de la radiactividad puede ser predicha por la ecuación:

$$(1) \quad A = Nf\sigma[1 - \exp(-0.693 \frac{t_i}{T})]$$

Donde, “**A**” es la actividad producida (en desintegraciones por segundo), “**N**” es número de átomos bombardeados, “**f**” es el flujo de neutrones (en neutrones por cm^2), “ **σ** ” es la sección transversal para la captura de neutrones (en cm^2), “ **t_i** ” es el tiempo de irradiación (en unidades de tiempo) y “**T**” es la vida media del radioisótopo producido (en unidades de tiempo).

La ecuación indicada, solamente es correcta para materiales bombardeados de espesor delgado. Si fuera un material con espesor grueso, éste actuaría como un blindaje y la cantidad de neutrones absorbida sería menor, por lo tanto, brindaría una actividad radiactiva menor a la calculada.

3.- Fragmentos de fisión.- Cuando se utiliza un átomo que sea fisionable.

En el proceso de fisión, son liberados neutrones y dos fragmentos del núcleo. Los dos fragmentos son llamados “fragmentos de fisión”. Estos fragmentos usualmente no tienen el mismo tamaño y son agrupados en dos distribuciones relacionadas con el número de masa. Uno de los subproductos obtenidos por separación química de estos fragmentos es el Cesio-137, éste es muy utilizado en prácticas de gammagrafía y terapias médicas.

4.- Producción en un acelerador.- Los aceleradores de partículas pueden proveer un flujo de neutrones apreciable ó corrientes de partículas de alta energía incluyendo portones, deuterio y átomos de helio. Al impactar un material apropiado con estas partículas se puede producir un átomo radiactivo. Está técnica es principalmente usada para producir materiales utilizados en el campo médico.

Entre los aceleradores de partículas tenemos: betatrones, aceleradores lineales, generadores de Van de Graaff y ciclotrones.

3.1.2.2 Unidad de Actividad Radiactiva “Curie”

El núcleo de un átomo radiactivo emite energía acompañada generalmente de partículas. Esta energía usualmente es la energía cinética de las partículas liberadas y también está compartida por fotones (radiación gamma). Cada cambio en el núcleo de un átomo es llamado desintegración ó decaimiento radiactivo.

La unidad tradicional para medir este decaimiento es el curie (**Ci**). Se conoce que un curie es 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo.

En el SI, la unidad de radiactividad es el Becquerel (**Bq**), éste representa una desintegración por segundo. Debido a que se producen billones de desintegraciones por segundo en una fuente activa, usualmente se utiliza el prefijo giga (10^9), quedando la unidad como gigabecquerel (GBq).

3.1.2.3 Vida Media

Es el tiempo requerido para que la mitad de los átomos originales decaigan ó cambien. Por lo tanto, es una manera de seguir la pista al decaimiento radiactivo.

Existe una probabilidad “ λ ” de decaimiento de un átomo por unidad de tiempo, conocida como constante de decaimiento ó fracción de átomos por unidad de tiempo, pero cuando se requiere referirse a un gran número de átomos, la vida media es el concepto más conveniente.

El número de átomos en decaimiento por unidad de tiempo, puede ser expresado como “ λ ” veces el número total de pares de átomos “ N ”:

$$(2) \quad \frac{\text{desintegraciones}}{\text{tiempo}} = \lambda N$$

La vida media “ T ” se relaciona con la constante de decaimiento así:

$$(3) \quad T = \frac{\ln(2.00)}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

El número de átomos en decaimiento por unidad de tiempo, decrece exponencialmente con el tiempo. Es decir, la mitad de la cantidad original al inicio del periodo de vida media permanece al final del periodo de vida media. La siguiente tabla indica esta propiedad exponencial.

Tabla 1. “Vidas medias” vs “vidas restantes”

Fuente: (EASTMAN KODAK COMPANY, 1980)

Elapsed Time (half lives)	Amount Remaining (percent)
0	100
1	50
2	25
3	12.5
4	6.25
5	3.12

Este cambio exponencial puede ser expresado matemáticamente por la expresión:

$$(4) \quad \frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

Donde, “ N ” es el número de átomos ó cantidad de material radiactivo después de “ n ” vidas medias de un número ó cantidad de átomos original “ N_0 ”. Una expresión más conveniente en términos de un tiempo “ t ” y la vida media “ T ”, es:

$$\frac{N}{N_0} = e^{(-\lambda t)}$$

Remplazando el valor de “ λ ” tenemos:

$$(5) \quad \frac{N}{N_0} = e^{\left(-\frac{0.693t}{T}\right)}$$

La ecuación (5), comúnmente es utilizada para calcular la actividad radiactiva de una fuente respecto al tiempo.

Como resultado de este decaimiento tenemos la gráfica de: cantidad de material radiactivo vs tiempo (Fig. 19), resulta una línea recta (si se usan coordenadas semi-logarítmicas).

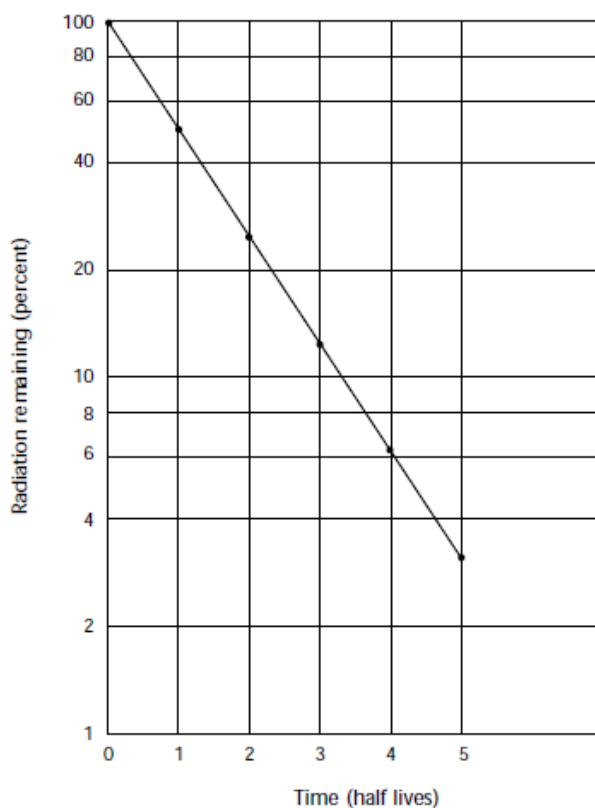


Figura 18. Radiactividad vs tiempo

Fuente: (Hellier, 2003)

3.1.3 Tipos de Radiación

Los tipos de radiación se los puede clasificar en dos: radiación de partículas y radiación electromagnética.

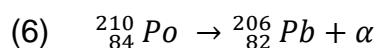
3.1.3.1 Radiación de Partículas

En el proceso de decaimiento radiactivo uno de los productos expulsados desde el interior del núcleo son las partículas:

1. alfa;
2. beta;
3. neutrones.

1.- Decaimiento alfa.- En este decaimiento el núcleo emite partículas alfa, las cuales son esencialmente núcleos de helio (2 protones y 2 neutrones), estas partículas generalmente poseen una energía cinética que va entre 2 y 6 MeV. Los emisores de partículas alfa son núcleos grandes como los núcleos de radio, polonio y uranio.

Tienen poco poder de penetración ya que poseen una gran masa, consecuentemente son fácilmente bloqueadas por pequeñas cantidades de material, como hojas de papel ó incluso la piel. A continuación se muestra la ecuación del decaimiento del Polonio-210:

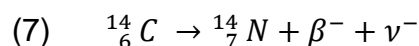


A este proceso se lo conoce como transición, nótese que hay un decrecimiento de 4 en la masa y 2 en el número atómico del átomo principal para formar el átomo secundario más una partícula alfa.

2.- Decaimiento beta.- En este proceso, un protón es transformado en un neutrón ó viceversa (en el interior del núcleo atómico). Como resultado de esta transformación, el núcleo emite partículas beta, éstas son idénticas a electrones sometidos a grandes velocidades, la diferencia es que estas partículas pueden estar cargadas positivamente (positrones) ó negativamente (negatrones).

Los radioisótopos que emiten partículas beta desde su núcleo, son los que tiene una alta cantidad de neutrones, comparado con los isótopos estables del mismo elemento. Las partículas beta tiene mayor poder de penetración que las alfa y son usualmente detenidas con capas delgadas de agua, vidrio ó metal.

A continuación se muestra la ecuación del decaimiento del Carbono-14:



Nótese que la masa se conserva pero hay un incremento de 1 en el número atómico del átomo secundario comparado con el átomo principal cuando la partícula beta y el neutrino son emitidos.

3.- Fisión espontánea.- Las especies de materiales con número atómico mayor a 200 pueden decaer por un proceso de fisión espontáneo. Muchos de los procesos de fisión comienzan con la absorción de un neutrón en el núcleo de un átomo.

El uranio-138 y el californio-252 decaen mediante fisión espontánea y decaimiento alfa.

El núcleo de estos elementos se divide en dos núcleos más pequeños con la liberación de 2 a 4 neutrones y una gran cantidad de rayos gamma. Este proceso de fisión espontánea es predominante en los núcleos extremadamente grandes, éstos suelen ser usados como fuentes de neutrones.

De las partículas producidas en los 3 tipos de decaimiento, los neutrones tienen el mayor poder de penetración, suelen ser blindados con grandes espesores de: agua, parafina ó hormigón.

3.1.3.2 Radiación Electromagnética

En el decaimiento radiactivo gamma y en la producción de rayos-x, se produce la expulsión de energía en forma de fotones, los cuales no poseen masa, carga y tampoco momento magnético.

Decaimiento gamma.- Generalmente, la emisión de rayos gamma sigue al decaimiento alfa ó beta, a excepción de muy pocos radioisótopos donde solamente es liberada radiación gamma. Los rayos gamma son liberados desde el núcleo de un átomo que contiene exceso de energía. Estos rayos, son radiación electromagnética originada en el núcleo del átomo. Al no poseer carga y masa, la emisión de estos rayos no

cambian la masa ó el número atómico del núcleo, pero éste se convierte en un núcleo más estable.

El rango de energía de estos rayos va desde miles de electrón-voltios (keV) hasta millones de electrón-voltios (MeV). Los isótopos más usados en radiografía son Iridio-192 (más de 20 diferentes rayos gamma, predominando 0.310 MeV), Celsio-137 (0.661 MeV) y Cobalto-60 (1.17 y 1.33 MeV).

Los rayos gamma poseen un alto poder de penetración, para interceptarlos se requiere materiales de blindaje pesados como el plomo, hormigón, etc.

3.1.4 Interacción de la Radiación con la Materia:

3.1.4.1 Ionización

Al interactuar partículas cargadas energéticamente directamente con un átomo, se producen pares de iones. Un ión (Fig. 20) es un átomo ó molécula en el cual el número total de electrones no es igual al de protones, dando al átomo una carga neta positiva ó negativa.

Estas partículas cargadas pueden:

1. impactar con electrones y removerlos de sus átomos;
2. transferir energía a un electrón del átomo por interacción de sus campos eléctricos.

Si la energía transferida no es suficiente para remover completamente al electrón, el átomo queda en un estado disturbado ó excitado.

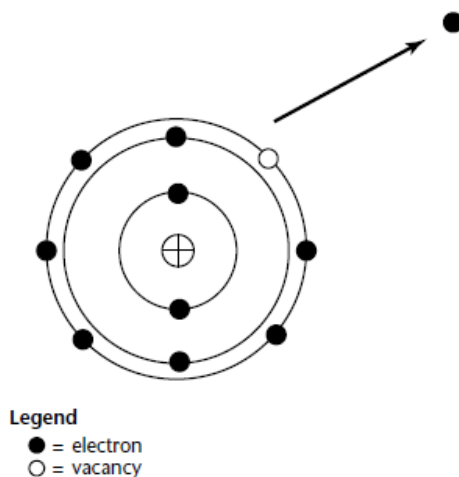


Figura 19. Ión (se muestra un electrón desplazado y el espacio que se genera)

Fuente: (Hellier, 2003)

3.1.4.2 Interacción de la Radiación con la Materia

Las tres principales formas de interacción de los fotones con la materia son:

1. efecto fotoeléctrico;
2. dispersión Compton;
3. producción de pares.

1.- Efecto fotoeléctrico.- En este tipo de interacción, el fotón transfiere toda su energía a un electrón de las capas más cercanas al núcleo. Si la energía del fotón es mayor a la energía de enlace del electrón; el electrón deja el átomo con una energía cinética " E_k ", esta energía es igual a la energía original del fotón " E_0 " menos la energía de enlace del electrón " E_b ".

$$(8) E_k = E_0 - E_b$$

La mayoría de radiación gamma contiene la energía suficiente para remover un electrón del átomo, es decir para ionizar al átomo.

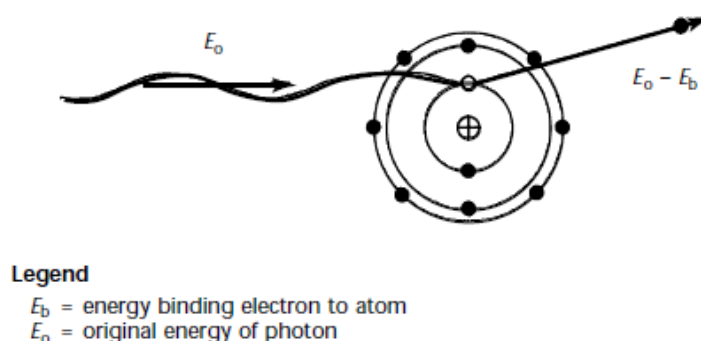


Figura 20. Efecto Fotoeléctrico (fotón incidente expulsa un electrón del orbital)

Fuente: (Hellier, 2003)

El efecto fotoeléctrico predomina cuando:

1. el material absorbente es de número atómico grande, por ejemplo el plomo;
2. la energía del fotón es menor a 1MeV.

Si la energía de enlace del electrón es mayor a la energía del fotón, el electrón es removido temporalmente a una capa superior.

2.- Dispersión Compton.- Cuando la energía del fotón sobrepasa los 0.5 MeV, la dispersión Compton se vuelve importante en la atenuación del haz de fotones.

Aquí, una parte de la energía inicial del fotón es redirigida, y otra parte es tomada como energía cinética de un electrón.

El efecto Compton se genera cuando un fotón impacta con un electrón del átomo transfiriéndole parte de su energía. El electrón es expulsado del átomo y la energía restante del fotón deja el átomo como un fotón de baja energía.

Usualmente el fotón de baja energía va dirigido en dirección diferente a la original, esta nueva dirección puede tener cualquier ángulo, incluso 180° respecto a la dirección original.

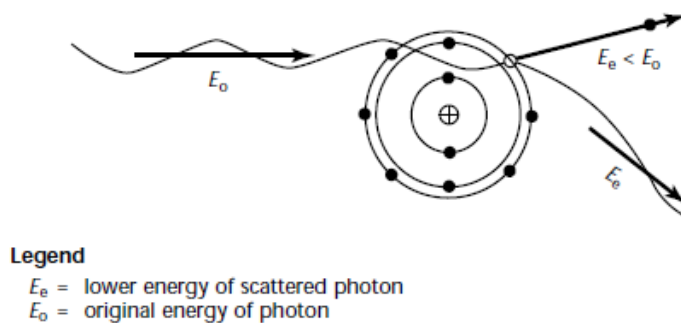


Figura 21. Dispersión Compton (fotón incidente expulsa un electrón y genera fotón de baja energía)

Fuente: (Hellier, 2003)

Este efecto es el que produce el empañamiento de las películas radiográficas y niveles de radiación más altos de los esperados fuera del rango del haz.

3.- Producción de pares.- El proceso de atenuación por producción de pares se genera cuando el fotón tiene una energía de 1.02 MeV. Los fotones de alta energía que viajan cerca al núcleo (con un número atómico alto) pueden convertirse en dos pares de partículas: un electrón y un positrón.

La razón para que esto suceda a los 1.02 MeV es porque al no tener una carga el fotón, debe convertirse en un par de partículas iguales que tengan cargas diferentes para conservar la neutralidad. La energía necesaria para que un fotón se convierta en electrón ó positrón es de 0.51 MeV para cada uno.

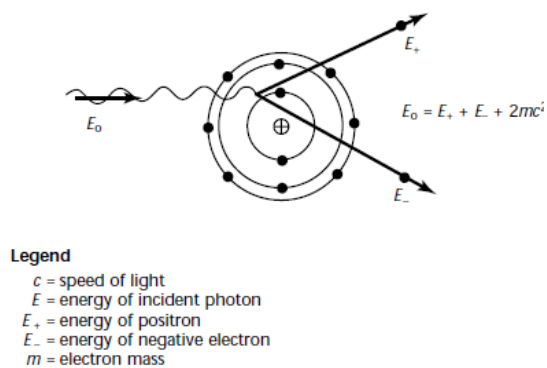


Figura 22. Producción de pares (electrón y positrón de un fotón incidente)

Fuente: (Hellier, 2003)

Gran parte de la energía de los fotones exceden los 1.02 MeV, por lo tanto la probabilidad de generación de este proceso aumenta. Mientras más grande es el número atómico del absorbedor, habrá mayor probabilidad de que se exista producción de pares.

3.1.4.3 Unidad de Exposición “Roentgen”

La exposición (intensidad de radiación), es la medida de la ionización producida en el aire por los rayos gamma. La unidad original Roentgen (**R**), representa la cantidad de radiación que ioniza 1cm^3 de aire, transformándolo a 1 unidad electrostática de carga.

En el SI, la unidad para medir esta exposición es el **Coulomb por Kilogramo**, se conoce que: $1R = 258 \mu\text{C} \cdot \text{Kg}^{-1} \text{ de aire}$. El Coulomb es la unidad de carga eléctrica, $1C = 1 A \times 1s$.

3.1.4.4 Atenuación de la Radiación

1.- Ley del inverso cuadrado.- Nos indica que la intensidad de la radiación “**I**” es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia “**d**” de separación a la fuente.

La fórmula utilizada en la aplicación de esta ley es:

$$(9) \quad I_1(d_1)^2 = I_2(d_2)^2$$

Donde, “**I**” es la intensidad de radiación a una distancia “**d**”.

La distancia es un factor muy importante en la disminución de la exposición de un radiólogo. Con el doble de distancia ($2d$) de separación a la fuente, la intensidad de la radiación es de $\frac{I}{4}$, con el triple de distancia ($3d$) es de $\frac{I}{9}$, con una distancia ($10d$) es de $\frac{I}{100}$ y así sucesivamente (Fig. 24).

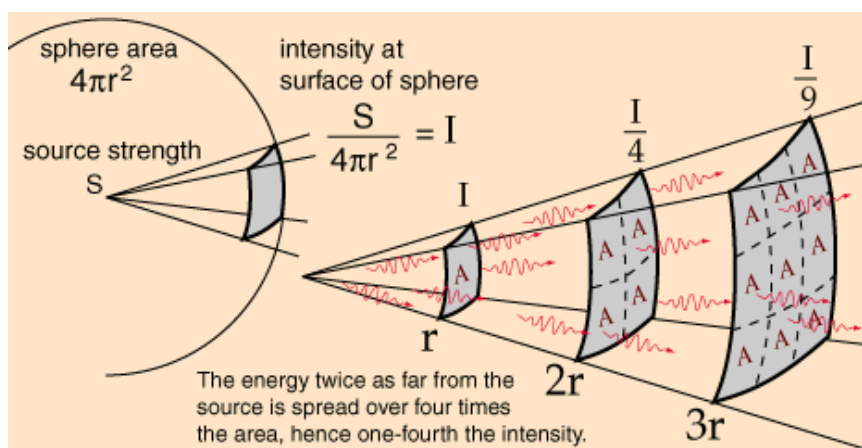


Figura 23. Ley del inverso cuadrado

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Esta intensidad de radiación generalmente está medida en sieverts por segundo ($\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$) ó miliroentgen por hora ($\text{mR} \cdot \text{h}^{-1}$).

El factor “ I_1 ” a una distancia “ d_1 ” generalmente es un valor conocido (Tabla 2), el cual se encuentra en tablas.

Tabla 2. Constantes de intensidad de iridio-192 y cobalto-60

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

Type of material	Specific gamma constant intensity per Ci at 0.3 m (1 ft)	Specific gamma constant intensity per 3.7 TBq at 0.3 m (1 ft)
Iridium-192	5.2 R/h	0.052 Sv/h
Cobalt-60	14.0 R/h	0.14 Sv/h

2.- Capa hemirreductora.- La atenuación de un haz fotones sigue una relación exponencial similar a la relación tratada en la vida media. La probabilidad de atenuación de un fotón por átomo, es la suma de las probabilidades de los 3 modos de atenuación (interacción con la materia) antes mencionados:

$$(10) \sigma = \sigma_{pe} + \sigma_{cs} + \sigma_{pp}$$

Donde, “ σ ” es el coeficiente de atenuación total por átomo, “ σ_{pe} ” es el coeficiente de absorción para interacción fotoeléctrica por átomo,” σ_{cs} ” es

el coeficiente para dispersión Compton por átomo, y “ σ_{pp} ” es el coeficiente de dispersión para producción de pares.

A pesar de que los coeficientes de atenuación son probabilidades por átomo, éstos **están expresados en cm^2** , por esta razón se los refiere como sección transversal.

La intensidad original del haz incidente en un espesor de material está relacionada con el haz transmitido a través de este espesor:

$$(11) I = I_0 e^{-n\sigma x}$$

Donde, “ I ” es la intensidad transmitida por el haz de fotones, “ I_0 ” es la intensidad original del haz de fotones, “ n ” es el número de átomos por centímetro cúbico, “ σ ” es la sección transversal atómica total (cm^2) por átomo, “ x ” es el espesor del absorbedor en centímetros.

Cambiando la fórmula (11) a su forma logarítmica:

$$(12) \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = n\sigma x$$

El espesor de material que reduce la intensidad del haz de radiación original a la mitad se lo conoce como “*capa hemirreductora*”. Este concepto se lo puede utilizar en el cálculo del blindaje necesario para reducir la intensidad de radiación ó para calcular la intensidad de radiación que atraviesa un espesor de un material determinado. En la siguiente tabla se indica valores de capa hemirreductora de materiales comunes.

Tabla 3. Valores de capa hemirreductora de materiales comunes

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Source	Energy (MeV)	Half Value Thickness (mm)		
		Lead	Iron	Concrete
Cobalt-60	1.17 and 1.33	12.5	22.1	68.6
Cesium-137	0.662	6.4	17.2	53.3
Iridium-192	0.34 average	4.8	—	48.3

3.1.5 Fuentes Radiactivas y Equipo de Manejo

3.1.5.1 Fuentes de Radioisótopos Comunes

A pesar de que existe gran variedad de radioisótopos, se descarta a muchos para ser usados en radiografía industrial, esto se debe a que: poseen una cantidad de energía indeseable, corta vida media, dificultad para manufacturarlos, costos elevados, etc.

Los radioisótopos más usados para la gammagrafía son solamente tres: cobalto-60, cesio-137, y iridio-192. En la siguiente tabla se muestra un resumen de las propiedades de los radioisótopos mencionados.

Tabla 4. Propiedades de tres radioisótopos comúnmente usados en gammagrafía

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Characteristics	Element		
	Cobalt-60	Cesium-137	Iridium-192
Half life	5.27 years	30.1 years	74.3 days
Chemical form	cobalt metal	in glass or ceramic	iridium metal
Density, g·cm ⁻³ (oz _m ·in. ⁻³)	8.9 (5.1)	3.5 (2.0)	22.4 (12.9)
Gamma energy (MeV) ^a	1.17 and 1.33	0.66	0.14 to 1.2 (average 0.34)
Abundance (gamma rays per disintegration)	1.0 and 1.0	0.92	1.47 to 0.27
Beta particles (MeV)	0.31	0.5	0.6
μSv·GBq ⁻¹ ·s ⁻¹ at 1 m (R·Ci ⁻¹ ·h ⁻¹ at 1 m)	364 (1.35)	105 (0.39)	148 (0.55)
Mass absorption coefficient for lead, mm ² ·g ⁻¹ (cm ² ·g ⁻¹)	4.8 (0.048)	11 (0.11)	33 (0.33)
Practical specific activity, TBq·g ⁻¹ (Ci·g ⁻¹)	1.85 (50)	0.93 (25)	13.0 (350)
Maximum source generally in use, TBq (Ci)	1.22 (33)	2.78 (75)	5.55 (150)
Uranium shield diameter, mm (in.)	380 (15)	200 (8)	120 to 130 (4.7 to 5.1)

a. See Fig. 2 for spectra.

1.- Cobalto-60.- Es producido mediante activación de neutrones, se bombardea pequeñas piezas de metal cobalto, usualmente de 1 a 2 mm de diámetro y de 1 a 2 mm de alto. Estas piezas son bombardeadas con neutrones, aproximadamente por 15 días, obteniendo así cobalto-60 con alrededor 2.2 GBq (60mCi) por cada pieza.

Usualmente cada pieza de cobalto-60, está en una capsulada de acero inoxidable soldada. Para prevenir pérdida de material radiactivo puede ser doblemente encapsulada (una cápsula dentro de otra).

El cobalto es un metal duro, gris y magnético; posee un punto de fusión a los 1480°C y una densidad de 8.9 g·cm⁻³, es relativamente libre de oxidación y ataque químico, bajo condiciones ambientales.

El cobalto-60 tiene una vida media de 5.27 años, y decae mediante la emisión de partículas beta y rayos gamma (Fig. 25). Generalmente es usado en la inspección de metales de peso medio como el hierro, latón, y cobre. El rango típico de aplicación para el acero son espesores desde 20 a 200 mm. También se puede utilizar Cobalto-60 para radiografiar otros metales de densidad mayor, ejemplo: Uranio.

El uso de este radioisótopo para radiografiar materiales de espesor delgado ó de baja densidad, da como resultado una pérdida de definición de las discontinuidades presentes, y el uso para espesores gruesos ó de alta densidad necesita largos tiempos de exposición.

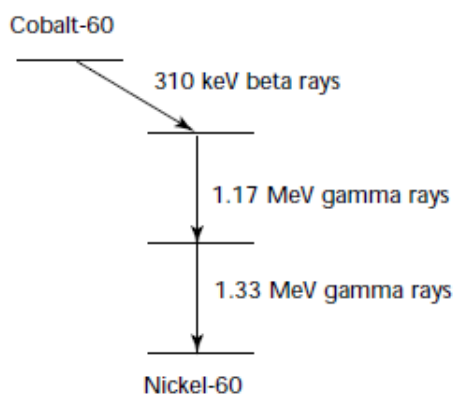


Figura 24. Desintegración del cobalto-60, con vida media de 5.27 años

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

2.- Cesio-137.- Originalmente se lo utilizaba en su forma de cloruro, pero esto inducía la cápsula de acero inoxidable a agrietarse por corrosión. Por este problema ahora se convierte al cloruro en vidrio ó cerámico antes de su encapsulación.

El cesio-137 es doblemente encapsulado, tiene una vida media de 30.1 años, este radioisótopo es menos usado que el cobalto-60 y el iridio-192 en gammagrafía. Se lo utiliza frecuentemente como fuente para medidores industriales de espesores y densidades.

Este material radiactivo es un fragmento de fisión del uranio-235, es uno de los productos más probables a obtenerse de la fisión nuclear. Con su

doble encapsulación se logra retener aproximadamente un 30% de intensidad de una fuente de 1850Gqb (50Ci).

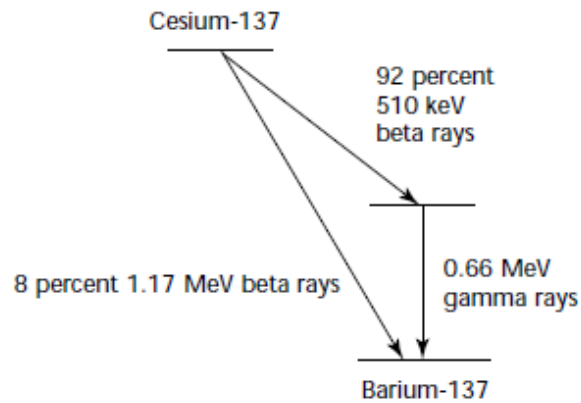


Figura 25. Desintegración del cesio-137, con vida media de 31 años

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

3.- Iridio-192.- Es el más usado en el campo de la gammagrafía, posee una vida media de 74.3 días. La energía gamma que emite esta fuente es muy útil para especímenes de acero delgado.

El iridio-192 es usado para radiografiar acero en un rango de espesores que va desde 3.2 a 76 mm (0.125 a 30 in). Debido a que tiene baja cantidad promedio de fotones requiere menor blindaje y permite la fabricación de equipos de exposición que pesan solamente 24Kg, caso contrario con el cobalto-60 ó el cesio-137, los cuales requieren equipos con ruedas para su transporte.

Este radioisótopo es producido mediante activación de neutrones en un reactor nuclear, se bombardea piezas de iridio-191 dando como resultado al iridio-192. Las piezas de iridio-192 que tienen 2 mm de diámetro y 1 mm de espesor tienen una actividad aproximada a 925 GBq (25 Ci), mientras que las de 3 mm de diámetro y 1 mm de espesor tienen una actividad alrededor de 1850 GBq (50 Ci), se necesita aproximadamente seis meses de bombardeo con neutrones para obtener estas actividades.

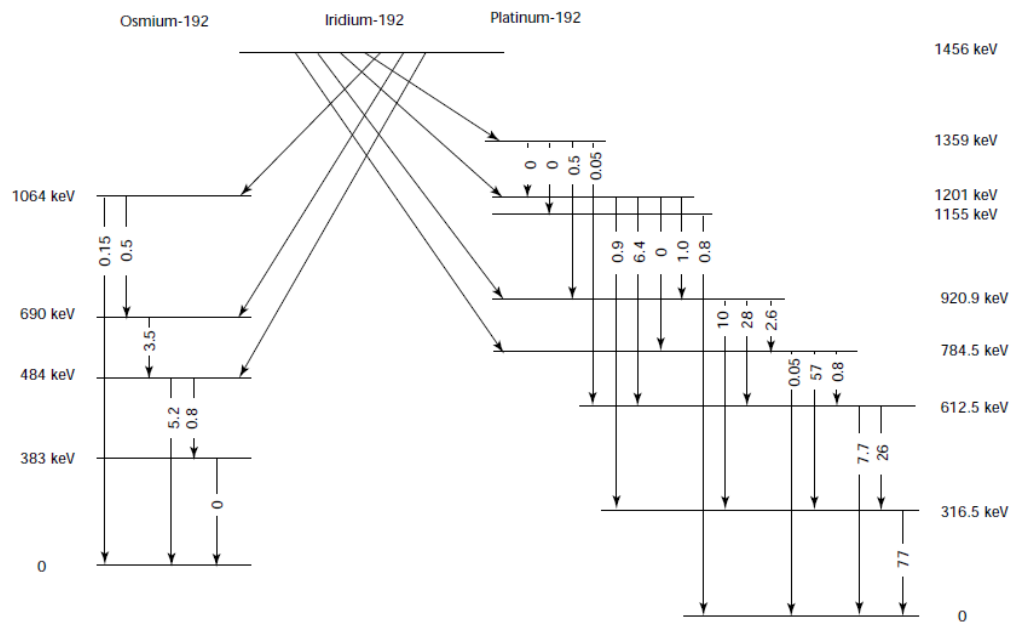


Figura 26. Esquema de desintegración del iridio-192. Los números en las flechas son números de rayos gamma por 100 desintegraciones

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

4.- Selenio-75.- Se lo usa limitadamente en Europa como remplazo del iridio-192, tiene una vida media de 120 días y un rango de energías gamma de 66 a 401 KeV. Provee una imagen de mejor calidad que el iridio-192 en especímenes delgados como tuberías, su equipo de exposición es relativamente liviano.

3.1.5.2 Equipo de Manejo de Fuentes

Para el manejo de fuentes se debe considerar los siguientes puntos:

1.- Encapsulación de las fuentes.- Todos los isótopos (fuentes) usados en gammagrafía deben estar encapsulados para prevenir pérdida de material radiactivo hacia el medio ambiente. El encapsulamiento del material radiactivo se lo realiza en cápsulas de acero inoxidable. Muchas veces se realiza un doble encapsulamiento, esto quiere decir que una vez depositado el material radiactivo dentro de la primera cápsula, se deposita a ésta dentro de otra cápsula también de acero inoxidable. Las cápsulas mencionadas son selladas mediante soldaduras.

El fabricante del equipo aplica ensayos de fuga y de integridad estructural a los contenedores mencionados anteriormente a fin de evitar fugas de material radiactivo.

El ensamble y la soldadura de las cápsulas se realizan en una celda especial llamada “celda caliente” (Fig. 28d), esta celda está blindada con muros de alta densidad y manipuladores remotos para el manejo de las piezas en este ambiente. Las ventanas de estas celdas calientes son fabricadas con vidrio de alta densidad, usualmente se deposita una solución acuosa transparente de sal inorgánica, contenida entre las capas frontal y posterior del vidrio.

La cápsula está conectada a un cable flexible (pigtail) ó fijada a un cilindro rotativo, para el manejo en el equipo de exposición. En la *Fig.28a* se indica un diagrama de una encapsulación doble, conectada al cable flexible para formar el pigtail.

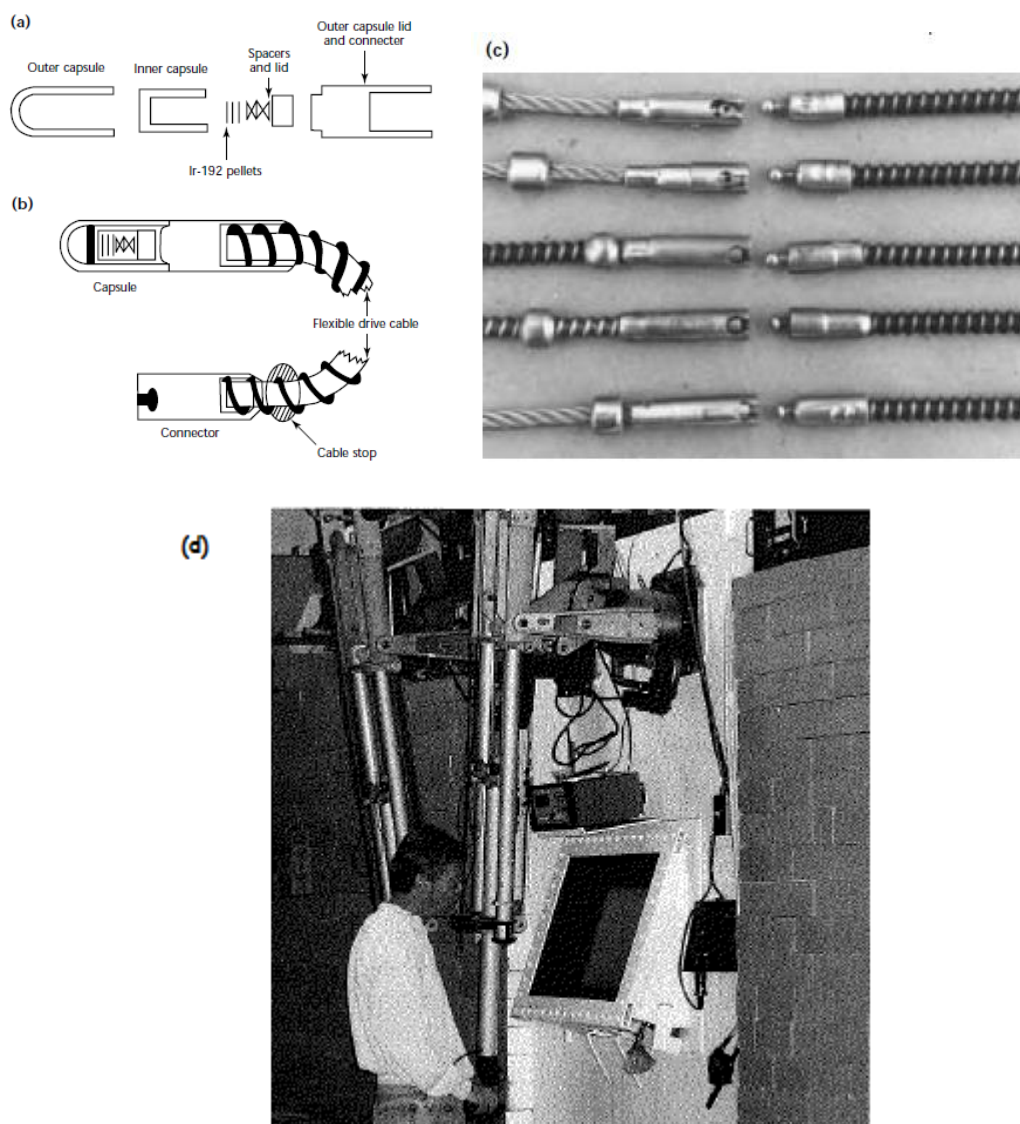


Figura 27. (a) diagrama de encapsulación doble, (b) diagrama del pigtail, (c) cables de manejo y pigtails fabricados por diferentes compañías, (d) celda caliente

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008), (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

2.- Equipos de exposición ANSI tipo I.- Los equipos ANSI tipo 1 para radiografía (Fig. 29) permiten exponer la fuente moviéndola desde una posición blindada a través de un tubo guía hacia una posición distante fuera del blindaje.



Figura 28. Equipo de exposición ANSI I junto con la manivela y el tubo guía

Fuente: (QSA GLOBAL, 2009)

La Fig. 30 ilustra diagramas de equipos de exposición utilizando cables conductores para operarlos, estos cables son manejados mediante una manivela ó comando.

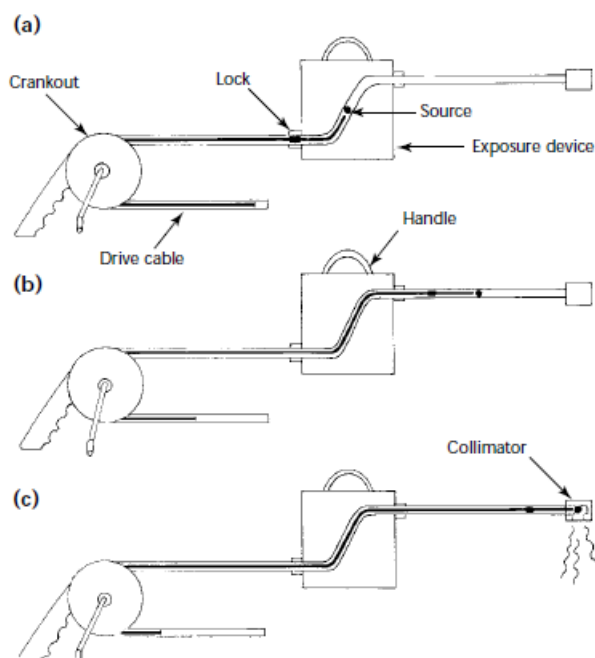


Figura 29. Equipo de exposición ANSI I, (a) posición de blindaje, (b) fuente en tránsito, (c) posición de exposición

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Las partes principales de estos equipos son:

1. un tubo rígido en forma de "S", resistente al desgaste, para guiar al pigtail a través del material de blindaje;
2. material de blindaje (generalmente se usa uranio empobrecido, puede contener tungsteno);

3. contenedor metálico para proteger y sostener al blindaje, tubo guía y otros componentes;
4. un seguro para prevenir movimientos accidentales de la fuente hacia el exterior desde su posición de blindaje ó para la remoción de la fuente al realizar un intercambio de fuente;
5. conectores para el cable guía y tubo guía;
6. protectores para los conectores;
7. agarradera para poder cargar el equipo de exposición, etiquetas de alerta é información para identificar al equipo.

En la Fig. 31 se observa un diagrama de un equipo de exposición ANSI tipo 1.

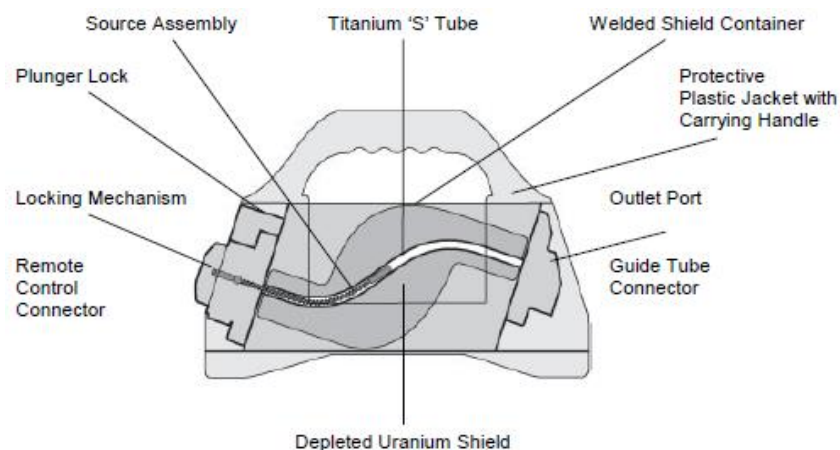


Figura 30. Equipo de exposición ANSI I, (a) posición de blindaje, (b) fuente en tránsito, (c) posición de exposición

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

El tubo con forma de “S” es fabricado con titanio ó con aleaciones de circonio debido al constante movimiento de la fuente dentro del tubo para su exposición; el titanio es un material resistente al desgaste.

Se utiliza uranio empobrecido como blindaje ya que brinda una alta capacidad de blindaje por unidad de masa, inclusive más que el plomo. La mayor parte de la radiación emitida por el uranio es radiación alfa, la cual es detenida con el contenedor metálico.

La capacidad del uranio para blindar radiación nos permite fabricar este tipo de equipos, los cuales pueden ser portados a mano, con una considerable disminución de peligro de radiación, también nos brinda mayor protección contra el fuego comparándolo con el plomo.

El contenedor de metal es fabricado con espesores gruesos de aluminio ó acero inoxidable, esto es para prevenir la rotura de los seguros ó de los conectores, lo cual podría permitir que la cápsula contenedora de la fuente salga del equipo accidentalmente.

Todos los equipos de exposición requieren un sistema de bloqueo. Un requerimiento regulatorio es que el seguro no puede ser abierto a menos que el cable guía esté conectado al pigtail. Si el cable guía no está conectado al pigtail, éste podría sacar a la fuente hacia al final del tubo guía para realizar la exposición, pero al regresar el cable guía la fuente quedaría fuera del equipo de blindaje. El seguro debe bloquear automáticamente a la fuente cuando ésta regresa a su posición de almacenamiento. Si el equipo está bloqueado, la fuente no podrá salir a su posición de exposición.

El agarre del equipo es fabricado de plástico, simplemente nos sirve para poder transportar al equipo a mano. El tubo guía es el encargado de transportar la fuente desde su posición de blindaje hacia su posición de exposición. La parte final del tubo guía es una punta metálica, que alinea la fuente para la exposición.

Un colimador (Fig. 32) puede ser añadido al final del tubo guía, esto a fin de reducir la radiación en todas las direcciones, y enfocar el haz solamente hacia donde lo necesitamos.

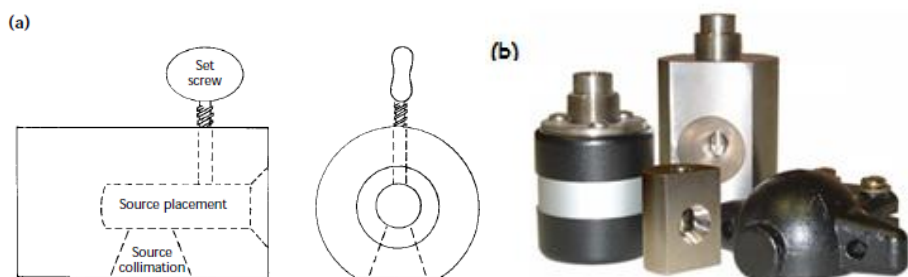


Figura 31. (a) Diagrama de colimador, (b) diferentes tipos de colimadores

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008), (QSA GLOBAL, 2009)

La capacidad de estos equipos de exposición va desde los 4.4 a los 5.5 TBq (120 a 150 Ci), para el iridio-192. Los sistemas de exposición de cobalto-60 no son portables a mano, pero pueden ser transportados por equipos con ruedas (Fig. 33).



Figura 32. Equipos de exposición para cobalto-60

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008), (QSA GLOBAL, 2008)

3.- Equipos de exposición ANSI tipo II.- En los equipos de exposición ANSI tipo II, la cápsula que contiene la fuente se mueve, desde su posición de almacenamiento en el centro de un contenedor blindado, hacia la superficie exterior del blindaje (Fig.34).

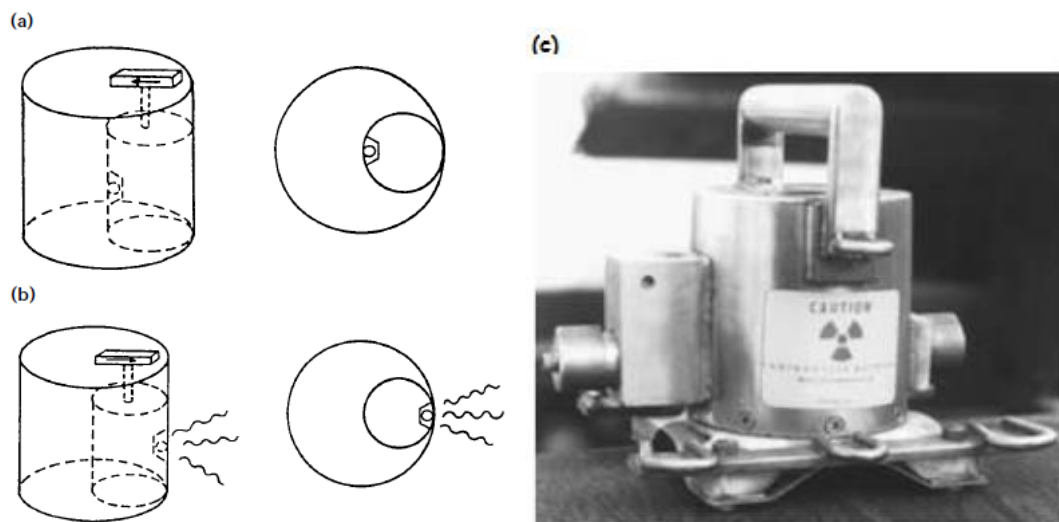


Figura 33. (a) Posición de blindaje, (b) posición de exposición, (c) equipo de exposición ANSI II

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

La rotación de 180 grados del cilindro excéntrico que contiene la fuente puede ser de dos maneras:

1. mediante un operador que se mantiene detrás del blindaje del equipo de exposición;
2. mediante un cable guía manejado con una manivela ó comando.

Como material de blindaje se utiliza Uranio empobrecido, como se mencionó antes, el uranio tiene una capacidad de blindaje por unidad de masa mayor a la del plomo. Un blindaje de plomo para una fuente de iridio-192 pesa alrededor de 30 Kg mientras que el de uranio pesa 20 Kg.

El cilindro excéntrico es fabricado con tungsteno, éste puede ser maquinado más fácilmente que el uranio empobrecido. Todo el conjunto está dentro de un contenedor de acero inoxidable, incluyendo su agarre. Estos equipos también tienen un sistema de bloqueo para prevenir la rotación de la fuente hacia la posición de exposición. Pueden llevar fuentes de iridio-192 de 3.7 TBq (100Ci).

El intercambio de la fuente se lo debe realizar en una celda caliente.

4.- Equipo para cambio de fuentes.- Cuando las fuentes de vida corta, como el iridio-192, han decaído a un nivel no apto para su uso, éstas deben ser cambiadas.

En la Fig. 35 se muestran fotos del equipo para cambio de fuentes. Tanto el equipo de exposición como el equipo de cambio deben estar desbloqueados para poder realizar el cambio de la fuente radiactiva vieja por la nueva.

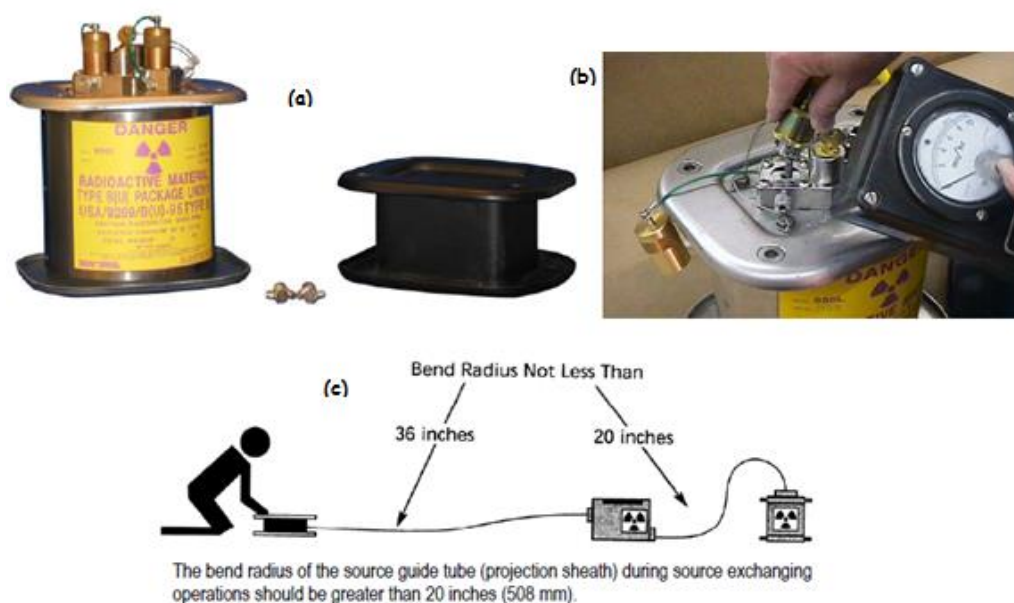


Figura 34. (a) Contenedor de fuente nueva, (b) intercambio de fuentes, (c) esquema del cambio de fuentes

Fuente: (QSA Global, 2007)

3.1.6 Técnicas de Exposición

3.1.6.1 Técnica de pared Simple

En esta técnica de exposición, la radiación pasa solamente a través de una de las paredes soldadas, la cual posteriormente es revisada para su aceptación en la radiografía. A continuación se muestra los posibles arreglos para aplicar esta técnica:

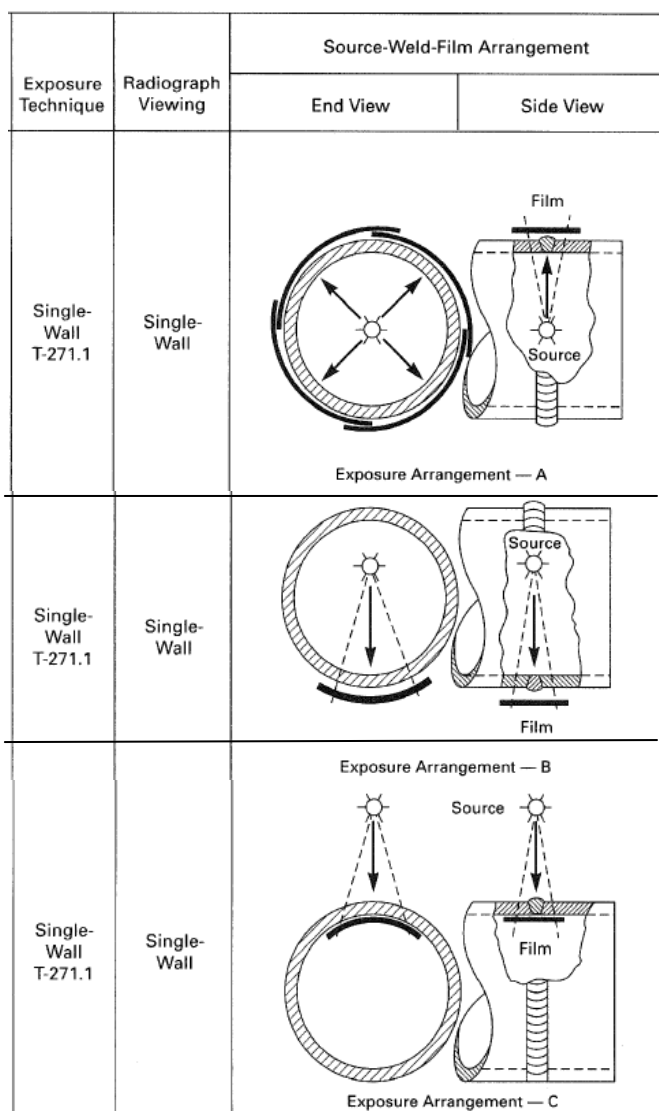


Figura 35. Arreglos posibles al aplicar técnica de pared simple

Fuente: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

3.1.6.2 Técnica de Pared Doble

Cuando la técnica de pared simple no es aplicable, se debe usar una de las siguientes técnicas de pared doble:

(a) Visualización de pared simple: Para materiales y soldaduras en componentes. En esta técnica la radiación pasa a través de dos paredes, solamente la soldadura que se encuentre en el lado que está ubicada la película será revisada para su aceptación en la radiografía. Cuando se requiere una cobertura completa, en una soldadura circunferencial, se debe

tomar un mínimo de tres tomas cada 120 grados entre sí. En la siguiente figura se puede observar los posibles arreglos de esta técnica:

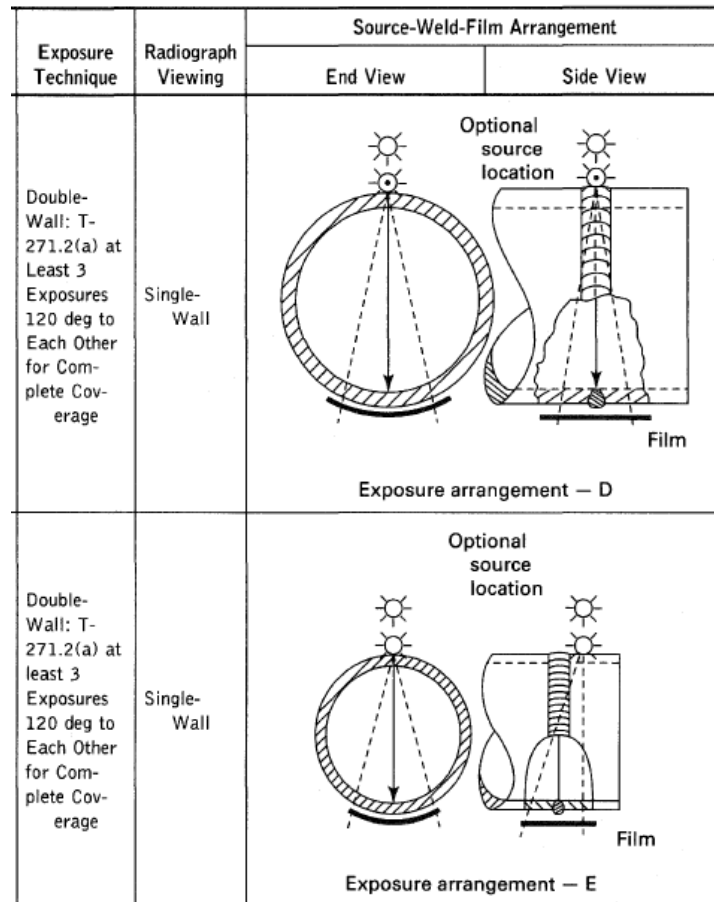


Figura 36. Técnica de pared doble – visualización de pared simple

Fuente: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

(b) Visualización de pared doble: Para materiales y soldaduras en componentes de $3 \frac{1}{2} \text{ in}$ (89mm) ó de diámetro nominal exterior inferior. En esta técnica la radiación pasa a través de dos paredes. La soldadura de ambas paredes será revisada para su aceptación (en la radiografía). Se debe aplicar mucho cuidado para asegurar que la falta de nitidez (borrosidad) en la imagen no exceda. Si la falta de nitidez no cumple con los requerimientos, la técnica de visualización de pared simple debe ser aplicada. (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

En la visualización de pared doble se debe tomar en cuenta:

(1) Para soldaduras, el haz de radiación no debe estar alineado con el plano de soldadura, debe tener un ángulo suficiente para separar las imágenes del lado de la fuente y del lado de la película de la soldadura, para que de este modo no haya una superposición en las áreas que serán interpretadas. Cuando se requiere una cobertura completa, se debe tomar un mínimo de dos tomas cada 90 grados entre sí, por cada junta. (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

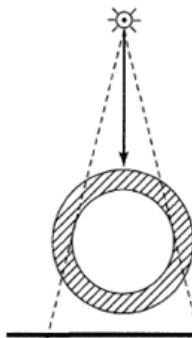
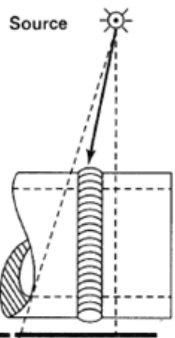
O.D.	Exposure Technique	Radiograph Viewing	Source-Weld-Film Arrangement	
			End View	Side View
3½ in. (88 mm) or Less	Double-Wall T-271.2(b)(1) at Least 2 Exposures at 90 deg to Each Other for Complete Coverage	Double-Wall (Ellipse): Read Off-set Source Side and Film Side Images		

Figura 37. Técnica de pared doble – visualización de pared doble

Fuente: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

(2) Como una alternativa, la soldadura puede ser radiografiada con el haz de radiación alineado a ella, de este modo las imágenes de ambas paredes estarán superpuestas. Cuando se requiere una cobertura completa, se debe tomar un mínimo de tres tomas cada 60 grados ó 120 grados entre sí, por cada junta. (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

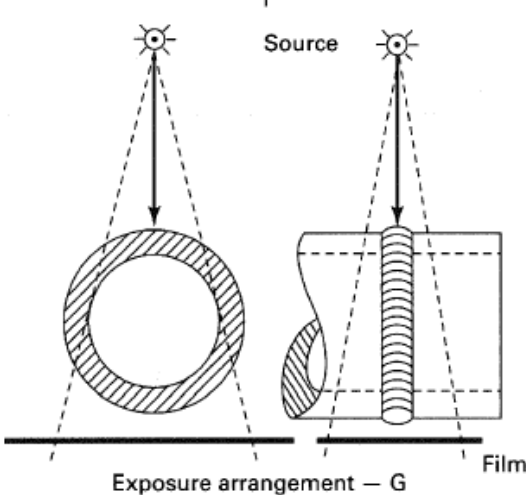
O.D.	Exposure Technique	Radiograph Viewing	Source-Weld-Film Arrangement	
			End View	Side View
3½ in. (88 mm) or Less	Double-Wall: T-271.2(b)(2) at Least 3 Exposures at 60 deg or 120 deg to Each Other for Complete Coverage	Double-Wall: Read Super-imposed Source Side and Film Side Images		

Figura 38. Técnica de pared doble – visualización de pared doble (alternativa)

Fuente: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

(3) Tomas adicionales deben ser realizadas, si la cobertura radiográfica requerida no puede ser obtenida usando el número mínimo de exposiciones indicadas en (1) y (2). (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

3.1.7 Principios de Seguridad Radiológica

3.1.7.1 Control de la Exposición del Personal

La exposición del personal ocupacional debe estar sujeta a límites de dosis ó a un control de riesgo en los casos de exposiciones potenciales, de forma que ningún individuo esté sometido a dosis que se consideren inaceptables.

El principio de limitación de dosis establece que la dosis en los individuos expuestos a radiaciones ionizantes, como consecuencia de la interacción con fuentes de exposición (excluyendo la radiación natural y las dosis recibidas como pacientes médicos), no deben superar los límites establecidos.

La máxima dosis equivalente permisible para la irradiación del todo el cuerpo es de 50 mSv (5 rem) en un año. La Comisión de Regulación Nuclear ha restringido para sus licencias la tasa anual de dosis que puede ser recibida durante un año, dividiéndola en cuartos. Esta máxima dosis y sus límites para diferentes partes del cuerpo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Dosis máxima permitida por cuartos de año calendario (3 meses), para irradiación de todo el cuerpo

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Radiation Workers	Dose per Quarter ^a	
	mSv	(rem)
Whole body; head and	12	(1.25)
Active blood forming organs	12	(1.25)
Lens of eyes	12	(1.25)
Gonads	12	(1.25)
Hands and forearms ^b	188	(18.75)
Feet and ankles	188	(18.75)
Skin of whole body	75	(7.5)

a. These numbers are obtained by dividing annual doses of 5, 75 and 30, respectively, by 4.

b. All reasonable efforts should be made to keep exposure of hands and forearms within the general limit for skin.^{2,15-18}

El personal ocupacionalmente no expuesto, no deberá recibir más de 1.0 mSv (0.1 rem) en todo el cuerpo, en el periodo de un año.

A continuación se hablará de cuatro conceptos muy importantes en lo que respecta a seguridad radiológica:

1.- Dosis absorbida.- Es la cantidad de energía depositada en un lugar específico de interés del material irradiado, por efecto de las radiaciones ionizantes por unidad de masa.

El Roentgen (**R**) es una medida de intensidad, pero no representa la dosis absorbida por el material. La dosis de radiación absorbida (**rad**) fue creada para mediar éste valor.

En el sistema internacional de unidades SI, la unidad para medir la dosis de radiación absorbida es el gray (**Gy**), se conoce que 1 gray equivale a 100 rad.

Esta unidad de medida es útil ya que se la aplica para medir dosis absorbidas en una localización en particular del cuerpo absorbente. Se la representa mediante la letra mayúscula “D”.

2.- Dosis equivalente.- Se la representa con la letra “H”, es una cantidad usada para protección radiológica, se la expresa en una escala común para toda la irradiación incurrida en las personas expuestas.

La unidad de dosis equivalente en el SI es el sievert (**Sv**), 1 sievert es igual a 100 rem. El sievert es similar al gray, la diferencia es que éste incluye factores de calidad, estos factores dependen del tipo de radiación. Las dimensiones del sievert y del gray son las mismas ($J \cdot Kg^{-1}$).

3.- Factor de calidad.- Es un factor usado en la determinación de la dosis equivalente. El factor de calidad corrige la dependencia de factores biológicos en la energía y el tipo de la radiación. Para propósitos prácticos se utiliza los factores de calidad indicados en la siguiente tabla:

Tabla 6. Factores de calidad para radiación

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Radiation Type	Quality Factor ^a
X-rays	1
Gamma rays	1
Beta rays	1
Neutrons	2 to 11 ^b
Neutrons of unknown energy	10
High energy protons	10
Alpha particles	20
Multiple charged particles	20
Fission fragments	20
Heavy particles of unknown charge	20

a. Value of quality factor at point where dose equivalent is maximum in 300 mm (12 in.) diameter cylinder tissue equivalent phantom.

b. Quality factor depends on energy of neutron.

Por ejemplo, consideremos una dosis absorbida en los cristalinios del ojo de 1 mGy (0.1 rad) de una fuente de neutrones de 2 MeV. La dosis equivalente es:

$$(13) H = [dosis \text{ en miligray}] \times [factor \text{ de calidad}]$$

$$H = 1 \text{ mGy} \times 10$$

$$H = 10 \text{ mSv}$$

4.- Tasa de dosis.- Es la exposición ó la dosis absorbida que se recibirá, en condiciones constantes, por unidad de tiempo; se la suele expresar en roentgen por hora (**R/h**) ó en gray por hora (**Gy/h**).

5.- ALARA (as low as reasonably achievable).- Este es uno de los conceptos más importantes dentro de la seguridad radiológica, se refiere a que todas las personas que trabajen con fuentes radiactivas, deben realizar cualquier esfuerzo razonable para mantener los niveles de exposición tan bajos como sea posible. El término dosis permisible es un término solamente administrativo, principalmente para propósitos de planificación.

3.1.7.2 Concepto de Tiempo, Tiempo de Trabajo, Distancia y Blindaje

1.- Tiempo.- Mientras menor sea el tiempo cerca a la fuente radiactiva, menor será la dosis recibida. Por lo tanto se debe intentar estar el menor tiempo posible cerca de la fuente radiactiva. La dosis en función de la tasa de dosis y el tiempo viene dada por:

$$(14) \quad \text{dosis} = \text{tasa de dosis} \times \text{tiempo}$$

Si un medidor de radiación nos brinda una lectura de $50 \mu\text{Sv/h}$ (5mR/h), entonces el radiólogo va a recibir una dosis de $50 \mu\text{Sv}$ (5 mrem) en una hora, $0.1 \mu\text{Sv}$ (10 mrem) en 2 horas, $0.15 \mu\text{Sv}$ (15 mrem) en 3 horas y así sucesivamente.

2.- Tiempo de Trabajo.- Representa el tiempo permisible en horas por semana de trabajo, para una tasa de dosis dada. Se lo puede calcular con la siguiente fórmula:

$$(15) \quad \text{tiempo de trabajo}$$

$$= \frac{\text{dosis ocupacional permisible por semana}[\mu\text{Sv} \cdot \text{semana}^{-1}]}{\text{tasa de exposición}[\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}]}$$

tiempo de trabajo[$h.semana^{-1}$]

3.- Distancia.- Incrementar la distancia entre la fuente y el usuario va a reducir la cantidad de radiación recibida. La radiación emitida por la fuente pierde intensidad mientras se aleja de la fuente. Mientras más cerca estamos de la fuente, más radiación se recibe. En la Fig. 40 podemos apreciar el efecto mencionado, esto se debe a la ley del inverso cuadrado mencionada anteriormente.

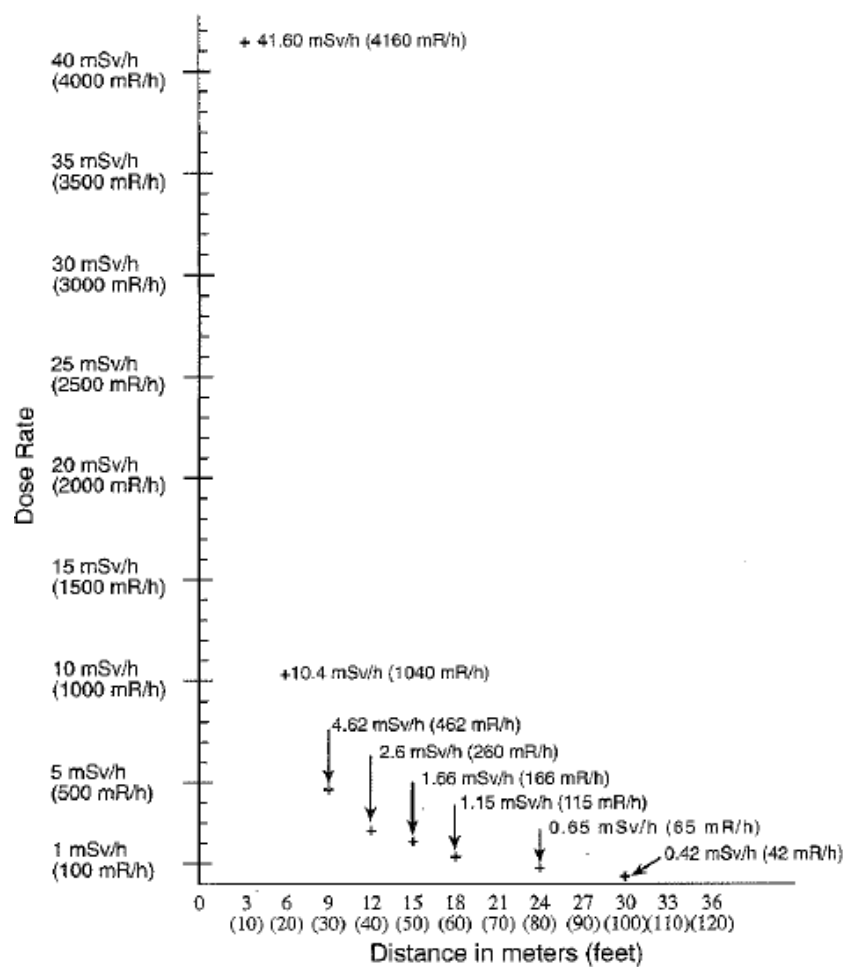


Figura 39. "Tasa de dosis" vs "distancia", usando una fuente de Iridio-192 con 3TBq (81 mCi)

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

Para calcular una distancia segura de trabajo podemos utilizar la ecuación (9) de la sección 3.1.4.

Existen gráficas muy útiles al momento de trabajar con radioisótopos conocidos, en las cuales se indica la tasa de exposición a varias distancias desde la fuente. En la siguiente figura se muestra un ejemplo.

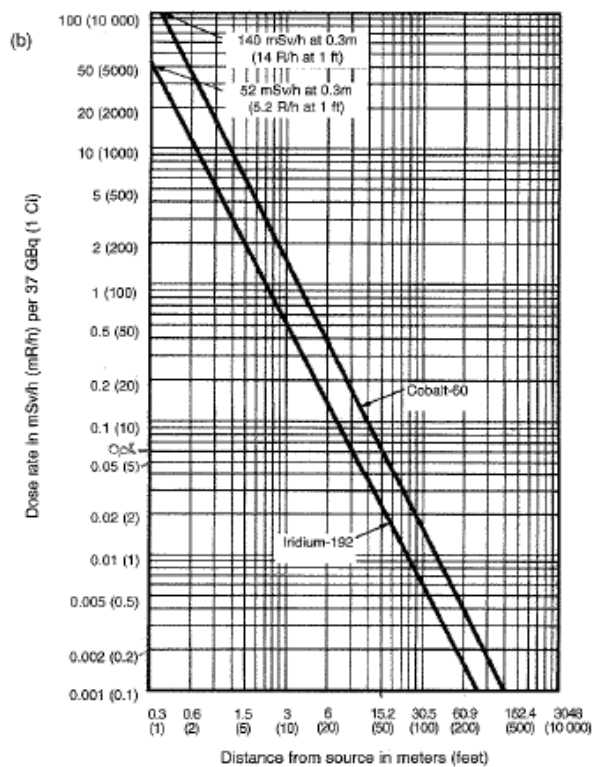
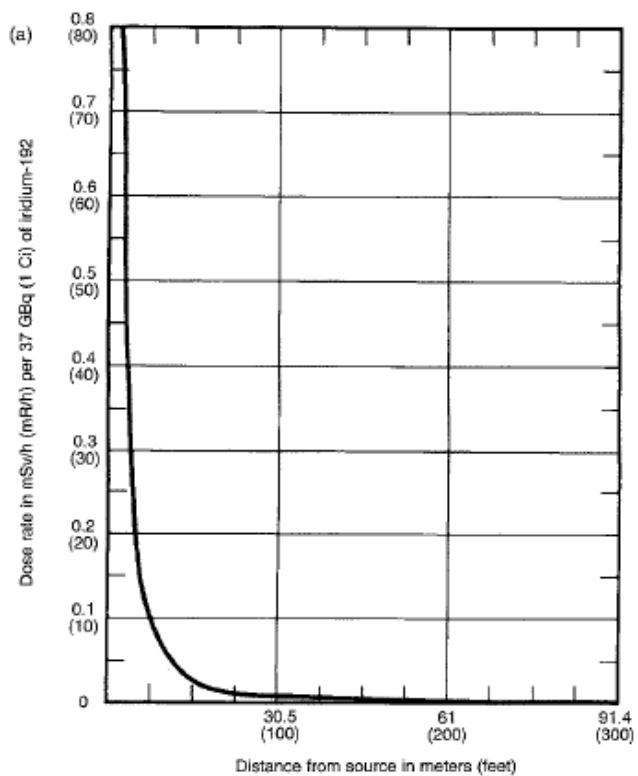


Figura 40. (a) “Tasa de dosis” vs “distancia”, usando una fuente de Iridio-192 con 37GBq (1 Ci), (b) misma gráfica en escala logarítmica.

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

4.- Blindaje.- Otra de las maneras para reducir la dosis de radiación, es colocando algún material entre el usuario y la fuente radiactiva, con el fin de que éste absorba cierta cantidad de radiación. El material situado entre el usuario y la fuente, se lo llama blindaje.

Mientras más denso es un material, éste brindará un mayor blindaje. El material más efectivo para blindaje de rayos gammas es el uranio, pero también se utiliza tungsteno, plomo y acero, en ciertos casos se utiliza concreto, pero éste no es muy efectivo (se lo usa por su bajo costo y fácil construcción).

En la radiografía industrial, el uso más práctico de blindaje se lo puede apreciar en los *colimadores*. Los colimadores son piezas pequeñas de plomo, uranio ó tungsteno, las cuales rodean la fuente radiactiva absorbiendo gran parte de la radiación y enfocando el haz de radiación hacia el lugar donde lo necesitamos. Son fabricados de varios tamaños y formas, todo depende de la aplicación.

Los colimadores pueden lograr una reducción de dosis alrededor de 20 a 10000 veces para el iridio-192 y de 3 a 10 veces para el cobalto-60. (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

En ocasiones se requiere saber el espesor necesario para reducir la dosis recibida a la mitad, esto se lo conoce como “capa hemirreductora”. Existen gráficas para determinar la efectividad de diferentes espesores de material para blindaje. Gráficas de atenuación para rayos gamma con diferentes materiales son mostradas a continuación:

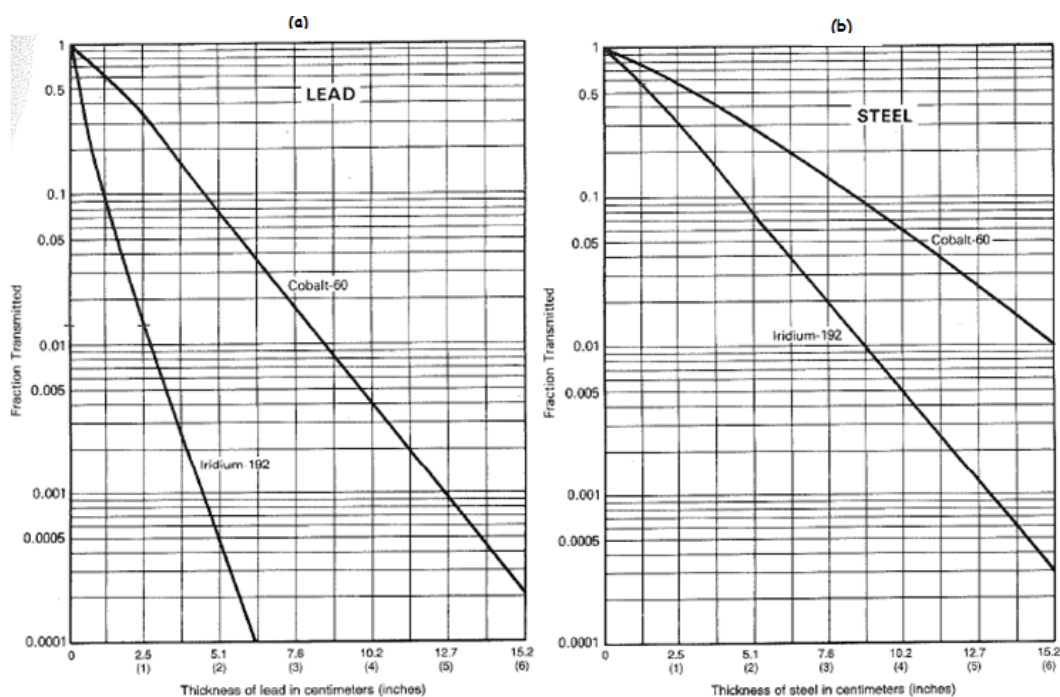


Figura 41. Gráficas de atenuación para rayos gamma (a) plomo, (b) acero

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

3.1.7.3 Equipo para Detección de Radiación

En la radiografía industrial se utiliza dos tipos de equipo para detectar y medir la radiación: (1) medidores de tasa de dosis, (2) medidores de dosis absorbida.

Con un medidor portable, el usuario podrá detectar la tasa de dosis ó la tasa de exposición a la que se encuentra sometida en ese momento. También se utiliza combinación de dosímetros de lectura directa con una alarma de tasa de dosis y dosímetros de película ó dosímetros termoluminiscentes (TLD). Los dosímetros registran la dosis total de radiación absorbida.

Los medidores de radiación leen en miliroentgen por hora (mR/h) para tasa de dosis, y los dosímetros miden miliroentgen (mR) para dosis. En el SI las unidades son millisievert por hora (mSv/h) para tasa de dosis y millisievert (mSv) para dosis.

3.1.7.4 Medición de Tasa de Dosis

Generalmente usa un tubo cilíndrico lleno con gas para detectar la radiación. El tubo se encuentra dentro de un contenedor, pero también puede estar conectado al contenedor por un cable eléctrico.

Los tubos llenos de gas, son usados en dos tipos de contenedores: (1) cámaras de ionización, (2) geiger-mueller.

Ambos dispositivos están calibrados para medir los rayos gamma utilizados en la radiografía. Los Geiger-mueller son los más usados porque son muy resistentes para trabajo en campo y muy sensitivos a pequeñas cantidades de radiación. Los medidores Geiger-mueller deben ser utilizados con mucho cuidado, cuando la intensidad de radiación es muy alta pueden no responder apropiadamente.

Altas intensidades de radiación pueden hacer que estos dispositivos se saturen, resultando que éstos entreguen una medida de cero.

Deben ser aptos para medir desde 0.02 mSv/h a 10 mSv/h (2mR/h a 1000 mR/h). En el siguiente gráfico se muestran varios modelos de medidores de tasa de dosis:

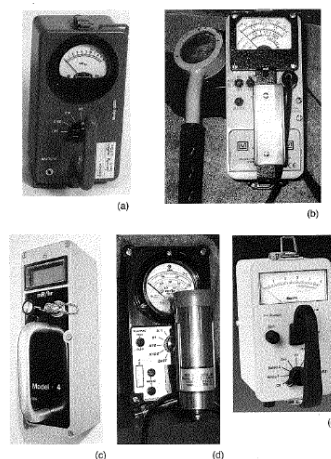


Figura 42. Varios modelos de medidores de radiación, (a) geiger-mueller, (b) medidor con detector externo, (c) medidor con alarma automática, (d) medidor con detector externo, (e) cámara de ionización

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

El principal uso de estos dispositivos es inspeccionar que la fuente radiactiva se encuentre en su posición de blindaje después de realizar una

toma radiográfica, esto a fin de evitar que la fuente quede fuera de su posición de blindaje, generando sobreexposiciones a lo usuarios.

3.1.7.5 Medición de Dosis

A pesar que los medidores de radiación, pueden medir la tasa de dosis continuamente, el personal que trabaja con una fuente radiactiva requiere llevar consigo dos equipos para medir la dosis recibida, un dosímetro de lectura directa y un dosímetro de película ó dosímetro termoluminiscente (TLD).

El usuario también debe portar una alarma de tasa de dosis, la cual emitirá un sonido cuando se encuentre en un campo de 5 mSv/h (500 mR/h), esta alarma es como un medidor de tasa de dosis.

El dosímetro de lectura directa provee un medida inmediata de la dosis recibida, el dosímetro de película ó el TLD debe ser procesado por el proveedor, para obtener un registro de la dosis recibida, éste es más preciso que el dosímetro de lectura directa.

Los dosímetros no remplazan a los detectores de tasa de dosis. El dosímetro no da ninguna alerta cuando se ha alcanzado altas dosis de radiación recibida.

1.- Dosímetro de bolsillo.- Básicamente es una cámara de iones llena con aire. Se los debe revisar en periodos que no excedan a los 12 meses para corregir su respuesta a la radiación. En la Fig. 44a se puede observar un dosímetro de bolsillo y una vista de su sección transversal.

Estos dosímetros son de lectura directa, una fibra de cuarzo es desplazada electrostáticamente cargándola con un voltaje aproximado de 200 V. Una imagen de la fibra es proyectada sobre en una escala dividida en segmentos (Fig. 44b) y se la puede mirara a través de un lente ubicado en uno de los extremos del instrumento. La escala generalmente suele tener divisiones cada 10mR.

Cuando el dosímetro está cargado completamente, la imagen de la fibra se encuentra en la posición de 0 en la escala. La exposición a la radiación del dosímetro, descarga la fibra permitiéndola regresar a su posición original.

Los dosímetros de bolsillo pueden tener una amplia escala de lectura, desde 1 a 50 mSv (100 mR a 5 R).

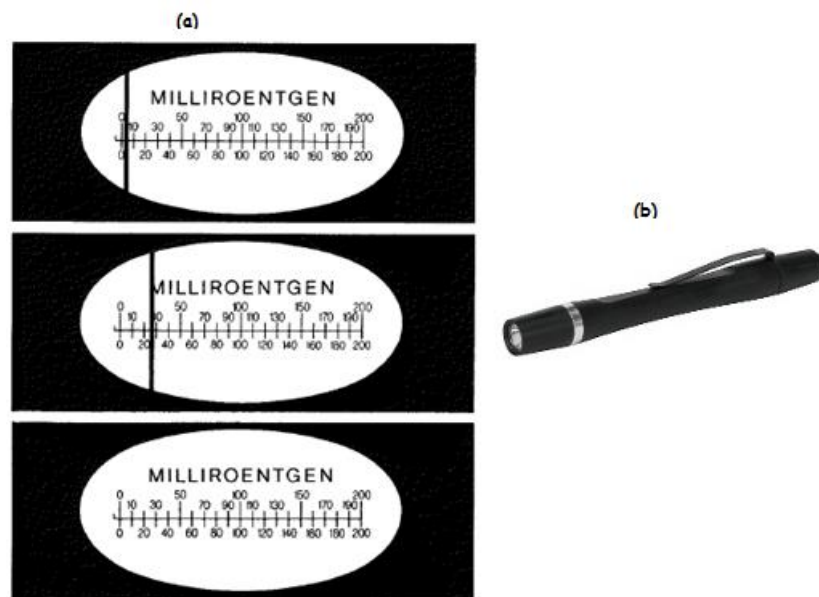


Figura 43. (a) Visión interior de un dosímetro tipo lápiz, (b) dosímetro tipo lápiz

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

2.- Dosímetro de película.- Este dosímetro contiene una pieza de película similar a la utilizada para realizar tomas radiográficas. Las radiaciones ionizantes oscurecen la película, mientras más oscura está la película, mayor es la dosis recibida.

Para producir una respuesta correcta, la película debe estar en colocada en una placa especialmente diseñada. La placa contiene absorbedores de metal ó filtros para indicar que tan penetrante fue la radiación, y entonces conocer si la exposición fue causada por alta ó baja energía de radiación. Con esta información la compañía proveedora puede calcular la dosis recibida por el usuario.

Los dosímetros de película son resistentes, pero pueden ser dañados por la luz, calor ó humedad, por este motivo se los debe usar solamente al momento de realizar el trabajo.

Si el papel que cubre la película es rasgado ó pinchado, la película será arruinada por la acción de la luz recibida. La película también se puede dañar al exponerla a altas temperaturas. Sumergir el dosímetro en agua ó lavarlos, también puede dañar la película.



Figura 44. Dosímetro de película

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

3.- Dosímetro termoluminiscente (TLD).- Son similares a los dosímetros de película en apariencia y pueden ser usados por los radiólogos en lugar de los dosímetros de película. Los TLD contienen materiales cristalinos que guardan la energía depositada por la radiación.

La energía depositada puede ser medida calentando el material cristalino y midiendo la energía que se libera como luz. Medidores especiales leen la cantidad de luz emitida.



Figura 45. Dosímetro TLD

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

No se los debe exponer a altas temperaturas ó a agua, podrían dañar al dosímetro.

4.- Alarma de tasa de dosis.- Son instrumentos que emitirán un fuerte sonido a una tasa de dosis prescrita de 5 mSv/h (500 mR/h). Pueden salvar potencialmente al radiólogo de recibir una tasa de dosis alta si el detector de tasa de dosis falla.

Algunas alarmas vienen incorporadas con sistemas de vibración y luces, para trabajos en zonas donde existe un alto nivel de ruido. Son calibrados anualmente y se los prueba antes de volver a utilizarlos.

No se debe sustituir a los medidores de tasa de dosis por estas alarmas.



Figura 46. Alarma de tasa de dosis

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2004)

3.1.8 Organismo Regulador en Ecuador

En Ecuador existe un organismo regulador encargado del control y de las aplicaciones nucleares dentro del país.

La subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) es la dependencia del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable que controla y regula el uso pacífico de las radiaciones ionizantes en el Ecuador. La SCAN ejerce sus funciones basada en reglamentación nacional y en las recomendaciones emitidas desde el Organismo Internacional de Energía Atómica, fomentando siempre el mantenimiento de altos estándares de

protección radiológica y seguridad física en las instalaciones donde se opera fuentes de radiación ionizante.

Como parte de las actividades de control, la SCAN emite Licencias a personas e instituciones, así como también autorizaciones para importación de fuentes de radiación ionizante.

La SCAN asesora a las instituciones que utilizan fuentes de radiación ionizante para prevenir riesgos y vigilar durante el desarrollo de sus actividades, se cumpla con las disposiciones legales y reglamentarias pertinentes. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador, 2014)

La SCAN brinda servicios técnicos de apoyo a la seguridad radiológica, como es el caso de: servicio de dosimetría personal, calibración de detectores de radiación, determinación de niveles de radiactividad en diversas matrices, entre otros.

A continuación se describe algunos servicios comúnmente utilizados por los usuarios de fuentes radiactivas para gammagrafía:

1.- Emisión de licencias institucionales de seguridad radiológica.- La licencia institucional de seguridad radiológica (licencia de operación) es el único documento que autoriza a una institución a poseer, operar y prestar servicios con fuentes de radiación ionizante (equipos de rayos X y/o fuentes radiactivas).

2.- Emisión de licencias de importación.- La licencia de importación es el único documento que autoriza a una institución a importar y comercializar en territorio nacional fuentes de radiación ionizante (equipos de rayos x y/o fuentes radiactivas).

3.- Autorización de importación de fuentes de radiación ionizante.- Cada vez que un importador autorizado va a importar fuentes de radiación ionizante debe solicitar la autorización para el ingreso al país de esa ese equipo y/o fuente radiactiva específicamente. Se lo realiza a través del ECUAPASS – Proyecto VUE.

4.- Autorización de movilización de fuentes radiactivas.- Este tipo de autorización se emite cuando una fuente radiactiva va a ser transportada y atravesará fronteras provinciales. Consiste en un sello que se estampa sobre la documentación habilitante presentada.

5.- Autorización de reexportación de fuentes radiactivas.- Este tipo de autorización se emite cuando una fuente radiactiva ya no va a ser utilizada y/o su propietario necesita enviarla fuera del país (por ejemplo a otra subsidiaria de la empresa). Se lo realiza a través del ECUAPASS – Proyecto VUE.

6.- Emisión de licencias personales de seguridad radiológica.- La licencia personal de seguridad radiológica (licencia ocupacional) es el único documento que autoriza a una persona a operar y/o manipular fuentes de radiación ionizante (equipos de rayos X y/o fuentes radiactivas).

7.- Capacitación en protección radiológica.- Cursos básicos de protección radiológica buscan capacitar al personal que trabaja expuesto a radiaciones ionizantes en protección radiológica.

8.- Autorización para oficiales de seguridad radiológica.- La autorización de oficial de seguridad radiológica es el documento que se otorga al profesional designado por el representante legal de la institución, quién será responsable de la protección radiológica y seguridad radiológica en esa instalación, luego de verificar su idoneidad (formación y capacitación).

9.- Calibraciones dosimétricas (equipos detectores de radiación, activímetros y sistemas de radiación).- Consiste en calibrar sistemas dosimétricos, equipos detectores de radiación y activímetros, en un laboratorio que cuenta con un patrón secundario para medidas de radiación.

10.- Gestión de desechos radiactivos y/o fuentes radiactivas en desuso.- Consiste en tratar (gestionar) y almacenar en forma segura los desechos radiactivos, material contaminado y/o fuentes radiactivas en desuso, provenientes de diferentes aplicaciones, en el caso exclusivo en que

no puedan ser retornadas a su lugar de origen (fabricante). Para mayor información visitar el sitio web del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador, sección biblioteca, sub-sección formularios para servicios en la SCAN.

3.2 Película Radiográfica

3.2.1 Principios de la Película Radiográfica

Una radiografía es un registro fotográfico producido por el paso de radiación penetrante a través de un objeto hacia película. Cuando la película es expuesta a rayos gamma, se produce un cambio invisible en la película llamado imagen latente, esta imagen es producida gracias a una emulsión que contiene la película.

A continuación de la exposición la película es sumergida en una solución reveladora, las áreas expuestas a la radiación se vuelven oscuras, el grado de obscurecimiento depende de la cantidad de exposición. A continuación del revelado la película es sumergida en una solución de fijador para detener el proceso de revelado y disolver las partes no expuestas de la emulsión de sal sensitiva. Finalmente la película es lavada para remover el fijador y secada, de este modo la película está lista para su interpretación.

El revelado, fijado y lavado pueden realizarse manualmente ó puede usarse equipo de procesamiento automático.

La radiografía es una especie de foto con sombras, las regiones más oscuras de la película representan las partes más penetrables del objeto mientras que las regiones más claras son regiones que opacaron más a la radiación gamma.

1.- Principios geométricos.- Debido a que los rayos gamma obedecen a las leyes comunes de la luz, la formación geométrica de la sombra será explicada en términos de luz. Supongamos que, como en la Fig. 48a, existe una luz desde el punto L que cae sobre una tarjeta blanca C y que un objeto opaco O está entre la luz de la fuente y la tarjeta. La sombra del objeto se proyectará en la superficie de la tarjeta.

Esta sombra proyectada por el objeto, mostrará un alargamiento porque la fuente es más pequeña que el objeto y el objeto no está en contacto con la tarjeta; el grado de alargamiento variará de acuerdo a las distancias relativas del objeto a la tarjeta y a la fuente de luz. Para una fuente más pequeña que el objeto, la ley que gobierna el tamaño de la

sombra será: el diámetro del objeto es al diámetro de la sombra como la distancia de la luz al objeto es a la distancia de la luz a la tarjeta.

Matemáticamente el *grado de alargamiento* puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$(16) \quad \frac{S_o}{S_i} = \frac{D_o}{D_i}$$

Donde, “ S_o ” = tamaño del objeto, “ S_i ” = tamaño de la sombra (ó imagen radiográfica), “ D_o ” = distancia de la fuente al objeto, “ D_i ” = distancia de la fuente a la superficie de la película.

El grado de nitidez de cualquier sombra (imagen radiográfica) depende del tamaño de la fuente y de la posición del objeto entre la fuente y la tarjeta. Cuando la fuente de luz no es punto sino una pequeña área, las proyecciones de sombra no tiene una forma perfecta (Fig. 48b a 48d) porque cada punto en la fuente genera su propia sombra del objeto y cada una de estas sombras sobrepuestas es ligeramente desplazada de las otras, produciendo una imagen definida débil.

Cuando la fuente es más grande que el objeto, como cuando hay una fisura, la sombra será más pequeña que el objeto.

La forma de la sombra también es afectada de acuerdo al ángulo que hace el objeto con los rayos de luz incidentes. Las desviaciones de la forma verdadera del objeto son conocidas como distorsión ó desalineación.

Las Fig. 48a hasta 48f, muestran el efecto de cambiar el tamaño de la fuente y cambiar la posición relativa de la fuente, el objeto y la tarjeta.

Para obtener una imagen nítida y una forma verdadera del objeto se puede concluir que:

1. la fuente debe ser lo más pequeña posible, tan cerca como un punto (comparar figura 48a y 48c);

2. la fuente de luz debe estar tan lejos como sea practico posible (comparar 48b y 48c);
3. la película debe estar tan cerca como sea posible del objeto (comparar 48b y 48d);
4. los rayos de luz deben ser direccionados perpendicularmente a la superficie de la película (comparar 48a y 48e);
5. El plano del objeto y el plano de la película deben estar paralelos (comparar 48a y 48f).

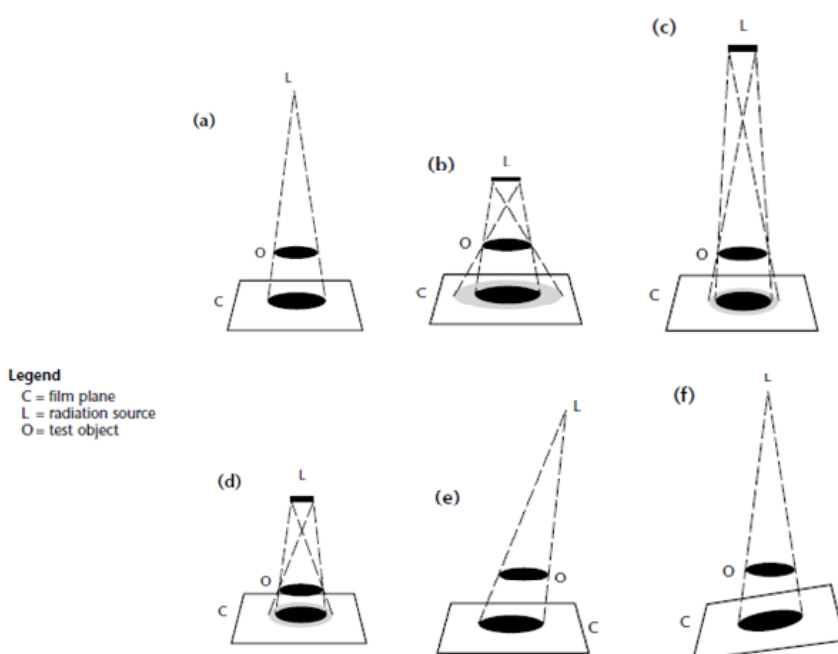


Figura 47. Principios geométricos de la formación de sombras: (a) planos del objeto y la película perpendicular a los rayos gamma desde la fuente pequeña, (b) perpendicular – fuente pequeña más cerca al objeto, (c) perpendicular - fuente pequeña más lejos del objeto, (d) perpendicular - fuente más grande, (e) oblicuo – planos paralelos del objeto y la película, fuente pequeña, (f) oblicuo - planos del objeto y película no paralelos, fuente pequeña

Fuente: (EASTMAN KODAK COMPANY, 1980)

2.- Definición (umbra geométrica).- Se refiere a la nitidez de la parte más oscura del esquema generado en la imagen. Depende del tipo de película utilizada, energía de radiación y el arreglo geométrico radiográfico.

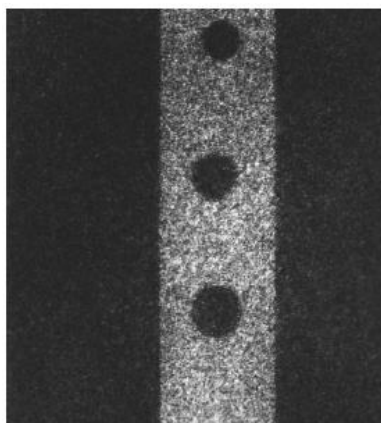


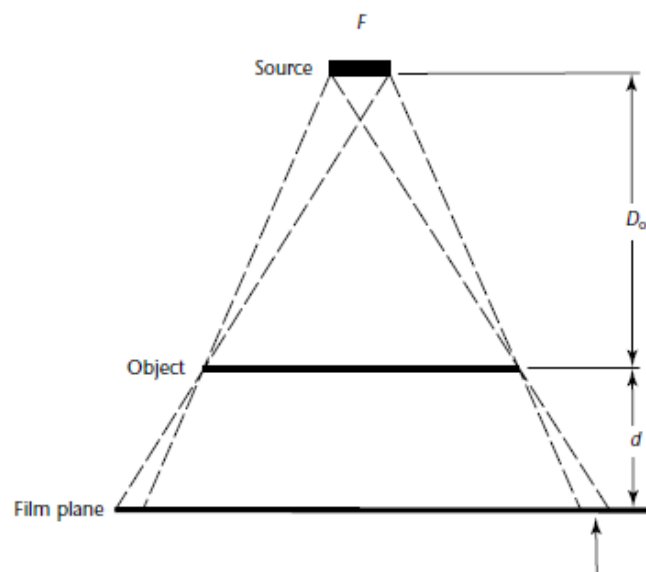
Figura 48. Umbra geométrica

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

3.- Penumbra geométrica.- El ancho de la imagen borrosa de la Fig. 48c y 48d es conocido como la falta de nitidez geométrica U_g . Esta falta de nitidez puede afectar fuertemente la apariencia de una imagen radiográfica, por ende es necesario calcular frecuentemente su magnitud. De las leyes de triángulos semejantes Fig. 50, obtenemos:

$$(2) \quad \frac{U_g}{F} = \frac{d}{D_0}$$

Donde, " D_0 " = distancia fuente a objeto," F " = tamaño de la fuente de radiación," d " = distancia fuente a película, " U_g " = falta de nitidez geométrica.



Legend

- D_o = source-to-object distance
- d = object-to-film distance
- F = radiation source
- U_g = geometric unsharpness

Figura 49. Construcción geométrica para determinar la penumbra geométrica (dónde la fuente es más pequeña que el objeto)

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Existen gráficas para tener referencia rápida del factor U_g , sin embargo debemos tomar en cuenta que cada tabla depende del tamaño de la fuente, a continuación se muestra un ejemplo de tabla para encontrar U_g :

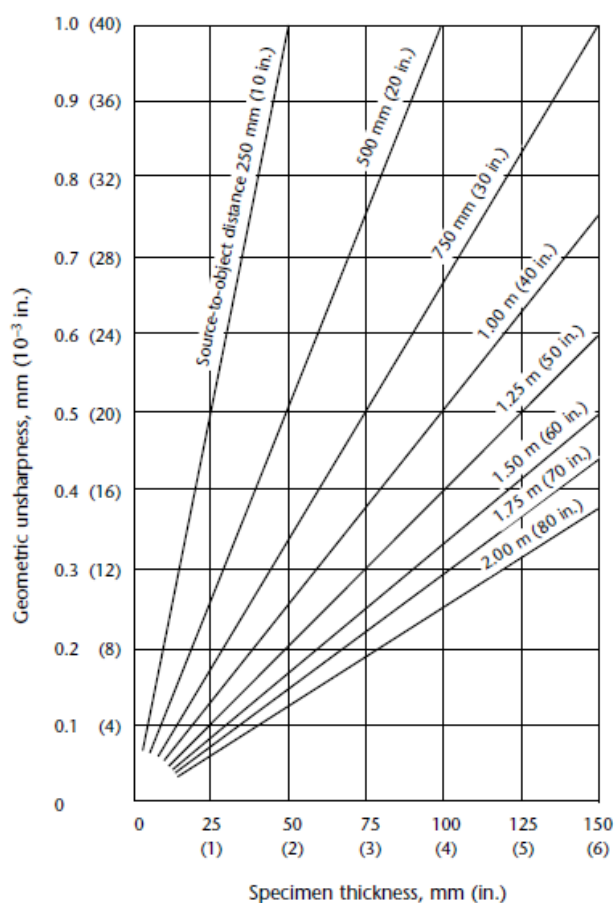


Figura 50. Gráfico que relaciona la penumbra con el espesor del espécimen, para una fuente de 5 mm (0.2 in) de tamaño

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

4.- Contraste radiográfico.- En la radiografía, las varias intensidades transmitidas por el espécimen son mostradas como diferentes densidades en la imagen. La diferencia de densidades de un área a otra constituye el contraste radiográfico.

Los detalles de la imagen son visibles gracias al contraste radiográfico. Dentro de límites apropiados, mientras mayor sea el contraste ó la diferencia de densidades en la radiografía se podrá apreciar mejor los detalles de la imagen. Sin embargo, si el contraste es demasiado alto puede existir una pérdida de visibilidad en los detalles de las regiones gruesas y delgadas del espécimen, dando una imagen muy blanca ó muy oscura.

El contraste radiográfico es el resultado del contraste del objeto y el contraste de la película; el contraste del objeto está gobernado por el rango de intensidades de radiación transmitidas por el espécimen. El contraste de

película se refiere a la pendiente de la curva característica de la película, depende del tipo de película y el tipo de procesamiento que ésta recibe.

5.- Sensibilidad radiográfica.- Es un término cualitativo que se refiere al detalle más pequeño que puede ser visto en la radiografía ó a la facilidad con la cual la imagen de los detalles pequeños puede ser detectada. La sensibilidad depende de dos factores independientes: la nitidez (definición) y del contraste. En la Tabla. 7 podemos observar los factores que controlan la sensibilidad radiográfica.

Tabla 7. Factores que controla la sensibilidad radiográfica

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Radiographic Contrast		Radiographic Definition	
Subject Contrast Affected by	Film Contrast Affected by	Geometrical Factors Affected by	Graininess Factors Affected by
Specimen thickness variations	Type of film	Focal spot size	Type of film
Radiation quality	Development time, temperature and agitation	Distance from focal point to film	Type of screen
Scattered radiation	Density	Distance from specimen to film	Radiation quality
	Activity of the developer	Abrupt specimen thickness variations	Development
		Contact of screen to film	

6.- Granularidad de la película.- La imagen radiográfica está formada por incontables granos de plata diminutos, estas partículas son tan diminutas que solamente se pueden apreciar a través de un microscopio. Sin embargo, estas partículas se agrupan y forman masas visibles al ojo. A estas masas se las llama granularidad.

Todas las películas presentan granularidad, ésta va desde un bajo a un alto grado; en general las películas lentas tienen un grado más bajo.

7.- Curva Característica.- También conocida como la curva sensitométrica, expresa la relación entre la exposición aplicada a material fotográfico y la densidad fotográfica resultante. En la siguiente figura se puede apreciar la curva característica de tres películas típicas.

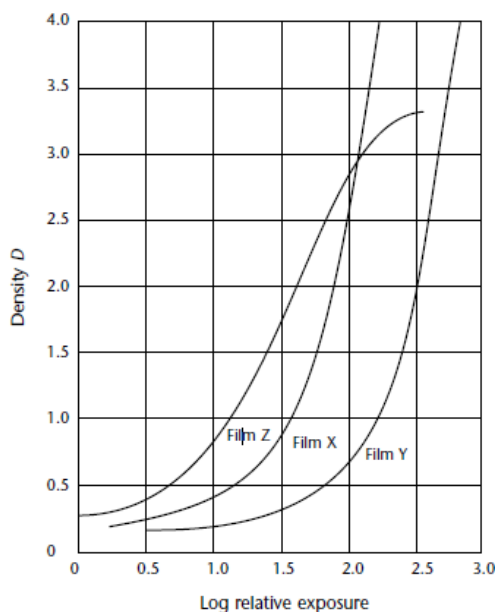


Figura 51. Curvas características de tres tipos de película que relacionan la “exposición vs “densidad fotográfica resultante”

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

3.2.2 Procesamiento de Película

3.2.2.1 Técnica de Cuarto Oscuro

El cuarto oscuro es un laboratorio dónde se mantiene un nivel de iluminación bajo, esto se logra diseñando un laboratorio hermético a la luz. Se suele utilizar filtros especiales de luz y focos de baja intensidad (color rojo). La razón para desear un laboratorio con baja iluminación, es porque la película radiográfica es sensible a la luz y ésta podría velar la película al ser revelada.

La película puede ser afectada por calor, luz, humedad, electricidad estática, presión, vapores químicos, radiación.

Hay dos puntos importantes a considerar:

1. los radiólogos deben asegurarse de obtener radiografías de excelente calidad. Las causas más comunes para obtener radiografías no deseadas son borrosidad, mala densidad, oscurecimientos. Varias formas de energía pueden velar la película al ser reveladas, una vez que se ha expuesto la

película a radiación está se vuelve al menos dos veces más sensible;

2. el cuarto oscuro existe porque el procesamiento de película debe realizarse de una manera muy precisa, es necesario cambiar la imagen latente formada por la exposición a imagen visible. El proceso se lo conoce como técnica de procesamiento de tiempo y temperatura.

Todo laboratorio debe ser diseñado de modo que se pueda limpiar fácilmente y que exista una correcta organización. El diseño del laboratorio puede ser de dos formas: procesado centralizado ó procesado descentralizado.

El proceso centralizado se refiere a que los procesos de preparación de película, revelado de película, lavado y secado de película se realizan en la misma habitación ó laboratorio, mientras que el proceso descentralizado ocupa distintas habitaciones para realizar estas operaciones.

Se debe diseñar al laboratorio en función de la conveniencia y la seguridad del usuario. Ahorrar pasos y tiempo al personal que trabaja en el laboratorio es aumentar la eficiencia de éste.

Al laboratorio se lo debe separar en dos áreas, una húmeda y otra seca. Estas áreas deben estar lo más distante posible. Se debe mantener las superficies de trabajo limpias y secas. También debe existir una adecuada ventilación para proveer aire fresco y limpio. En el siguiente gráfico se muestra un esquema ejemplo de laboratorio:

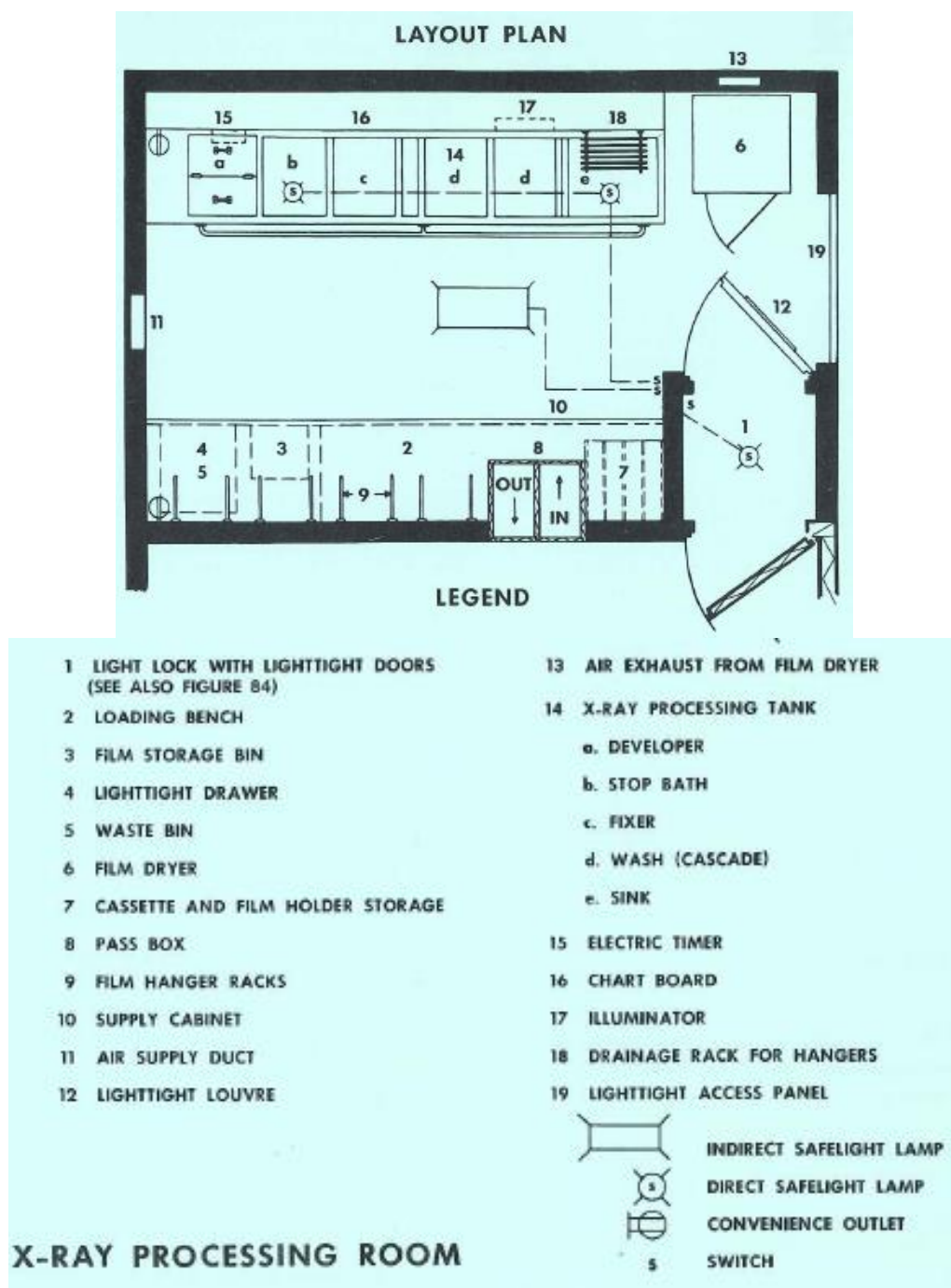


Figura 52. Esquema de laboratorio para revelado de película radiográfica

Fuente: (EASTMAN KODAK COMPANY, 1980)

A continuación se brinda breves conceptos a considerar dentro del cuarto oscuro:

1.- Iluminación.- El laboratorio debe contar con dos tipos de iluminación, luz blanca y luz de seguridad (roja). La luz blanca es deseable

para actividades de limpieza y mantenimiento, mientras que la luz roja se la utiliza en el proceso de revelado.

El exceso de exposición de la película a la luz de seguridad, podría velar la película, se debe recordar que la película expuesta, es mucho más sensible a la luz, es recomendable colocar luces de seguridad por encima de la mesa de trabajo y de los tanques de procesamiento.

2.- Ventilación.- La ventilación provee confort al personal que trabaja dentro del laboratorio, haciéndolo un lugar más agradable para trabajar. También nos ayuda a conservar temperaturas adecuadas dentro del laboratorio, ideales para el almacenamiento de la película.

Adicionalmente, nos ayuda a mantener el área libre de vapores químicos, que pueden resultar peligrosos para el personal que labora dentro del laboratorio.

3.- Mesa de trabajo.- Básicamente el área de proceso se divide en dos: área húmeda y área seca. Las actividades “secas” son la que se realiza con película que no se encuentra procesada, y son realizadas sobre la mesa de trabajo.

Esta mesa puede estar ubicada frente a los tanques de procesado ó en una habitación adyacente. Debe tener cajones para poder guardar los sujetadores de película, linternas de seguridad, cintas adhesivas etc.

4.- Tanques.- El procesado de revelado de película (revelado, fijado y lavado), es conocido como actividades “húmedas”. Estas actividades se las realiza en tanques de procesado, cada actividad se debe realizar en tanques diferentes.

Los tanques deben ser de un material resistente a la corrosión. La capacidad de procesado está determinada por el tamaño de los tanques.

A menudo se encuentran depósitos en los tanques de revelado debido a la acción entre las sales disueltas en el agua y el carbonato de la

solución de revelado, por este motivo es recomendable mantener los tanques limpios y lavarlos con agua regularmente.

5.- Radiación no deseada.- Debido a que la película es altamente sensible, ésta debe protegerse de exposiciones accidentales. Para el almacenamiento de película nueva (no expuesta), es recomendable mantenerla distante a la fuente de radiación, de este modo no obtendremos posibles imperfecciones en la película.

6.- Evitar estática.- La película podría presentar ciertas imperfecciones (marcas) si fue sometida a descargas eléctricas antes de ser revelada. Las marcas que pueden aparecer en la película por acción de la estática son de tres tipos: mancha, corona y árbol (Fig. 54). Las dos últimas son resultado de grandes descargas eléctricas. Estas marcas pueden ser generadas por movimientos rápidos como el que ocurre cuando se saca la película de su empaque para el revelamiento.

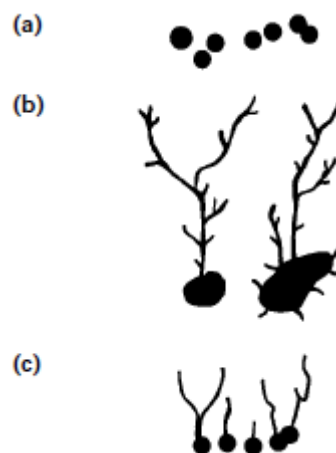


Figura 53. Marcas generadas en la película por estática: (a) mancha, (b) corona, (c) árbol

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Una técnica recomendable para evitar este tipo de problemas es mantener el cuarto oscuro con una alta humedad relativa (entre el 40 y 60 %).

3.2.2.2 Técnica de Procesamiento de la Película Radiográfica

En el procesamiento de película, la imagen invisible generada por la exposición a los rayos gamma se transforma en imagen visible y permanente. Primero se sumerge la película en una solución reveladora, esta solución hace que las áreas expuestas a la radiación se hagan oscuras. Después de pasar por el revelador, se sumerge a la película en una solución fijadora, la función del fijador es disolver las porciones oscurecidas generadas por la sal sensitiva. Luego, se lava la película para remover los químicos del fijador y las sales solubilizadas, finalmente se debe secar la película.

A las técnicas de procesamiento se las puede dividir en dos: proceso manual y proceso automático.

El método más común en la radiografía industrial es el proceso manual, y se lo conoce como método de tanque. En este método las soluciones de procesado y el agua de lavado están contenidas en tanques, en los cuales se sumerge la película.

A continuación se describen los procesos de revelado, fijación, lavado y secado:

1.- Revelado.- Cuando la película expuesta es sumergida en el revelador, la solución penetra la emulsión y comienza a transformar los cristales de haluro de plata (sal de plata), expuestos, a plata metálica. Mientras más tiempo se sumerge en el revelador se forma más, por lo tanto la imagen se vuelve más densa.

La velocidad de revelado es afectada por la temperatura de la solución, cuando la temperatura es alta, la reacción es más rápida y cuando la temperatura es baja, la reacción es lenta.

La temperatura ideal de revelado es 68° F (20°C). Por la directa relación que existe entre la temperatura y el tiempo de revelado, ambos factores son de igual importancia en este proceso.

En el revelado es esencial mantener uniformidad sobre toda el área de la película. Esto se consigue agitando la película durante el proceso de revelado. Si la película no es agitada dentro de la solución, hay una tendencia a que ciertas áreas de la película tengan fallas (Fig. 55).

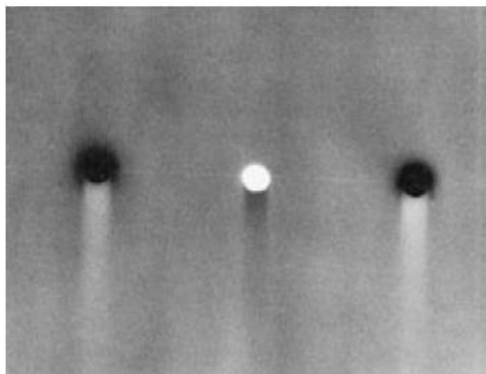


Figura 54. Marcas generadas en la película por no agitar la solución

Fuente: (EASTMAN KODAK COMPANY, 1980)

2.- Fijación.- El propósito de la fijación es remover toda la sal de plata que no fue revelada en la emulsión, dejando la plata revelada como imagen permanente. El fijador también tiene la función de endurecer la emulsión, así la película resistirá el secado con aire caliente. Un baño en el fijador, generalmente no excede los 15 minutos, caso contrario podría existir poca pérdida de densidad.

La película debe ser agitada al menos cada 2 minutos, durante todo el proceso de fijación para asegurar una acción uniforme de los químicos.

La solución de fijación suele acumular sales de plata al realizar su función. Estas sales debilitan la función que tiene el fijador. Este tipo de problemas se puede solucionar lavando la película con agua antes de sumergirla en el fijador.

3.- Lavado.- Una vez realizada la fijación, se debe lavar la película con agua, para eliminar restos de fijador en la película. Terminado el lavado, es recomendable secar la película con un paño suave que no genere pelusa.

4.- Secado.- Existen en el mercado soportes para colgar la película durante el secado, estos soportes deben estar colocados en un lugar donde

no generen molestias como choques del personal con la película, ó obstrucción del paso dentro del laboratorio. Las radiografías deben ser secadas con aire caliente.

3.2.3 Calidad de la Imagen Radiográfica

3.2.3.1 Indicadores de Calidad de Imagen

Una pieza estándar es incluida en cada radiografía para verificar el nivel de calidad del método radiográfico. Esta pieza es comúnmente llamada penetrámetro ó indicador de calidad de imagen (IQI).

Los penetrámetros (Fig. 56) tienen formas geométricas simples y están hechos del mismo material ó materiales similares al espécimen que está siendo radiografiado. Contienen estructuras pequeñas (agujeros, cables delgados, etc) y dimensiones que tienen relación numérica con el espesor de la parte radiografiada.

La imagen generada con de los IQIs en la radiografía es permanente y evidencia que la radiografía fue obtenida bajo las condiciones necesarias y posee la sensibilidad correcta.

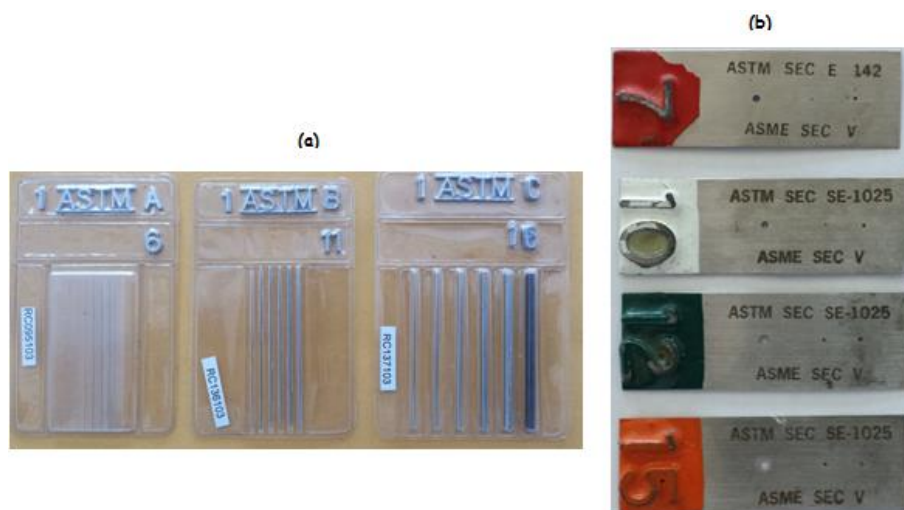


Figura 55. IQIs tipo: (a) alambre, (b) agujero

1.- Penetrámetro tipo agujero.- Consiste en una pieza de metal rectangular que contiene agujeros (usualmente tres, Fig. 57a), el diámetro del agujero está relacionado con el espesor del IQI.

Los IQIs de la ASTM internacional (ASTM E1025), contienen tres agujeros de diámetros $1T$, $2T$, $4T$, donde T es el espesor del IQI. Los diámetros mínimos de estos tres agujeros son 0.25, 0.50 y 1.00 mm (0.01, 0.02 y 0.04 in) respectivamente. Estos diámetros se los utiliza cuando el IQI tiene un número de identificación menor a 10.

IQIs que tengan un espesor mayor a 0.46 mm (0.180 in) tiene forma de disco el diámetro $4T$ contendrá a los diámetros $1T$ y $2T$ (Fig. 57b). Cada IQI es identificado con números de plomo, éstos indican su espesor en milésimas de pulgada, es decir, un IQI número 10 tiene 0.010 pulgadas de espesor, un IQI 180 tiene 0.18 pulgadas de espesor y así sucesivamente.

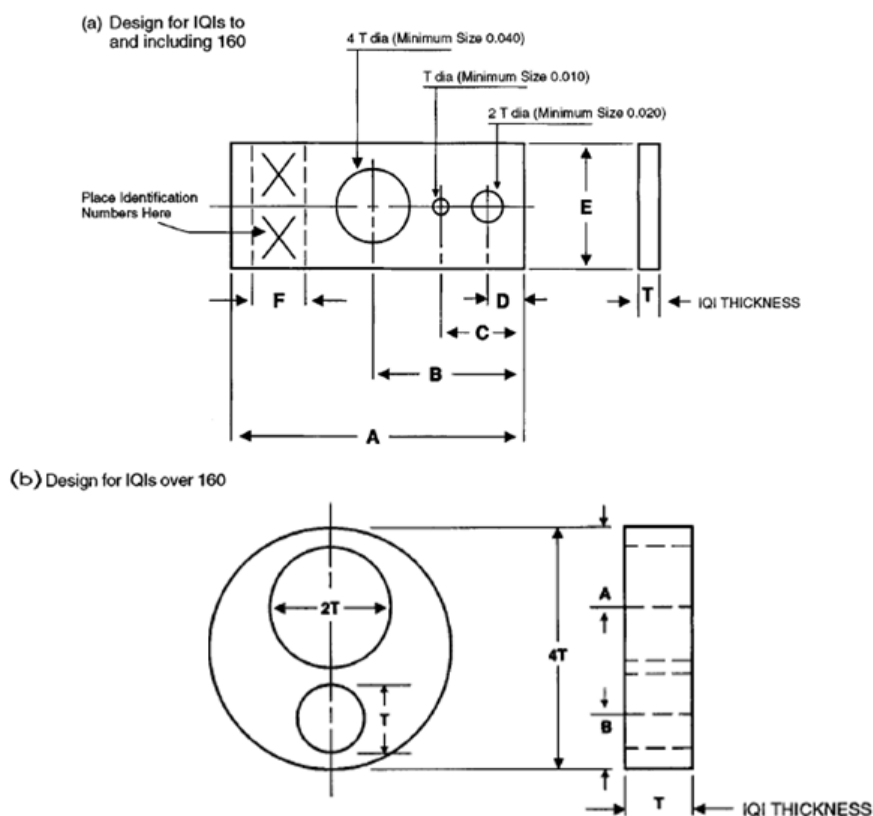


Figura 56. Penetrómetros tipo agujero: (a) rectangular, (b) disco

Fuente: (The American Society for Testing and Materials, 1999)

En la siguiente tabla se puede apreciar los valores de diseño A, B, C, D, etc, mostrados en los dos gráficos anteriores.

Tabla 8. Valores para diseño de IQI tipo agujero

Fuente: (The American Society for Testing and Materials, 1999)

Identification Number <i>T</i> (Note 3)	A	B	C	D	E	F	Tolerances (Note 2)
1-4	1.500 ±0.015	0.750 ±0.015	0.438 ±0.015	0.250 ±0.015	0.500 ±0.015	0.250 ±0.030	±10%
5-20	1.500 ±0.015	0.750 ±0.015	0.438 ±0.015	0.250 ±0.015	0.500 ±0.015	0.250 ±0.030	±0.0005
21-50	...	...	...	...	...	...	±0.0025
Over 50-160	2.250 ±0.030	1.375 ±0.030	0.750 ±0.030	0.375 ±0.030	1.000 ±0.030	0.375 ±0.030	±0.005
Over 160	1.330T ±0.005	0.830T ±0.005	...	...	...	...	±0.010

NOTE 2—Tolerances for IQI thickness and hole diameter.

NOTE 3—*XX* identification number equals *T* in .001 inches.

Los IQIs ASTM E1025 nos permiten especificar niveles de sensibilidad radiográfica, dependiendo del requerimiento del trabajo. Por ejemplo, la especificación puede requerir un nivel de calidad radiográfico 2-2T. El primero símbolo 2, indica que el espesor del IQI es 2% el espesor del espécimen radiografiado; el segundo símbolo 2T indica que el agujero de diámetro dos veces el espesor del IQI, debe ser el visto en la radiografía final. El nivel de calidad 2-2T es uno de los más comunes usados en la radiografía industrial.

Para identificar el material del cuál fue construido el IQI rectangular tipo agujero, se utiliza un método de muescas (destajes, Fig. 58).

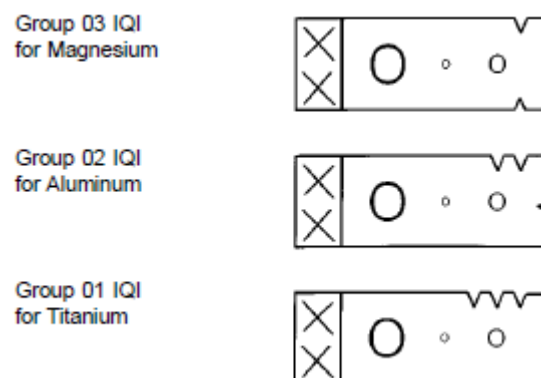


Figura 57. Identificación del material del IQI tipo agujero

Fuente: (The American Society for Testing and Materials, 1999)

En los IQIs circulares, el material del cual fue fabricado se lo debe especificar con una letra "G". Ejemplo, un IQI de material perteneciente al grupo 4, su denotación será "G4".

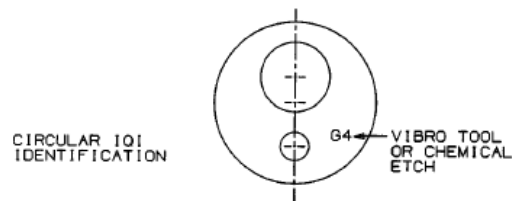


Figura 58. Identificación del material del IQI tipo agujero circular

Fuente: (The American Society for Testing and Materials, 1999)

Las designaciones típicas de nivel de calidad de imagen se muestran en la siguiente tabla. Es recomendable basar el nivel de inspección requerido, en los requerimientos de servicio del producto.

Tabla 9. Niveles típicos de calidad de imagen

Fuente: (The American Society for Testing and Materials, 1999)

Standard Image Quality Levels			
Image Quality Levels	IQI Thickness	Minimum Preceptible Hole Diameter	Equivalent IQI Sensitivity, % ^A
2-1T	1/50 (2 %) of Specimen Thickness	1T	1.4
2-2T ^B		2T	2.0
2-4T		4T	2.8
Special Image Quality Levels			
1-1T	1/100 (1 %) of Specimen Thickness	1T	0.7
1-2T		2T	1
4-2T	1/25 (4 %) of Specimen Thickness	2T	4

^AEquivalent IQI sensitivity is that thickness of the IQI, expressed as a percentage of the part thickness, in which the 2T hole would be visible under the same conditions.

^BFor Level 2-2T Radiologic—The 2T hole in an IQI, 1/50(2 %) of the specimen thickness, is visible.

2.- Penetrómetro tipo alambre.- Los IQIs de la ASTM internacional (ASTM E747) son ampliamente usados. Son un arreglo de alambres (de varios diámetros, Fig. 60) sellados en un contenedor plástico, los cables van ubicados en orden ascendente respecto al diámetro. Este contenedor también posee los símbolos de identificación necesarios.

Los penetrómetros tipo alambre ASTM E747 se los utiliza para controlar la calidad de imagen en espesores de material de rango 6.4 a 152 mm (0.25 a 6.0 in). (The American Society for Testing and Materials, 1999)

La calidad de la imagen está indicada por el alambre de menor diámetro visible en la radiografía. Cada arreglo contiene 7 cables, por lo tanto pueden cubrir un rango muy amplio de espesores (del espécimen).

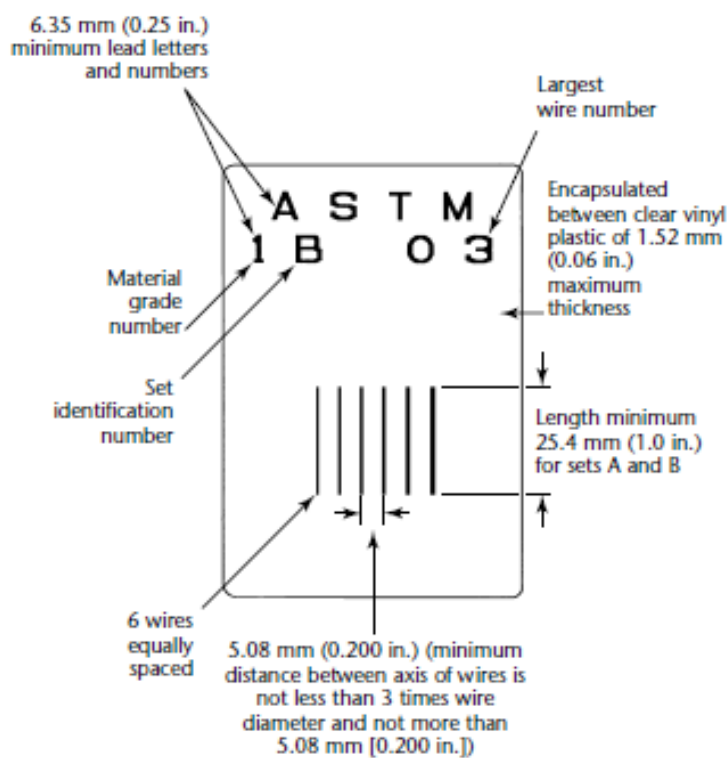


Figura 59. IQI tipo alambre: ASTM estándar E747

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2008)

Cada arreglo tiene una designación A, B, C ó D la cual nos sirve para clasificar a los alambres su diámetro, en la siguiente tabla se muestra esta clasificación.

Tabla 10. Tamaños y números de identificación de los IQI tipo alambre

Fuente: (The American Society for Testing and Materials, 1999)

SET A		SET B	
Wire Diameter in. (mm)	Wire Identity	Wire Diameter in. (mm)	Wire Identity
0.0032 (0.08) ^A	1	0.010 (0.25)	6
0.004 (0.1)	2	0.013 (0.33)	7
0.005 (0.13)	3	0.016 (0.4)	8
0.0063 (0.16)	4	0.020 (0.51)	9
0.008 (0.2)	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	0.10 (2.5)	16
0.040 h(1.02)	12	0.126 (3.2)	17
0.050 (1.27)	13	0.160 (4.06)	18
0.063 (1.6)	14	0.20 (5.1)	19
0.080 (2.03)	15	0.25 (6.4)	20
0.100 (2.5)	16	0.32 (8)	21

^A The 0.0032 wire may be used to establish a special quality level as agreed upon between the purchaser and the supplier.

El nivel de calidad requerido al usar estos alambres debe ser equivalente al nivel 2-2T de la práctica ASTM E1025 para penetrámetros tipo agujero, en la siguiente tabla se muestra las equivalencias entre varios IQIs tipo agujero y diámetros de IQIs tipo alambre correspondiente a la sensibilidad de los agujeros 1T, 2T y 4T.

Tabla 11. Equivalencias entre IQI tipo agujero y diámetro de IQI tipo alambre

Fuente: (The American Society for Testing and Materials, 1999)

Plaque Thickness, in. (mm)	Plaque IQI Identification Number	Diameter of wire with EPS of hole in plaque, in. (mm)		
		1T	2T	4T
0.005 (0.13)	5		0.0038 (0.09)	0.006 (0.15)
0.006 (0.16)	6		0.004 (0.10)	0.0067 (0.18)
0.008 (0.20)	8	0.0032 (0.08)	0.005 (0.13)	0.008 (0.20)
0.009 (0.23)	9	0.0035 (0.09)	0.0056 (0.14)	0.009 (0.23)
0.010 (0.25)	10	0.004 (0.10)	0.006 (0.15)	0.010 (0.25)
0.012 (0.30)	12	0.005 (0.13)	0.008 (0.20)	0.012 (0.28)
0.015 (0.38)	15	0.0065 (0.16)	0.010 (0.25)	0.016 (0.41)
0.017 (0.43)	17	0.0076 (0.19)	0.012 (0.28)	0.020 (0.51)
0.020 (0.51)	20	0.010 (0.25)	0.015 (0.38)	0.025 (0.63)

3.3 Procesos de Soldadura Utilizados en Facilidades Petroleras de Ecuador

3.3.1 Soldadura de Arco con Electrodo Revestido (SMAW)



Figura 60. Soldadura por arco con electrodo revestido

Fuente: (Wikipedia, 2014)

1.- Principios de Operación.- El arco generado en este proceso se realiza entre un electrodo recubierto y el metal base, no se necesita aplicación de presión y utiliza el metal de aporte proveniente del alma del electrodo. El arco inicia tocando momentáneamente el electrodo con el metal base. El calor del arco funde la superficie del metal base para formar un charco fundido. El metal del electrodo fundido se transfiere a través del arco hacia el charco fundido y se convierte en el metal de soldadura depositado. (B.Carry, 2004)

El proceso utiliza protección generada por la descomposición del revestimiento del electrodo (escoria), el arco y el área inmediata quedan envueltos en una atmósfera de gas de protección. En la Fig. 62, se muestra un esquema del proceso SMAW.

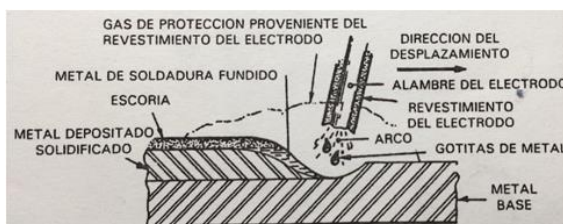


Figura 61. Diagrama del proceso (SMAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

2.- Ventajas del proceso.- Tiene flexibilidad máxima y puede soldar muchos metales en todas las posiciones, va desde un espesor mínimo hasta un espesor máximo. La inversión de equipo es relativamente pequeña y la mayoría de los soldadores tienen la habilidad para emplear este proceso. (B.Carry, 2004)

El proceso es ideal para soldar en todas las posiciones mostradas en la Fig. 63.




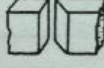


Posición		Evaluación
1. Plana		A
Filete Horizontal		A
2. Horizontal		A
3. Vertical		A
4. Sobrecabeza		A
5. Tubo - fijo		A

Figura 62. Capacidad de la posición de soldadura (SMAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

La soldadura SMAW se la puede utilizar para soldar la mayoría de los aceros y algunos de los metales no ferrosos. En la tabla. 12 se muestra los metales soldables con proceso SMAW.

Tabla 12. Metales soldables (SMAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

Metal Base	Soldabilidad
Aluminios	Posible pero no popular
Bronces	Soldable
Cobre	Posible pero no popular
Cupro-níquel	Aceptable
Hierro fundido y maleable	Soldable
Hierro forjado	Soldable
Inconel	Soldable
Níquel	Soldable
Monel	Soldable
Acero de bajo carbono	Soldable
Acero de baja aleación	Soldable
Alto y mediano carbono	Soldable
Aceros de aleación	Soldable
Aceros inoxidables	Soldable

3.- Limitaciones del proceso.- Una de las principales limitaciones del proceso por arco metálico protegido es la “ruptura instalada”. Siempre que un electrodo se consume hasta dentro de 2 pulgadas de su longitud original, el soldador debe detenerse. La soldadura no puede continuar puesto que no debe usarse la porción desnuda del electrodo en el soporte del mismo. El soldador debe detenerse, romper la escoria, quitar la colilla del electrodo y colocar un nuevo electrodo en el soporte.

Otra de las limitaciones es la utilización del metal de aporte. Las pérdidas de la colilla del electrodo y del revestimiento permiten una utilización total de electrodo recubierto de aproximadamente 65%. (B.Carry, 2004)

4.- Rango de espesor del metal base.- En la siguiente figura se puede apreciar el rango de espesores que se sueldan comúnmente por este método.

Espesor	pulg.	.005	.015	.062	.125	3/16	1/4	3/8	1/2	3/4	1	2	4	8	
	Factor	mm.	.13	.4	1.6	3.2	4.8	6.4	10	12.7	19	25	51	102	203
Una sola pasada sin prep.				←	→										
Una sola pasada con prep.					←	→									
Pases múltiples					←	→	←	→	←	→	←	→	←	→	←
Filetes – una sola pasada				←	→										

Figura 63. Rango de espesor de metal base (SMAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

5.- Circuito y Corriente de soldadura.- Se utilizan cables para conducir la corriente de soldadura, desde la fuente de poder hasta el arco. El cable del electrodo forma un lado del circuito y el cable de trabajo es el otro lado del mismo. La soldadura puede realizarse con corriente alterna (ca) ó con un electrodo negativo de corriente directa (DCEN), con una polaridad directa ó con una polaridad inversa de electrodo positivo (DCEP). (B.Carry, 2004)

En la Fig. 65, se muestra un diagrama del circuito SMAW.

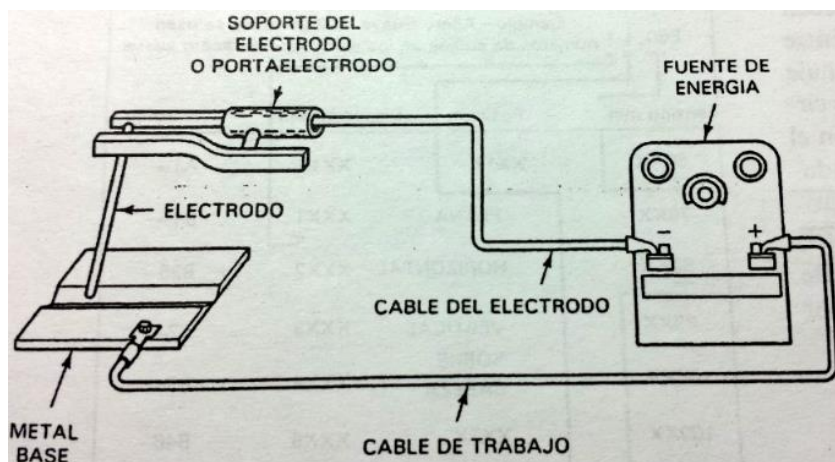


Figura 64. Diagrama de circuito (SMAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

6.- Equipo requerido para operar.- La fuente de poder es el centro del sistema de soldadura por arco con electrodo revestido, su función es proporcionar energía eléctrica con corriente adecuada y un voltaje a efecto de mantener un arco de soldadura controlable y estable. La salida de la fuente de poder debe ser del tipo de corriente constante (CC). El rango normal de corriente es de 25 a 500 A usando electrodos de tamaño convencional. El voltaje del arco varía de 15 a 35 V. (B.Carry, 2004)

Otra pieza importante es el soporte del electrodo, el cual manipula el soldador. El soporte es el que sujeta al electrodo y transmite la corriente eléctrica.



Figura 65. Equipo requerido para operar (SMAW)

Fuente: (Maquimoto, 2014)

Todos los soportes para electrodos deben estar completamente aislados, es muy importante mantener los soportes del electrodo de tal modo que retengan su eficiencia de transmisión de corriente y sus cualidades de aislamiento.

7.- Materiales que se emplean.- El electrodo recubierto (Fig. 67) es el único material que normalmente se emplea, es importante conocer cuál es la función del revestimiento, la base de la especificación, los factores de uso, y las propiedades del metal soldado depositado.



Figura 66. Electroodos recubiertos (SMAW)

Fuente: (Maquitodo, 2014)

El revestimiento del electrodo proporciona: (1) gas proveniente de la descomposición de ciertos ingredientes del revestimiento para proteger el arco de la atmósfera, (2) desoxidantes para depurar y purificar el metal soldado depositado, (3) formadores de escorias para proteger el metal del soldado depositado con escoria proveniente de la oxidación atmosférica, (4) elementos de ionización para hacer el arco más estable y operar con corriente alterna, (5) elementos de aleación que proporcionan características especiales a metal del soldado depositado, (6) polvo de hierro para mejorar la productividad del electrodo. (B.Carry, 2004)

La AWS (American Welding Society) ha establecido un sistema para identificar y especificar los diferentes tipos de electrodos y de metales de aporte (Fig. 68). Los electrodos de acero suave y los electrodos cubiertos con acero de baja aleación están prefijados por la letra E, seguida de cuatro ó cinco dígitos. El prefijo E significa “electrodo”.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AWS

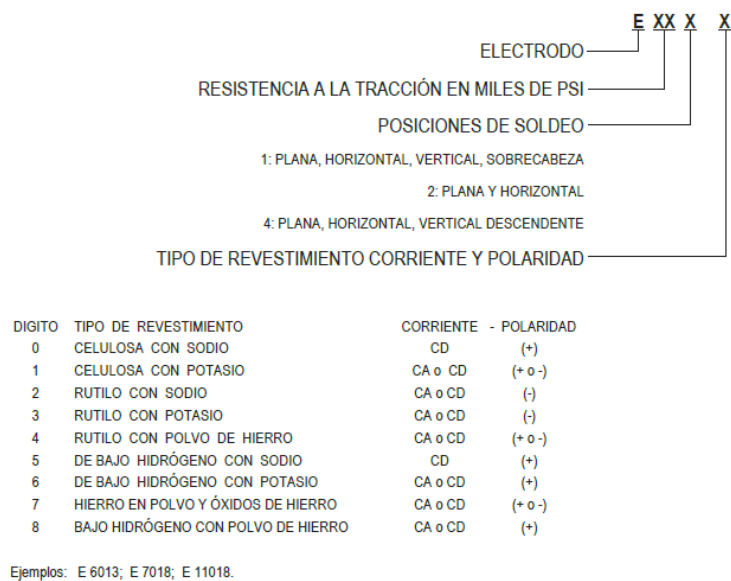


Figura 67. Sistema de clasificación AWS (SMAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

En cuanto a la demanda de los electrodos cubiertos, los de acero suave se clasifican en cuatro grupos generales: (1) F1- Grupo de alta deposición: tipo de polvo de hierro, (2) F2 - Grupo de penetración suave: tipos rutilos (titanio), (3) F3 - Grupo de penetración profunda: tipos de alta celulosa, (4) F4 - Grupo de bajo hidrógeno: tipos de cal. (B.Carry, 2004)

La Fig. 69, es una guía para ayudar en la selección del electrodo cubierto para trabajos específicos de soldadura, basándose en la posición para soldar, el espesor del metal y el tipo de unión.

Posición para soldar ↓	TIPO DE SOLDADO	Soldados de Filete				Soldados de Ranura					
		Interior o Exterior				Cuadrada		En V (raíz abierta)		U	
Espesor del material →		Muy delgado	Delgado	Mediano	Grueso	Muy delgado	Delgado	Mediano	Grueso	Mediano	Grueso
1	PLANA	F-2	F-2	F-1	F-1 F-4	F-2	F-3	F-3	F-3 F-4	F-4	F-4
1A	FILETE HORIZONTAL	F-2	F-3	F-1	F-1 F-4	—	—	—	—	—	—
2	HORIZONTAL	F-2	F-3	F-3 F-4	F-3 F-4	F-2	F-2 o F-3	F-3 y F-4	F-3 y F-4	F-4	F-4
3	VERTICAL ARRIBA	F-2	F-3	F-4	F-4	F-2	F-2 o F-3	F-3 y F-4	F-3 y F-4	F-4	F-4
3A	VERTICAL ABAJO	F-2	F-3	—	—	F-2	F-2 o F-3	F-3	F-3	F-3	F-3
4	SOBRE CABEZA	F-2	F-3	F-3 F-4	F-3 F-4	F-2	F-2 o F-3	F-3 y F-4	F-3 y F-4	F-4	F-4
5	TUBO FIJO HACIA ABAJO	—	—	—	—	F-2	F-2	F-3	F-3	F-3	F-3
5A	TUBO FIJO HACIA ARRIBA	—	—	—	—	F-3	F-3	F-3 y F-4	F-3 y F-4	F-4	F-4

Figura 68. Guía de evaluación disponible para seleccionar electrodos de acero suave y de baja aleación

Fuente: (B.Carry, 2004)

Los números F corresponden al sistema de clasificación usado en la sección IX del Código de Calderas de la ASME.

8.- Tasa de deposición.- Una porción de la energía del arco se usa para fundir la superficie del metal base y otra para fundir el electrodo. El revestimiento del electrodo también afecta las tasas de deposición. Los tipos de óxido de hierro y los tipos de polvo de hierro tienen tasas de deposición más altas. Con una corriente más alta, la densidad de corriente del electrodo aumenta y ello incrementa la tasa de fusión lo cual a su vez incrementa la tasa de deposición.

En la Fig.70, se muestra la relación de fusión a corriente.

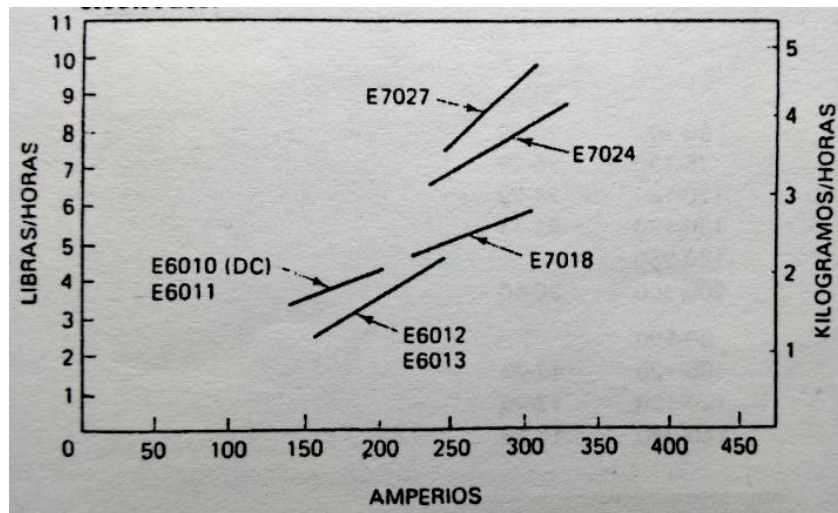


Figura 69. Tasas de deposición para varios electrodos

Fuente: (B.Carry, 2004)

9.- Uso en la industria y aplicaciones típicas.- Es muy utilizada en donde es necesario realizar trabajos de soldadura en lugares remotos; pases de relleno para soldadura de tanques y tuberías. También es muy popular en los talleres mecánicos donde se dispone de un capital limitado, se la utiliza en operaciones de mantenimiento y reparación.

3.3.2 Soldadura de Arco con Núcleo Fundente (FCAW)



Figura 70. Soldadura de arco con núcleo fundente

Fuente: (Wikipedia, 2014)

1.- Principios de operación.- Es un proceso en el cual se usa un arco entre un electrodo consumible continuo con núcleo fundente y el charco

de soldadura (Fig. 72). El calor del arco funde la superficie del metal base y el extremo del electrodo, el metal que se funde y se desprende del electrodo es transferido a través del arco a la pieza de trabajo, donde se convierte en el metal depositado. El arco se mantiene automático y el desplazamiento puede ser manual ó por máquina. (B.Carry, 2004)

Se sirve de un gas de protección proveniente de la desintegración de los ingredientes del fundente contenido dentro del electrodo tubular. Los ingredientes dentro del electrodo producen gas para protección y también proporcionan desoxidante, ionizadores, agentes purificadores y en algunos casos elementos de aleación. Estos ingredientes forman una escoria semejante al vidrio, la cual tiene un peso más ligero que el metal de soldadura depositado, y flota sobre la superficie del soldado como una cubierta de protección. (B.Carry, 2004)

A este proceso se lo puede usar con ó sin protección adicional de un gas externamente suministrado y sin la aplicación de presión. Hay dos variantes, una en la que se emplea un gas de protección externamente suministrado y una segunda que se basa enteramente en el gas de protección generado por la desintegración del fundente dentro del electrodo. (B.Carry, 2004)

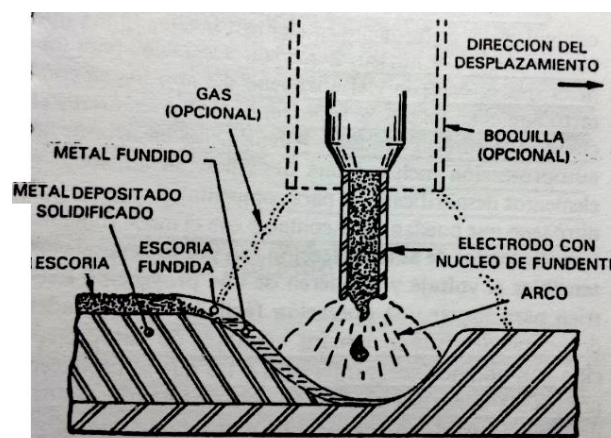


Figura 71. Diagrama del proceso (FCAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

2.- Ventajas del proceso.- Este proceso de soldadura genera un metal de soldadura de alta calidad a un bajo costo y con menor esfuerzo por parte del operario que la soldadura SMAW. Es más versátil que la soldadura GMAW y es más flexible y adaptable que la soldadura SAW.

Entre sus ventajas tenemos (B.Carry, 2004): (1) alta calidad en el metal depositado, (2) Suelda una variedad de aceros con un amplio rango de espesor, (3) Tiene un factor de alta operatividad: fácilmente mecanizado, (4) Alta tasa de deposición: densidad de alta corriente, (5) Utilización del metal de electrodo, relativamente alta, (6) Velocidades de desplazamiento altas, (7) Arco visible: fácil de usar, (8) La limpieza previa es menor que la requerida para la soldadura GMAW.

El método más popular de aplicación de la soldadura FCAW es el semiautomático, el segundo más usado es el automático. Este proceso no se lo realiza manualmente. Es un proceso que se adapta a todas las posiciones de soldadura, dependiendo del tamaño del electrodo. Los metales que se sueldan por este proceso se muestran en la Tabla. 13.

Tabla 13. Metales soldables (FCAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

Metal base	Soldabilidad
Hierro fundido	Usando un electrodo especial
Acero de bajo carbono	Soldable
Acero de baja aleación	Soldable
Alto y medio carbono	Soldable
Aceros de aleaciones	Soldable
Aceros inoxidable - algunos	Tipos limitados

3.- Limitaciones del proceso.- Algunas de las limitantes de este proceso son: (1) se usa solamente para soldar metales ferrosos, principalmente aceros, (2) el proceso normalmente produce una capa de escoria que debe ser eliminada, (3) el alambre del electrodo con núcleo fundente es más costoso por peso que los alambres de electrodo sólidos, (4) el equipo es más costoso y complejo que el que se requiera para la

soldadura SMAW; sin embargo, el incremento en la productividad compensa esto. (B.Carry, 2004)

4.- Rango de espesor del metal base.- En la siguiente figura se puede apreciar el rango de espesores que se sueldan comúnmente por este método. (B.Carry, 2004)

Factor \ Espesor	Espesor													
	pulg.	.005	.015	.062	.125	3/16	1/4	3/8	1/2	3/4	1	2	4	8
Factor	mm	.13	.4	1.6	3.2	4.8	6.4	10	12.7	19	25	51	102	203
Una sola pasada sin prep.				←	→									
Una sola pasada con prep.					←	→								
Multipases								←	→					

Figura 72. Rango de espesor del metal base (FCAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

5.- Circuito y corriente de soldadura.- Se ilustra el circuito del proceso FCAW en la Fig. 74. En el caso de los alambres de electrodos de autoprotección, e sistema de gas se elimina.

El proceso FCAW normalmente utiliza corriente directa con el electrodo positivo (DCEP). Algunos electrodos para la variante de autoprotección operan con el electrodo negativo (DCEN). Normalmente se emplea corriente directa con voltaje de potencia constante.

Cuando se utilizan electrodos de ca, se emplea una fuente de poder del tipo de características de caída (CC) y alimentadores de captación de voltaje. La corriente para soldar por este proceso puede variar desde un nivel bajo como 50 A hasta un nivel alto como 750 A. (B.Carry, 2004)

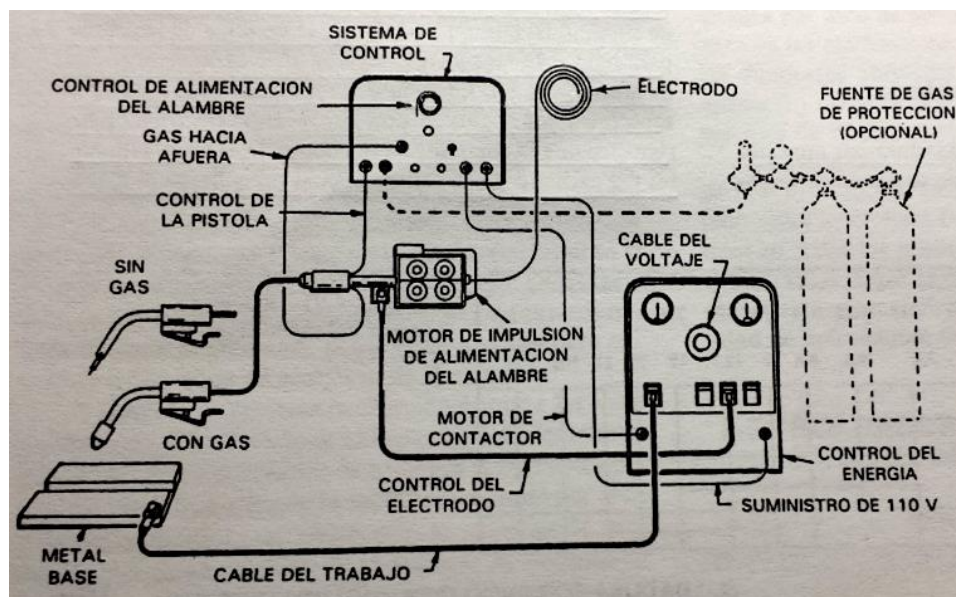


Figura 73. Diagrama del circuito (FCAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

6.- Equipo requerido para operar.- Cuando se utiliza la versión carente de gas, se elimina la totalidad del sistema de suministro del gas de protección. Esto elimina los cilindros de gas, el regulador y el medidor de flujo, las mangueras, la válvula del solenoide y la boquilla de la pistola de soldar. En vista de la cantidad de humo generado por este proceso, se está volviendo cada vez más necesario incluir boquillas de succión del humo alrededor de la boquilla de la pistola para reducir humos y vapores.

Las pistolas con electrodos de autoprotección normalmente usan guías de alambres especiales que incluyen una proyección eléctrica, esto significa que la corriente se introduce en el electrodo antes del extremo de la punta, lo cual precalienta el alambre del electrodo y lo hace más productivo.

7.- Materiales que se emplean.- Se utiliza el electrodo con núcleo fundente y el gas de protección. La razón para desarrollar este tipo de electrodos es que los alambres de electrodo sólido se extraen de aquellos lingotes que tengan un análisis específico adecuado, que talvez no sean fáciles de conseguir ó que son grandes y costosos.

En el caso de los alambres de núcleo de fundente, los elementos especiales de aleación se introducen en el material del núcleo para obtener

el análisis del depósito adecuado, el método de producción de alambre con núcleo proporciona una amplitud de composición que no se limita al análisis de los lingotes de acero disponibles. Los alambres de electrodo con núcleo son más fáciles de usar para el soldador que los alambres sólidos del mismo análisis de depósito. (B.Carry, 2004)

Los alambres de electrodos con núcleo fundente con autoprotección incluyen elementos adicionales que forman gas en el núcleo. Estos son necesarios para impedir que el oxígeno y el nitrógeno del aire hagan contacto con el metal que se transfiere a través del arco y charco del cordón fundido. Además, los electrodos de autoprotección incluyen una desoxidación adicional y elementos desnitrificadores para compensar el oxígeno y el nitrógeno que puedan tener contacto con el metal fundido.

La información relacionada con estos electrodos se basa en las especificaciones de la AWS para electrodos con núcleo fundente, a continuación se muestra una tabla donde se resumen estas especificaciones.

Tabla 14. Resumen de especificaciones para electrodos con núcleo de fundente

Fuente: (B.Carry, 2004)

Clasificación de la AWS	Composición y Especificación	Gas de Protección	Corriente y Polaridad	Técnica de Soldadura
EXXT-1	Acero al carbono y acero de baja aleación A5.20 y A5.29	CO ₂	DCEP	Múltiple
EXXT-2		CO ₂	DCEP	Individual
EXXT-3		Ninguno	DCEP	Individual
EXXT-4		Ninguno	DCEP	Múltiple
EXXT-5		CO ₂	DCEP	Múltiple
EXXT-6		Ninguno	DCEP	Múltiple
EXXT-7		Ninguno	DCEN	Múltiple
EXXT-8		Ninguno	DCEN	Múltiple
EXXT-10		Ninguno	DCEN	Individual
EXXT-11		Ninguno	DCEN	Múltiple
EXXT-G		Nota	Ninguno	Múltiple
EXXT-GS	Nota	Ninguno	Individual	
EXXXT-1	Acero al cromo-níquel A5.22	CO ₂	DCEP	No especificada
EXXXT-2		Argón + 2% O	DCEP	No especificada
EXXXT-3		Ninguno	DCEP	No especificada
EXXXT-G		No especificada	No especificado	No especificada

El gas de protección generalmente usado es el dióxido de carbono CO₂. Sin embargo algunas veces se utiliza mezclas de CO₂ y argón (25%

CO₂ + 75% argón) y mezclas de argón con oxígeno. La mayoría de los electrodos se diseñan para emplearse con protección de CO₂.

8.- Tasa de deposición.- En la siguiente figura se puede apreciar las tasas de deposición cuando se suelda con aceros suaves y con aceros de baja aleación usando electrodo positivo de corriente directa (DCEP).

Las tasas de alta de deposición de los alambres con núcleo fundente de tamaño más pequeño exceden a las de los electrodos recubiertos. Los electrodos de núcleo fundente tienen un rango de corriente mucho más amplio que los electrodos recubiertos, lo cual incrementa la flexibilidad del proceso.

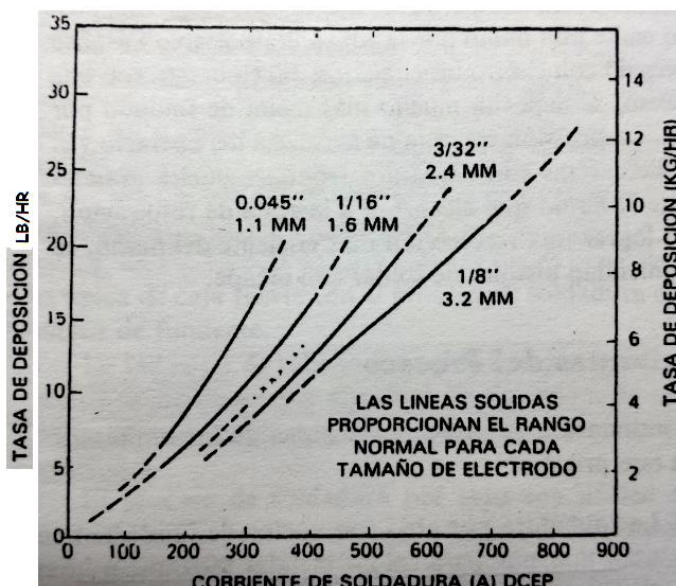


Figura 74. Tasa de deposición para electrodos de acero con núcleo de fundente

Fuente: (B.Carry, 2004)

9.- Uso industrial y aplicaciones típicas.- La industria de tanques y de recipientes también utiliza la soldadura por arco con núcleo de fundente. El proceso cumple con los requisitos de la ASME para el trabajo en recipientes a presión.

La industria de acero estructural usa el proceso para fabricación en planta como para el trabajo de erección. Para la erección de acero

estructural es particularmente útil en los empalmes de columnas, en los empalmes de vigas y en las conexiones de vigas con columna.

En la industria de tubería también se usa FCAW con alambres de electrodos de diámetro más pequeño, que permiten soldar en todas las posiciones. El proceso FCAW tiene una alta tasa de deposición y un factor operativo ó ciclo de trabajo más alto.

3.3.3 Soldadura de Arco Sumergido (SAW)



Figura 75. Soldadura de arco sumergido

Fuente: (Wikipedia, 2014)

1.- Principios de operación.- Es un proceso de soldadura en el cual se utiliza un arco entre un electrodo de metal desnudo alimentado continuamente y un charco depositado. El calor del arco funde la superficie del metal base y el extremo del electrodo, el metal fundido que sale del electrodo se transfiere a través del arco a la pieza de trabajo, donde se convierte en el metal de soldadura depositado.

Al arco de metal fundido se lo protege por una capa de fundente granular colocado directamente sobre las piezas de trabajo. El fundente cercano al arco se funde y se entremezcla con el metal fundido y ayuda a purificarlo y a fortalecerlo. El flujo forma una escoria igual al vidrio que es más ligera en cuanto a peso que el metal depositado y flota sobre la superficie como una capa de protección. El soldado se sumerge bajo esta capa de fundente y escoria cubriendo así al arco, de manera que éste no es

visible. El arco se mantiene automáticamente y el desplazamiento puede ser manual ó automático. (B.Carry, 2004)

El proceso es utilizado sin presión y con metal de aporte proveniente de un electrodo, y en algunas veces de una fuente complementaria tal como una varilla de soldadura, un fundente con gránulos de metal.

En la Fig. 77, se muestra un diagrama del proceso SAW.

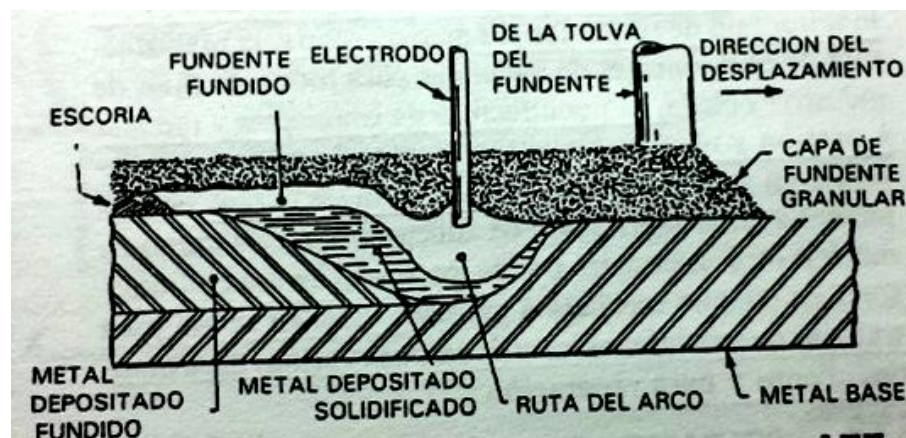


Figura 76. Diagrama del proceso (SAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

La escoria generada tiene una densidad más baja que el metal de soldadura, por lo tanto flotará hasta la punta del cordón.

2.- Ventajas del proceso.- Este proceso se desarrollo para proporcionar metales depositados de alta calidad protegiéndolo el arco y el metal fundido de los efectos de la contaminación del aire. Las principales ventajas del proceso son (B.Carry, 2004): (1) Alta calidad del metal depositado, (2) tasa de deposición y velocidad, extremadamente alta, (3) poco ó nada de humo, (4) ausencia de destellos del arco, y por consiguiente mínima necesidad de ropas de protección (5) alta utilización de alambre de electrodos, (6) fácil automatización para el logro de un alto factor operativo, (6) habilidades manipulativas normalmente no necesarias.

En la tabla. 15 se resume los metales soldables mediante este proceso.

Tabla 15. Metales soldables (SAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

Metal base	Soldabilidad
Fierro forjado	Soldable
Acero de bajo carbono	Soldable
Acero de baja aleación	Soldable
Medio y alto carbono	Posible pero no popular
Acero de aleaciones	Posible pero no popular
Acero inoxidable	Soldable

3.- Limitaciones del proceso.- La principal limitación del proceso es su reducida capacidad en cuanto a las posiciones para soldar. Otra limitación importante es que solo se usa para soldar aceros.

El consumo de alto calor y el ciclo de enfriamiento lento pueden constituir un problema cuando se sueldan aceros templados ó forjados.

En la soldadura SAW semiautomática, la imposibilidad de ver el arco puede ser una desventaja para alcanzar la raíz de la ranura de un trabajo de soldado y para realizar un aporte adecuado. (B.Carry, 2004)

4.- Rango de espesor del metal base.- Mediante este proceso se puede soldar varios rangos de espesores, a continuación se muestra un resumen (Fig. 78).

Factor \ Espesor	pulg.	.005	.015	.062	.125	3/16	1/4	3/8	1/2	3/4	1	2	4	8
	mm	.13	.4	1.6	3.2	4.8	6.4	10	12.7	19	25	51	102	203
Un solo pase sin prep.				←					→					
Un solo pase con prep.							←				→			
Multipases									←				→	

Figura 77. Rango de espesor del metal base (SAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

5.- Circuito y corriente de soldadura.- En la Fig. 79, se muestra el circuito de soldadura del proceso SAW.

El sistema de soldado con un solo electrodo requiere de un sistema de alimentación de alambre y de suministro de potencia. Este proceso utiliza corriente directa (cd) ó alterna (ca).

Se usa corriente directa para la mayoría de aplicaciones en que se emplea un solo arco. Son usados electrodos positivos (DCEP) y negativos (DCEN) de corriente directa. Para la soldadura ca siempre se emplea la potencia de corriente constante.

La potencia de corriente directa del tipo de voltaje constante es más popular para la soldadura por arco sumergido con alambres de electrodo de 3.2 mm (1/8") y de diámetro más pequeño. El sistema de potencia de corriente constante se usa normalmente para soldar con alambres de electrodos de 4 mm (5/32") y de diámetro grande. (B.Carry, 2004)

La corriente de soldadura para el soldado por arco sumergido puede variar desde 50 A hasta 2000 A. La mayor parte de la soldadura SAW se hace en el rango de 200 a 1200 A. (B.Carry, 2004)

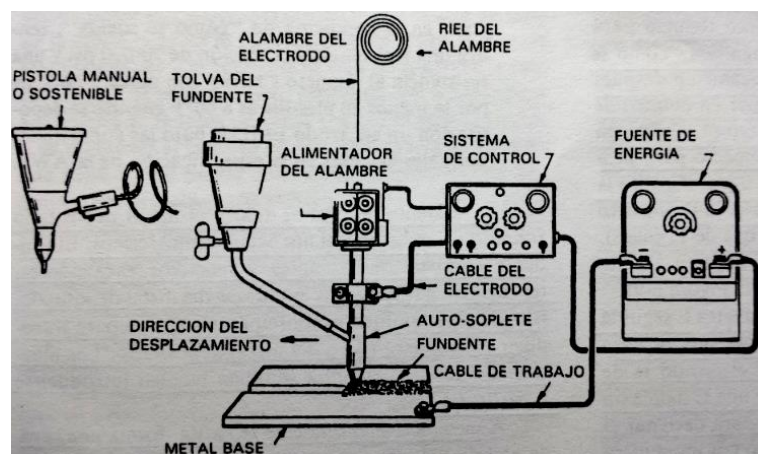


Figura 78. Diagrama de circuito (SAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

6.- Equipo requerido para operar.- Consiste en: una máquina de soldar ó una fuente de potencia, el alimentado de de alambre y el sistema de

control, el soplete para la soldadura automática y el montaje del cable para la soldadura semiautomática, la tolva de fundente y el mecanismo de alimentación y por lo general un sistema de recuperación de fundente, un mecanismo de desplazamiento para soldadura automática.

La fuente de poder para este proceso debe tasarse e un ciclo de trabajo del 100% puesto que este tipo de operaciones son continuas. Se emplea tanto un generador ó un transformador-rectificador como fuente de potencia (la segunda es la más popular).

Se conecta una pequeña tolva de fundente al extremo del montaje del cable y el alambre del electrodo se alimenta a través de la parte inferior de esta y por medio de la punta de una pastilla de corriente al arco. Este fundente es suministrado de la tolva al área del soldado por efecto de la gravedad. (B.Carry, 2004)

Para la soldadura automática, por lo general el soplete se fija al motor de alimentación del alambre y la tolva de fundente al soplete. Una pieza que se emplea algunas veces es un carro de desplazamiento. También se puede incluir una unidad de recuperación de fundente para recoger el no utilizado y regresarlo a la tolva de suministro.

7.- Materiales que se emplean.- En este proceso se utiliza el fundente y el electrodo consumible. La AWS ha publicado especificaciones donde se ofrece un sistema de clasificación que incluye tanto al fundente como el electrodo. El fundente está designado por la letra F seguida de un número de 2 ó 3 dígitos que indica la resistencia mínima a la tensión en incrementos de 10000 psi. Esto va seguido por una letra que indica la condición de tratamiento térmico para probar los trabajos soldados. “A” significa “como se soldó” y “P” significa “tratar térmicamente después de soldar”. A su vez, esto va seguido por un número de uno ó dos dígitos que indica la temperatura mínima en escala Fahrenheit de las pruebas de impacto para proporcionar una absorción de 20 pies-libras. (B.Carry, 2004)

La clasificación del fundente se resume en la siguiente figura.

F	X	X	X
FUNDENTE	PROPIEDADES MECANICAS	TRATAMIENTO DE CALOR	IMPACTOS MINIMOS
6-60-80,000 de tensión 48,000 min. de deformación 22% alargamiento en 2"	7-70-95,000 de tensión 58,000 min. de deformación 22% alargamiento en 2"	A-tal y como se soldó P-tratamiento de calor posterior al soldado	20 pies-lb@ Z-sin requisitos 0-0°F = -18°C 2--20°F = -29°C 4--40°F = -40°C 5--50°F = -46°C 6--60°F = -51°C 8--80°F = -62°C 10--100°F = -73°C
7-70-95,000 de tensión 58,000 min. de deformación 22% alargamiento en 2"	8-80-100,000 de tensión 68,000 min. de deformación 20% alargamiento en 2"		
8-80-100,000 de tensión 68,000 min. de deformación 20% alargamiento en 2"	9-90-110,000 de tensión 78,000 min. de deformación 17% alargamiento en 2"		
9-90-110,000 de tensión 78,000 min. de deformación 17% alargamiento en 2"	10-100-120,000 de tensión 88,000 min. de deformación 16% alargamiento en 2"		

Figura 79. Sistema de clasificación del fundente en el proceso de arco sumergido

Fuente: (B.Carry, 2004)

Los fundentes pueden ser neutros ó activos. Los fundentes neutros no producirán ningún cambio significativo en la química del metal depositado. Normalmente se usan para soldadura de multipases. Los fundentes activos contienen pequeñas cantidades de manganeso ó de silicio que se usan para reducir la porosidad y las fracturas del soldado. Normalmente se usan para aplicaciones de un solo pase. (B.Carry, 2004)

El electrodo está especificado por la letra E seguida por 3 dígitos. Sin embargo, obsérvese que la letra E puede ir seguida por la letra C si el electrodo es de construcción compuesta. La omisión de una C indica un electrodo sólido. El siguiente dígito es para designar el contenido de manganeso. Esto va seguido por un número de uno ó dos dígitos para indicar el contenido nominal de carbono en centésimas de un por ciento de carbono. Estos dígitos algunas veces van seguidos por la letra K, que indica que en el acero del electrodo se eliminó el silicio. Si el acero es de otro tipo, no aparecerá la letra K. Esta va seguida algunas veces por dos dígitos que indican las aleaciones que están presentes. En la Fig. 81 se muestra el sistema de clasificación de electrodos para aceros al carbono (no cubre los aceros de aleación). (B.Carry, 2004)

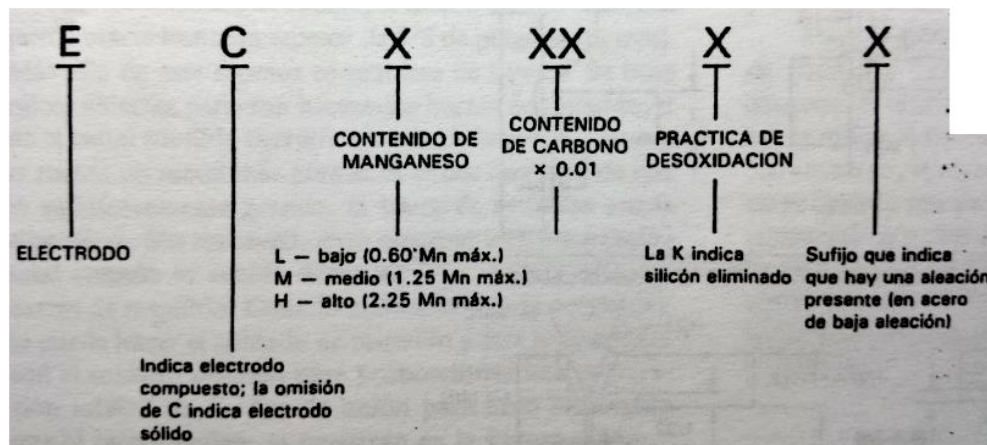


Figura 80. Sistema de clasificación del electrodo

Fuente: (B.Carry, 2004)

8.- Tasa de deposición.- Este proceso tiene las tasas más altas que cualquier otro proceso de soldadura. En la Fig. 82, se muestra la tasa de deposición de electrodos individuales.

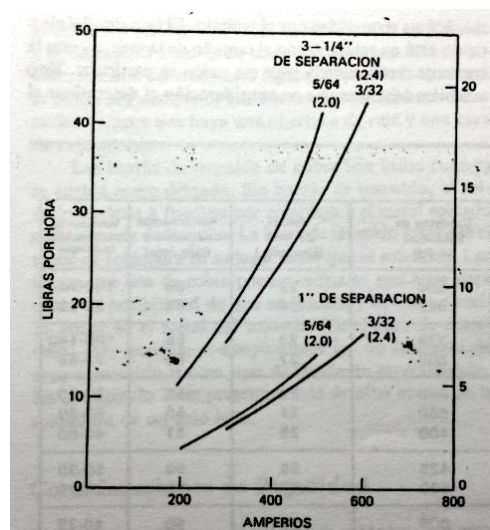


Figura 81. Tasas de deposición de soldadura (SAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

Cuatro son los factores que controlan la tasa de deposición: la polaridad, la separación larga, los aditivos del fundente y los electrodos adicionales. La tasa de deposición puede aumentarse extendiendo la separación.

La calidad del metal depositado en el proceso es alta, la resistencia del metal depositado y la ductilidad exceden a la del acero suave ó a la del material base de baja aleación cuando se usa la combinación correcta de alambre de electrodo y fundente de arco sumergido. (B.Carry, 2004)

9.- Uso industrial y aplicaciones típicas.- Se usa ampliamente en trabajos de fabricación en placas de acero pesado. Esto incluye soldadura de formas estructurales, la costura longitudinal de tubos con diámetro grande, la manufactura de recipientes y tanques a presión, calderas, reactores nucleares, recipientes químicos, etc. También es ampliamente usado en la industria de construcción de barcos y para trabajos de recubrimientos y de reconstrucción. (B.Carry, 2004)

3.3.4 Soldadura de Arco de Tungsteno Protegida con Gas (GTAW)

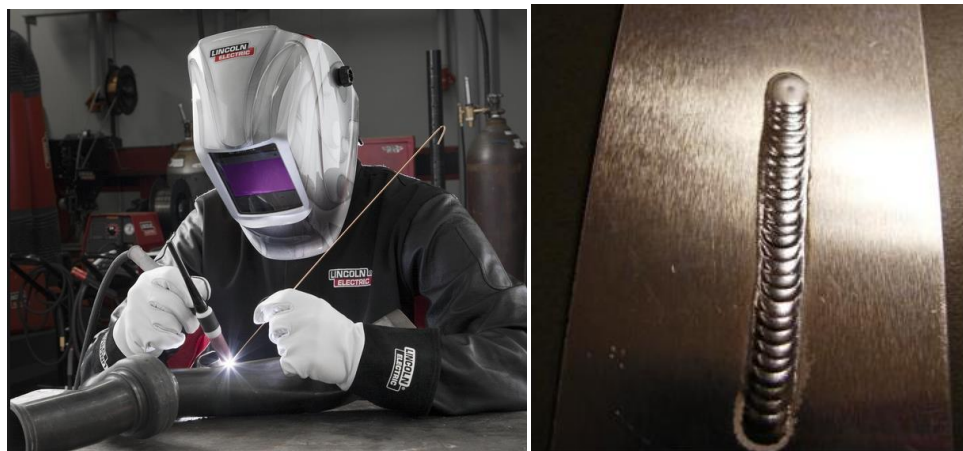


Figura 82. Soldadura de arco de tungsteno protegida con gas

Fuente: (Wikipedia, 2014)

1.- Principios de Operación.- Es un proceso de soldadura por arco que produce coalescencia de metales calentándolos con un arco entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el metal base. Se obtiene protección a partir de un gas inerte. Puede usarse ó no, tanto la presión como el metal de aporte. Este proceso se denomina también como TIG “soldadura por arco de tungsteno con gas inerte”. (B.Carry, 2004)

En la Fig. 84 se ilustra el proceso GTAW. Cuando se sueldan materiales muy delgados no se agrega metal de aporte (esto se conoce como soldadura autógena). Cuando se sueldan materiales gruesos se utiliza una varilla de aporte. El metal de aporte no se transfiere a lo largo del arco sino más bien lo funde.

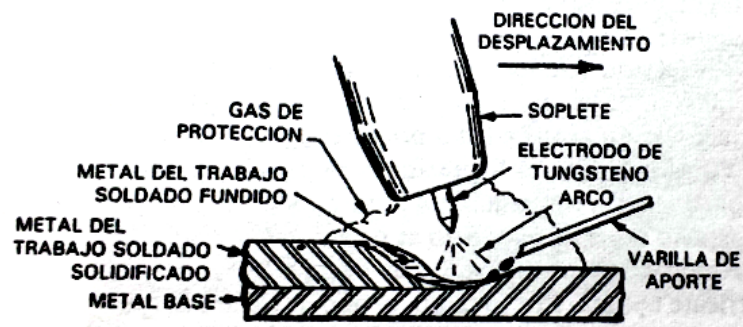


Figura 83. Diagrama del proceso (GTAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

Toda el área del arco está protegida de la atmósfera por gas de protección inerte que fluye desde la boquilla del soplete. Este gas de protección desplaza al aire para que el oxígeno y el nitrógeno de éste no lleguen a tener contacto con el metal fundido ó con el electrodo de tungsteno caliente. Durante el proceso se genera muy poca salpicadura y poca cantidad de humo.

2.- Ventajas del proceso.- A continuación se detallan las características más sobresalientes de este proceso: (1) la calidad del cordón de soldadura es muy alta en casi todos los metales y aleaciones, (2) en caso de ser necesaria limpieza, se requerirá muy poca, (3) el arco y el charco fundido de la soldadura son claramente visibles para el soldador, (4) no hay material de aporte transportado a lo largo del arco, por lo tanto no hay salpicaduras o sólo pocas, (5) la soldadura puede hacerse en todas las posiciones, (6) no se produce ninguna escoria que pudiera quedar atrapada en el cordón depositado.

El proceso permite al soldador un máximo control, generando un trabajo de precisión. Se utiliza GTAW en muchas operaciones de

manufactura en las cuales hay soldadura, principalmente en materiales delgados. La soldadura GTAW se usa ampliamente para unir tubos de pared delgada y para hacer pasadas de raíz en juntas de tubos.

La soldadura GTAW mayormente es usada en forma manual, pero también puede ser usado como un proceso automático ó semi-automático. Mediante este proceso se puede soldar en todas las posiciones (Fig. 85). Puede usarse para soldar más tipos diferentes de metales que los que puede soldar cualquier otro proceso de soldadura de arco (Tabla. 15).

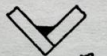



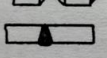

Posición para soldar		Evaluación
1. Plana		A
Filete horizontal		A
2. Horizontal		A
3. Vertical		A
4. De sobrecabeza		A
5. Tubo -- fijo		A

Figura 84. Capacidad de la posición de soldadura (GTAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

Tabla 16. Metales soldables (GTAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

Metal base	Soldabilidad
Aluminios	Soldable
Bronces	Soldable
Cobre	Soldable
Cuproníquel	Soldable
Hierro colado, maleable, nodular	Posible, pero no popular
Hierro forjado	Posible, pero no popular
Plomo	Posible, pero no popular
Magnesio	Soldable
Inconel	Soldable
Níquel	Soldable
Monel	Soldable
Metales preciosos	Soldable
Acero de bajo carbono	Soldable
Acero de baja aleación	Soldable
Acero al alto y mediano carbono	Soldable
Acero de aleación	Soldable
Acero inoxidable	Soldable
Acero para herramientas	Soldable
Titanio	Soldable
Tungsteno	Posible, pero no popular

3.- Limitaciones del proceso.- El principal problema de este proceso es su baja productividad. Otro problema es el alto costo inicial, la fuente de poder y el soplete son costosos. Es justificable usar este proceso cuando se va a soldar un gran número de metales y espesores diferentes, lo que no sería posible con la soldadura de arco con electrodo revestido SMAW.

4.- Rango de espesor del metal base.- En la siguiente figura se puede apreciar los rangos de espesores que se sueldan comúnmente por este método.

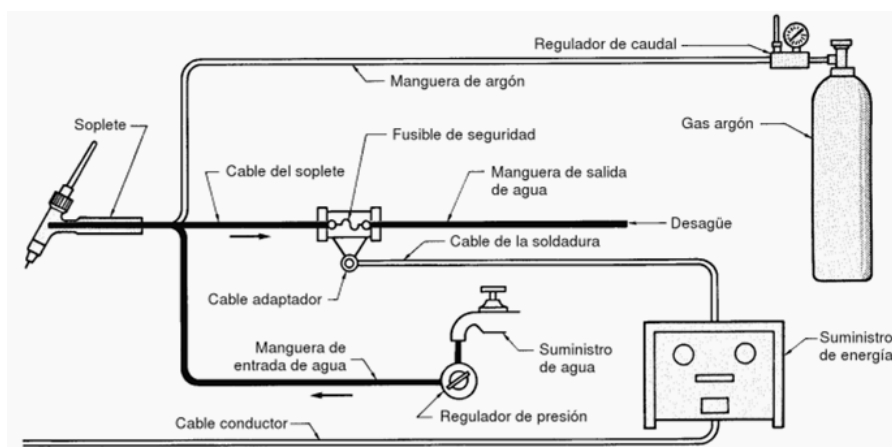
Factor \ Grosor	pulg.	.005	.015	.062	.125	3/16	1/4	3/8	1/2	3/4	1	2	4	8
	mm.	.13	.4	1.6	3.2	4.8	6.4	10	12.7	19	25	51	102	203
Pase individual no preparado	←		→											
Pase individual preparado			←		→									
Multipasadas				←		→		←		→				

Figura 85. Rango de espesor del metal base (GTAW)

Fuente: (B.Carry, 2004)

5.- Circuito y corriente de soldadura.- En la Fig. 87 se muestra el circuito para la soldadura de arco de tungsteno protegida con un soplete de enfriamiento por aire y por agua.

(a)



(b)

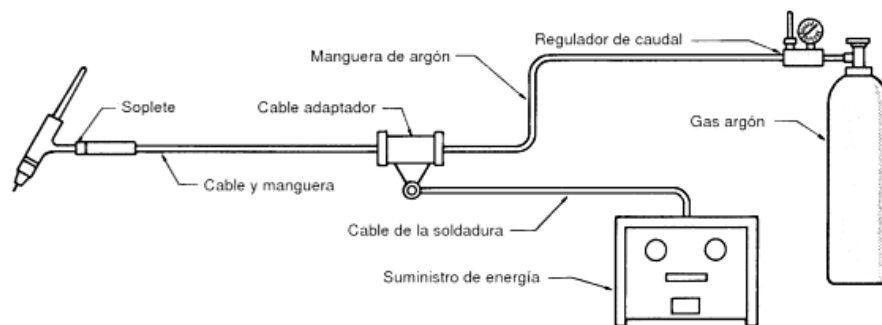


Figura 86. Esquema de configuración GTAW con un soplete de enfriamiento (a) por agua y (b) por aire

Fuente: (Jeffus, 2010)

En el proceso GTAW algunos aspectos son opcionales, como la varilla de aporte, el pedal para regular la corriente mientras se suelda y el agua de enfriamiento que se usa para el soplete (recomendado cuando se suelta con corriente alta).

Se utiliza corriente constante y puede ser alterna ó directa. La corriente directa puede usarse con cualquier polaridad, dependiendo de las exigencias del trabajo. La soldadura con corriente alterna es muy común, pero presenta dificultades como inestabilidad del arco y la rectificación del mismo. (B.Carry, 2004)

6.- Equipo requerido para operar.- Una fuente de poder de corriente constante es utilizada en este proceso. Las máquinas de soldadura convencional ó de corriente constante que se usan para soldadura por arco metálico protegido pueden emplearse para la soldadura por arco de tungsteno con gas. Las máquinas convencionales de c.a deben desacelerarse en un 25% de su capacidad normal, debido a la rectificación del arco.

Las máquinas diseñadas para GTAW incluyen características, como estabilidad de alta frecuencia, válvulas de gas y de agua, son programables, tienen control remoto de corriente, etc.

Una máquina de soldadura GTAW opera en un rango de 3 a 200 A ó de 5 a 300, con una oscilación de 10 a 35 V para un ciclo de trabajo del 60%.

Los sopletes utilizados en este proceso de soldadura han sido diseñados solamente para este proceso. En el proceso manual se utilizan sopletes con manijas, mientras que en el automático no las poseen.

Los sopletes enfriados por aire, diseñados para trabajos ligeros de soldadura hasta aproximadamente 150 A, y los sopletes enfriados por agua, diseñados para trabajos pesados de hasta 600 A están disponibles en el mercado. En la siguiente tabla se resumen los tipos, tamaños y capacidades de los sopletes.

Tabla 17. Tamaño y capacidad de los sopletes para soldadura por arco de tungsteno con gas

Fuente: (B.Carry, 2004)

Ciclo de trabajo 100%	Capacidad de la corriente			Método de enfriamiento	Boquilla diámetro interior	Diámetro del tungsteno		Longitud del tungsteno		Peso del soplete	
	CA	CD EN	Angulo de la cabeza			pulg.	mm	pulg.	mm	onzas	g
50 @ 60%		x	135°	Aire	1/4	0.040-3/32	1.0-2.4	1	25.4	3	85
75	x	x	120°	Aire	5/16	0.020-1/16	0.5-1.6	3-7	76.2-177.8	4	113.4
100	x	x	120° o 135°	Aire	5/16	0.020-5/32	0.5-4.0	2-3-7	50.8-76.2-177.8	4	113.4
150	x	x	120°	Aire	5/16	0.020-5/32	0.5-4.0	3-7	76.2-177.8	5	141.75
200	x	x	120° o 135°	Agua	5/16	0.020-3/32	0.5-2.4	2-3-7	50.8-76.2-177.8	5	141.75
250	x	x	120° o 135°	Agua	3/8	0.020-1/8	0.5-3.2	2-3-7	50.8-76.2-177.8	5	141.75
300	x	x	120°	Agua	3/8	0.020-5/32	0.5-4.0	3-7	76.2-177.8	6	170
350	x	x	120°	Agua	11/16	0.010-5/32	0.3-4.0	3-6	76.2-152.4	6	170
500	x	x	120°	Agua	11/16	0.010-3/16	0.3-4.8	3-7	76.2-177.8	6	170
650	x	x	135°	Agua	5/8	1/8-5/16	3.2-7.9	2-1/2	63.5	7	198.45

El ángulo de cabeza se mide por el ángulo existente entre la línea central del mango y la línea central del tungsteno proveniente del extremo de la formación del arco. Las pistolas (cautines) se evalúan por la capacidad de de transmisión de corriente normalmente a un ciclo de trabajo del 100%. El diámetro interior de una boquilla está dado en pulgadas.

Las boquillas de soplete son fabricadas de distintos materiales, como cerámica, vidrio, metal, etc.

7.- Materiales empleados.- Los materiales utilizados en este proceso son: el metal de aporte, el gas de protección, y el electrodo de tungsteno.

Cuando se sueldan metales extremadamente delgados, no se utiliza material de aporte, sin embargo en la mayoría de aplicaciones se utiliza material de aporte.

El tamaño de la varilla del metal de aporte depende del espesor del metal base, el cual generalmente determina la corriente de soldadura. El metal de aporte generalmente se añade en forma manual, pero también se puede utilizar alimentación automática.

El material del electrodo, generalmente es de tungsteno ó de aleaciones de éste; se utiliza tungsteno porque de todos los metales éste tiene el punto de fusión más alto (3410°C ó 6170°F). Según la AWS existen cuatro tipos de electrodos de tungsteno (Tabla. 18).

Tabla 18. Tipo, tamaño y clasificación de los electrodos de tungsteno

Fuente: (B.Carry, 2004)

Clasificación AWS	Tipo	Color de la punta
EWP	Tungsteno puro	Verde
EWTh1	Adición del 1% de torio	Amarillo
EWTh2	Adición del 2% de torio	Rojo
EW Zr	Adición de ½ de circonio	Café
Diámetro - 0.020 a 0.250 pulgadas (0.5 a 6.4 mm)		
Longitud - 3 a 24 pulgadas (76 a 610 mm)		

Los electrodos de tungsteno vienen con dos acabados: normal ó pulido. El acabado pulido proporciona un electrodo extremadamente suave y perfectamente redondo, el cual tiene mejor capacidad para conducir el calor desde el electrodo hasta la boquilla del soplete. El agregado de torio y circonio que poseen algunos de los electrodos (como se indica en la figura anterior), proporciona un incremento en la capacidad de transporte de corriente del electrodo, un arco más estable y un mejor encendido del mismo.

La boquilla debe ser del tamaño adecuado para el tungsteno que se esté usando. Todo el conjunto debe ser hermético, de modo que el calor del

arco sea transmitido al cuerpo del soplete donde pueda disiparse. (B.Carry, 2004)

Una cantidad excesiva de corriente ó un electrodo demasiado pequeño causará erosión excesiva de tungsteno. Las partículas de tungsteno pueden llegar a depositarse en el metal de soldadura. Si la corriente es demasiado baja, ó si el electrodo tiene un diámetro demasiado grande, el arco se desviará en forma errática hacia el extremo del electrodo.

El electrodo debe mostrar un extremo redondeado y éste no debería exceder $1\frac{1}{2}$ veces el diámetro del electrodo (Fig. 88). El ángulo en que se afila el electrodo debe estar en relación con la corriente de soldadura y con el espesor del metal que se esté soldando. Generalmente varía de 30 a 120°; 60° es el ángulo más común. (B.Carry, 2004)

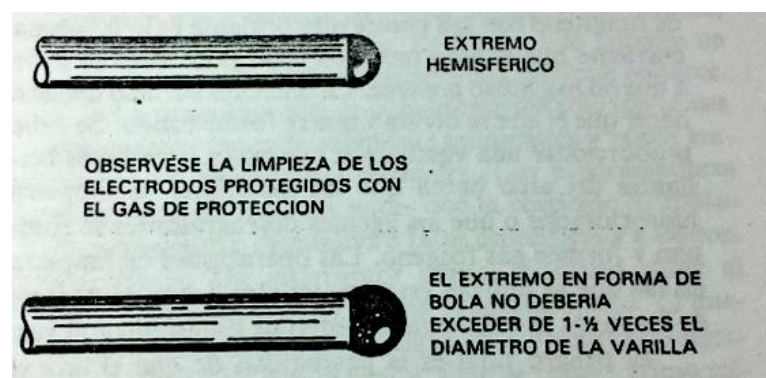


Figura 87. Condición del extremo del arco del electrodo de tungsteno

Fuente: (B.Carry, 2004)

El gas de protección usado en soldadura GTAW es un gas inerte. Sólo se usa argón y helio (Fig. 89) puesto que los otros gases inertes son mucho más costosos para este tipo de uso. La selección del gas se basa en los metales que se van a soldar.

El argón se usa con mayor frecuencia, es fácilmente obtenible, más pesado que el helio y ligeramente más pesado que el aire, el cual proporciona una protección de arco más eficiente a tasas de flujo más bajas. El argón es mejor para el encendido del arco y opera a un voltaje de arco más bajo. (B.Carry, 2004)

El helio es mucho más ligero que el argón ó que el aire y por lo tanto tiende a alejarse de la zona de soldado; se requieren tasas de flujo más altas. Es posible soldar a una velocidad más alta con helio que con argón. (B.Carry, 2004)

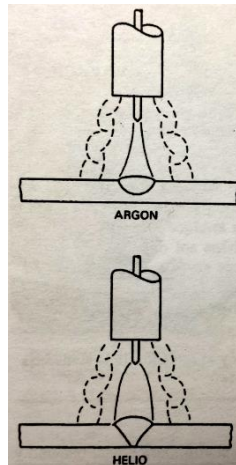


Figura 88. Comparación del arco de tungsteno con argón y helio

Fuente: (B.Carry, 2004)

Hay algunos casos en los que el helio y el argón se mezclan para obtener un gas de protección óptimo para un metal ó soldadura en particular.

8.- Uso industrial y aplicaciones típicas.- El uso de la soldadura GTAW es ampliamente difundido en el mundo. Se lo utiliza a gran medida para soldar metales no ferrosos. proyectiles, estructuras, diversos tanques (en naves espaciales), y miles de metros de tubería incluidos en los motores de los cohetes, son soldados mediante este proceso.

La tubería de diámetro pequeño y de pared delgada se suelda casi exclusivamente por medio de este proceso. Otro uso muy importante del proceso GTAW es la elaboración de soldadura de pases de raíz en las tuberías de la industria petrolera: pared delgada y gruesa, donde es indispensable que la soldadura sea de alta calidad.

3.4 Defectología en Depósitos de Soldadura

3.4.1 Concepto de Discontinuidad, Indicación y Defecto

3.4.1.1 Discontinuidad

Una discontinuidad es toda interrupción en la estructura física ó configuración del objeto, sea ó no intencional. Como parte del proceso de los NDT, el criterio de evaluación es aplicado para determinar si la discontinuidad encontrada puede ó no afectar la utilidad del material. En la siguiente tabla se muestra los procesos de soldadura y las posibles discontinuidades que se pueden encontrar en ellos.

Tabla 19. "Posibles defectos en procesos de soldadura"

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

Welding Discontinuities							
Welding Process	Cracks	Incomplete penetration	Lack of fusion	Porosity	Slag inclusions	Tungsten inclusions	Undercut
Shielded metal arc welding (SMAW)	X	X	X	X	X		X
Submerged arc welding (SAW)	X	X	X	X	X		X
Gas tungsten arc welding (GTAW)	X	X	X	X		X	X
Gas metal arc welding (GMAW)	X	X	X	X			X
Flux-cored arc welding-self shielded (FCAW-S)	X	X	X	X	X		X
Flux-cored arc welding-gas shielded (FCAW-G)	X	X	X	X	X		X

3.4.1.2 Indicaciones

Son las respuestas a un ensayo no destructivo. Se clasifican en: falsas, relevantes y no relevantes.

1.- Indicaciones falsas.- Son las indicaciones producidas por cualquier otra cosa que no sea una discontinuidad; suelen ser generadas por un inapropiado procedimiento ó por requisitos del ensayo mismo, como ejemplo podemos citar las marcas generadas por los IQIs en una radiografía.

2.- Indicaciones no relevantes.- Son indicaciones causadas por una condición ó por discontinuidades que no son rechazables, ya que pueden ser tan pequeñas que no se las considerará relevantes.

3.- Indicaciones relevantes.- Son el resultado de discontinuidades ya presentes, deben ser evaluadas por un inspector calificado para determinar su severidad. Buscar y analizar indicaciones relevantes es una etapa importante para prevenir serios problemas futuros.

3.4.1.3 Defecto

Al localizar indicaciones relevantes en el material, se debe proceder a aplicar los criterios de aceptación/rechazo presentes en las normas de referencia que se esté utilizando, en caso de que la indicación no cumpla con los requisitos de la norma, ésta se convierte en defecto. Los defectos deben ser corregidos puesto que son causantes de problemas futuros en la vida útil del material.

3.4.2 Detección de Discontinuidades típicas en los Depósitos de Soldadura

Las discontinuidades típicas generadas en los depósitos de soldadura son nueve, a continuación se detalla cada una de éstas:

3.4.2.1 Concavidad de Raíz

1.- Descripción.- Es producida en materiales soldados, ferrosos y no ferrosos. La soldadura toma una apariencia cóncava resultado de insuficiente entrada de calor mientras se deposita el material en el pase de raíz (Fig. 90).

Se genera por la contracción excesiva del metal de soldadura depositado en la raíz cuando la soldadura fundida se solidifica. Causa un cambio dimensional en el espesor de la soldadura que puede ser menor al que se requiere.

Esta condición es promovida por una mala técnica de soldado, soldadura fuera de posición, exceso de separación de la junta, amperaje excesivo, velocidad inadecuada ó la no adición del suficiente material.

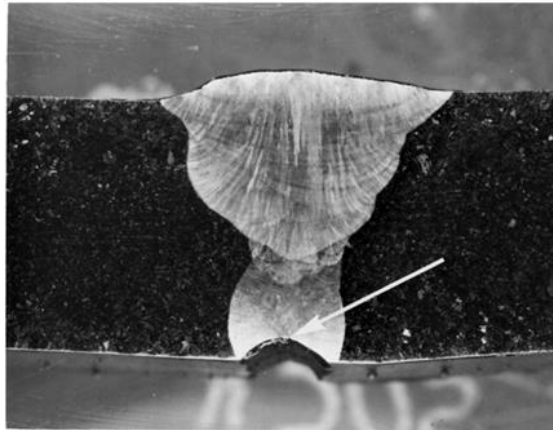


Figura 89. Concauidad de raíz

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

2.- Detección de Concauidad Superficial de Raíz con RT.- Aparece en la radiografía como un cambio ligero y gradual de densidad (Fig. 91). Las ventajas de aplicar RT son: (1) detecta condiciones de concauidad, (2) puede asegurar la existencia de una concauidad mínima ó no.

Se debe tener en cuenta las siguientes precauciones al aplicar RT para detectar este defecto: (1) se necesita hacer buenas comparaciones de densidad para aceptar ó rechazar la concauidad de raíz, (2) la técnica debe ser consistente y las localizaciones necesitan ser específicamente identificadas.

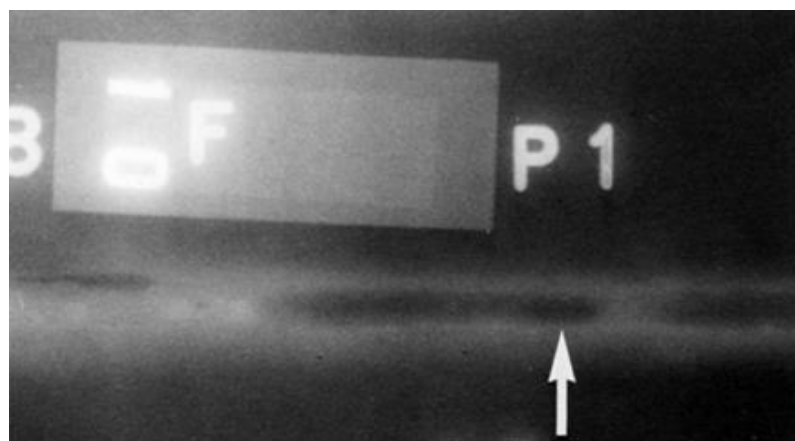


Figura 90. Radiografía con: concauidad de raíz

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.4.2.2 Convexidad de Raíz

1.- Descripción.- Es producida en materiales soldados, ferrosos y no ferrosos, en algunos casos también se la conoce como exceso de penetración. La soldadura toma una apariencia convexa resultado de una excesiva entrada de calor mientras se deposita el material en el pase de raíz, generando un refuerzo indeseable a lo ancho de la raíz de la soldadura (Fig. 92).

Se genera generalmente cuando la temperatura de soldado está cerca de la temperatura de fusión del material base. Esta condición está generalmente asociada con la inexperiencia del soldador y una técnica inapropiada de soldado.

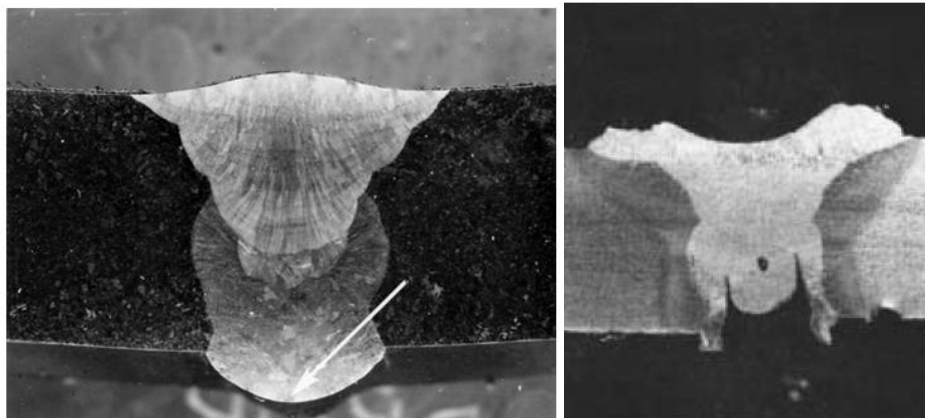


Figura 91. Convexidad de raíz

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

2.- Detección de Convexidad de Raíz con RT.- Aparece en la radiografía como un cambio ligero y gradual de densidad (Fig. 93). Las ventajas de aplicar RT son: (1) Detecta condiciones de convexidad, (2) puede identificar áreas concernientes.

Las siguientes limitaciones deben tomarse en cuenta al aplicar RT para detectar este defecto: (1) Las comparaciones de los cambios de densidad son aproximaciones y no son muy específicas, (2) dificultad para establecer valores cuantitativos para el exceso de penetración.

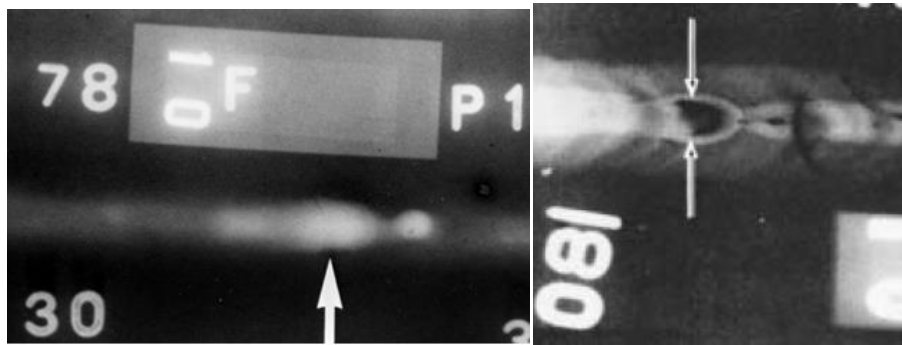


Figura 92. Radiografías con: convexidad de raíz

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.4.2.3 Inclusiones

1.- Descripción.- Es producida en materiales soldados, ferrosos y no ferrosos, se las puede encontrar tanto en la superficie como en las capas subsuperficiales (Fig. 94).

Las inclusiones pueden tener cualquier forma, sin embargo las inclusiones de tungsteno suelen ser de forma redonda. Pueden ser metálicas ó no metálicas y suelen aparecer individualmente, linealmente distribuidas ó esparcidas en la soldadura. Las más comunes son inclusiones de escoria y de tungsteno.

Las inclusiones metálicas son generalmente partículas de metal de diferente densidad que el material de soldadura ó el material base. Las inclusiones no metálicas son óxidos, sulfuros, escoria ó cualquier otro material no metálico atrapado en la soldadura ó entre la soldadura y el metal base.

Las inclusiones de escoria son generalmente creadas por fundentes fundidos empleados en los procesos de soldadura por arco. En los procesos de soldadura de pases múltiples, la no remoción correcta de escoria entre los pases pueden generar inclusiones de escoria. Las inclusiones de tungsteno generalmente ocurren cuando partículas del electrodo de tungsteno son transferidas al metal soldado.

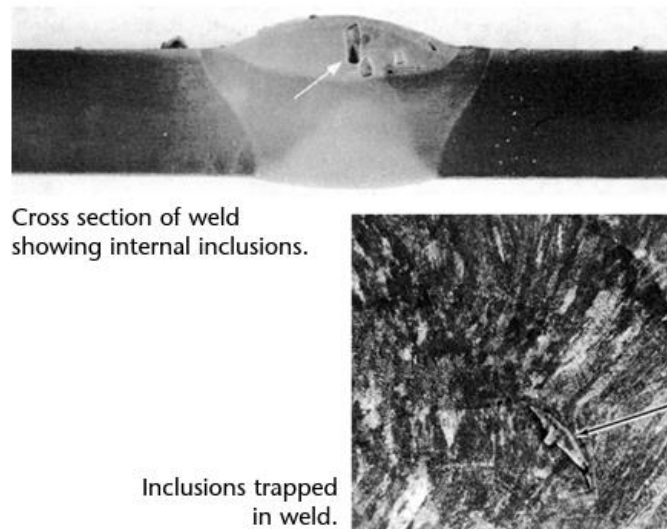


Figura 93. Inclusiones

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

2.- Detección de Inclusiones con RT.- Un material menos absorbedor se muestra con una mayor densidad de película en la radiografía y un material más absorbedor se muestra con una densidad de película menor.

Las inclusiones metálicas, generalmente aparecen de forma redondeada, como puntos ó como espacios alargados, ambos de color blanco. Pueden estar aislados, en una distribución lineal ó en esparcidas en grupos (Fig. 95a).

Las inclusiones no metálicas, aparecen en la radiografía como sombras de forma circular ó alargada, de contornos irregulares ó dispersas a través de la soldadura. La radiografía es universalmente usada para detectar inclusiones (Fig. 95b).

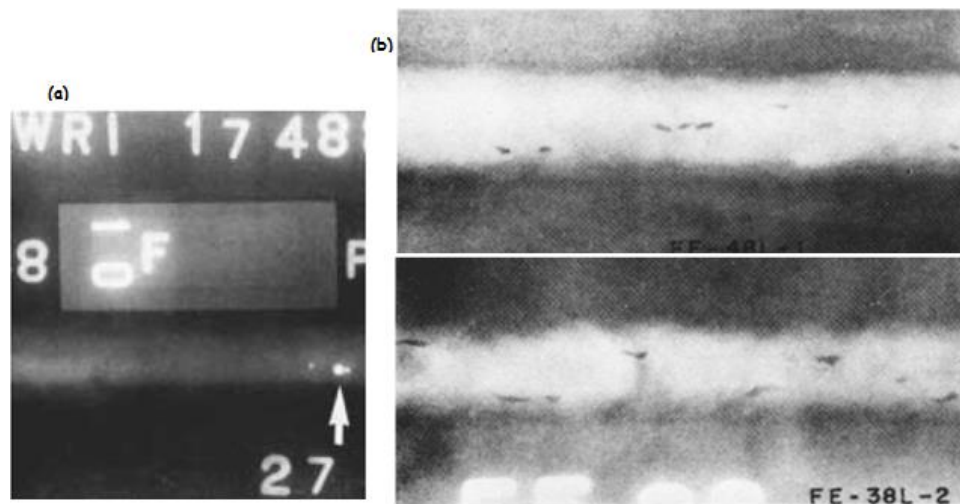


Figura 94. Radiografías con: (a) inclusión de tungsteno, (b) inclusión de escoria

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.4.2.4 Fusión Incompleta

1.- Descripción.- Se la localiza en la soldadura de pases múltiple. También es conocida como “falta de fusión”.

La falta de fusión es la no adherencia entre el metal soldado y el metal base ó el metal soldado con el metal soldado (en múltiples pases).

Esta falta de adherencia (Fig. 96) resulta cuando el metal base ó metal soldado depositado previamente no llega al punto de fusión en el punto de deposición del metal de soldadura.

La falta de remoción de escoria, óxidos u otro material externo que no sea el metal de aleación de la junta soldada, también pueden generar falta de fusión.

Esta condición puede ser causada por un tejido de soldadura impropio, baja corriente de soldadura ó velocidades de soldado muy altas.

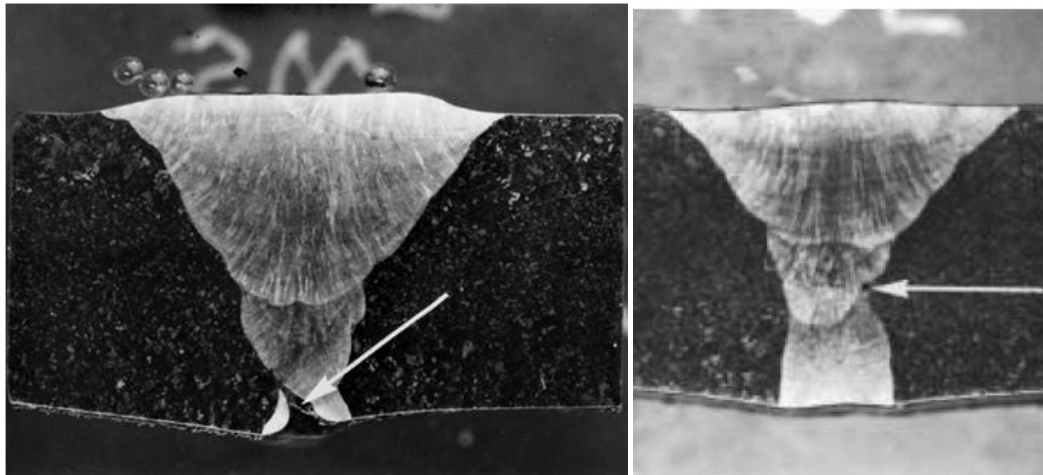


Figura 95. Fusión incompleta

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

2.- Detección de Falta de Fusión con RT.- Usualmente tiene una orientación angular con la superficie, lo cual hace complicado detectarla por RT. Cuando es observada no es claramente definida, pero tiene un indicador de alineación que va en la misma dirección de la soldadura depositada.

Una de las ventajas de aplicar RT es que se pueden detectar pequeñas áreas con falta de fusión. Una gran limitación del RT es que no puede detectar la orientación angular de la falta de fusión.

Cuando se trata del proceso SMAW puede ser confundida como escoria, se debe tener mucha precaución.

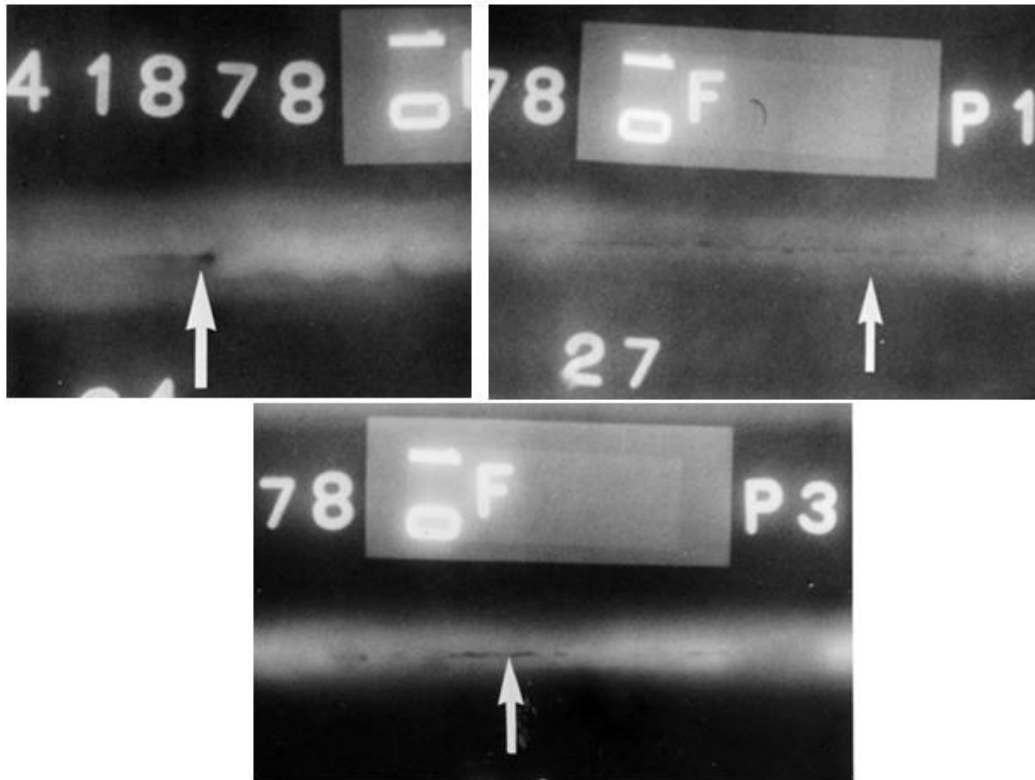


Figura 96. Radiografías con: Falta de fusión

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.4.2.5 Falta Penetración

1.- Descripción.- Es producida en materiales soldados, ferrosos y no ferrosos. Es interna ó externa. Generalmente tiene forma irregular y filamentosa, ocurre en la raíz de la soldadura y va paralela en la dirección de soldadura (Fig. 98).

La falta de penetración es causada cuando se genera un espacio insuficiente en la raíz (al momento de preparar la junta para soldarla) ó cuando los esfuerzos residuales de la soldadura causan que el espacio de separación de la raíz se contraiga.

Puede ser el resultado de un inadecuado calor mientras se realiza el pase de raíz, también puede ser causada por un mal diseño de la junta ó por un mal procedimiento de soldadura.

Esta condición es considerada más severa que las porosidades ó escorias ya que es un alto concentrador de esfuerzos.

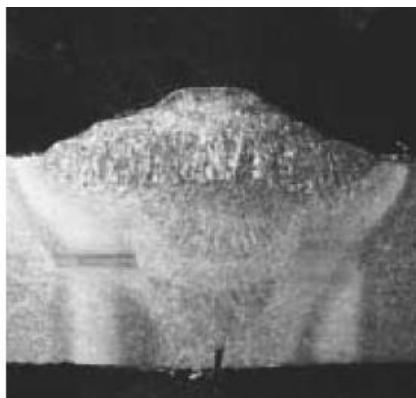


Figura 97. Falta de penetración

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

2.- Detección de Falta Penetración con RT.- Usualmente es fácil de detectar aplicando RT por su localización en la soldadura.

Genera una imagen muy definida de área alargada, oscura, de longitud y ancho variable, en la radiografía. Puede ser continua ó intermitente y puede aparecer en el centro de la soldadura en la unión de los pases múltiples.

Una precaución muy importante a considerar es que la orientación de la falta de penetración en relación con la fuente radiográfica, es crítica.

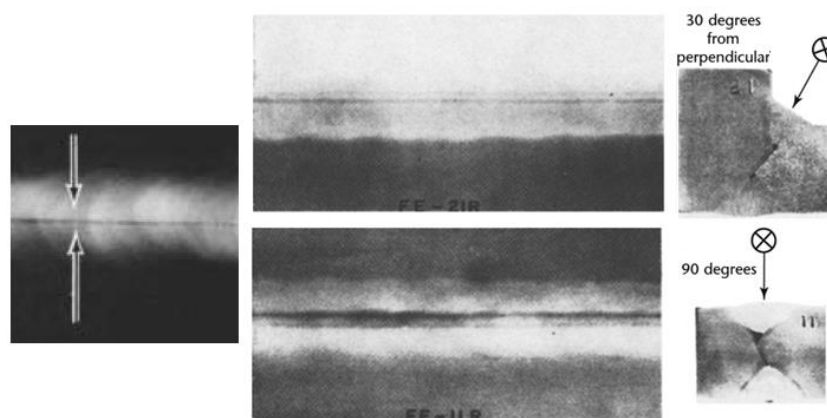


Figura 98. Radiografías con: falta de penetración

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.4.2.6 Porosidades

1.- Descripción.- Es producida en materiales soldados, ferrosos y no ferrosos. Pueden ser superficiales ó subsuperficiales. Tiene apariencias

redondeadas, alargadas ó formas de gota. Pueden estar esparcidas uniformemente a través de la soldadura ó aisladas en pequeños grupos. También se pueden concentrar en la raíz ó en el pie de la soldadura.

Los poros (Fig. 100) pueden tener también una forma no esférica, formas alargadas tubulares llamadas “agujeros de gusano”.

Estos son vacíos que resultan cuando el gas queda atrapado mientras el metal de fundición se solidifica. La porosidad es causada por mucha humedad en el material de relleno ó el material base, también se causa por un inapropiado precalentamiento ó por falta de limpieza.

La porosidad linear es una condición que envuelve a un número de poros alineados y separados por una distancia estipulada en los criterios de aceptación.

En general, la porosidad no es considerada una discontinuidad crítica a menos que (1) se encuentre en grandes cantidades, (2) contenga formas alargadas tubulares ó (3) significante números de poros están alineados y separados distancias cortas.



Figura 99. Porosidad

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

2.- Detección de Porosidades con RT.- La imagen radiográfica de las porosidades redondeadas aparece como una forma ovalada con ligeros bordes, las porosidades alargadas aparecen también de forma ovalada pero alargada, pueden llegar a ser tan largas como 380 mm.

RT es el método universal usado en los NDT para la detección de porosidades en soldaduras.

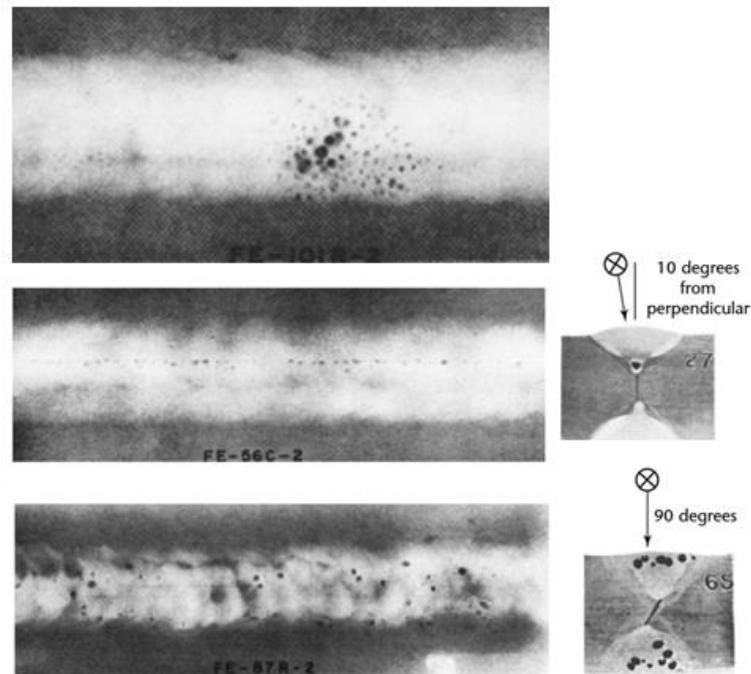


Figura 100. Radiografías con: porosidades

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.4.2.7 Inserción No Consumida

1.- Descripción.- Es producida en materiales soldados, ferrosos y no ferrosos, se localizan en la superficie de la raíz en forma de gota (Fig. 102).

Son el resultado de material de relleno que no fue completamente fundido y fusionado en la junta de raíz. Esta condición es causada por una baja corriente de soldado, un procedimiento de tejido inadecuado, diseño de juntas incorrecto y una velocidad de soldado incorrecta.

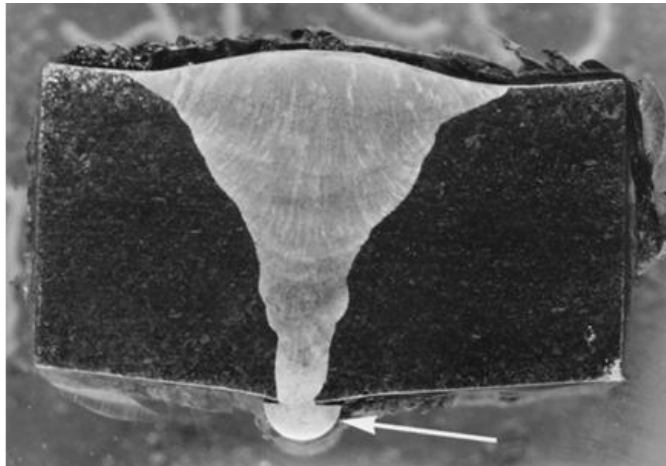


Figura 101. Inserción no consumida

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

2.- Detección de Inserción No Consumida con RT.- Aparece en la radiografía como un área de densidad más clara, puede tomar la forma de un inserto ó simplemente aparecer con una densidad baja.

Las ventajas al usar RT para detectar esta discontinuidad son (1) es apta para detectar a través de todo el volumen de soldadura, (2) puede determinar la localización del inserto no consumido. Una limitación del método es que no se puede determinar la profundidad exacta del inserto no consumido.

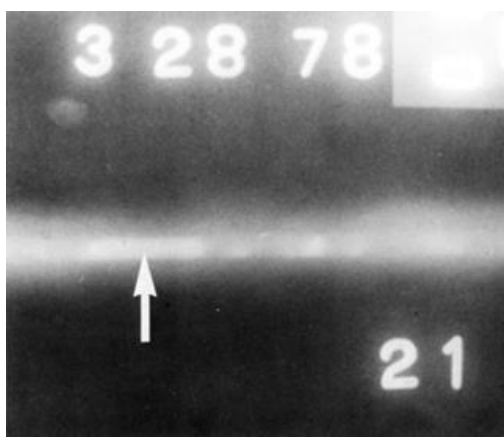


Figura 102. Radiografía con: Inserción no consumida

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.4.2.8 Mordedura

1.- Descripción.- Es producida en materiales soldados, ferrosos y no ferrosos, se las encuentra en cualquier punto donde el metal de soldadura y el metal base se unan. Puede ser externa ó interna.

La mordedura es una ranura (Fig. 104), localizada sobre la superficie de la soldadura, en la unión del metal base con el metal de soldadura.

Las mordeduras son generalmente consideradas como una discontinuidad de cuidado porque el resultado es una reducción del área seccional de la zona soldada y por lo tanto una reducción de su capacidad de soportar carga. Se generan como resultado de procedimientos de soldadura inadecuados, excesiva cantidad de amperaje ó una varilla de soldado muy larga.

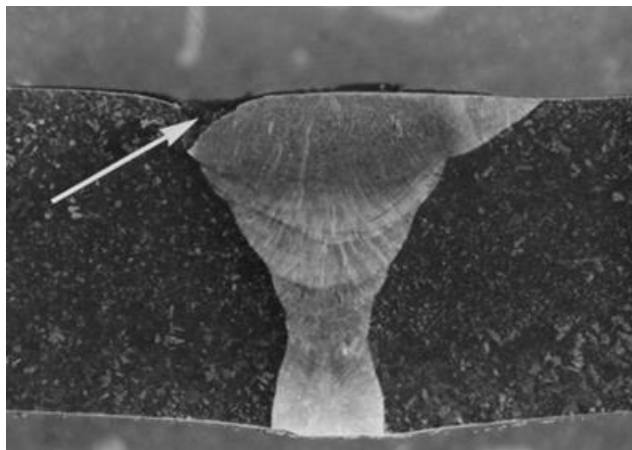


Figura 103. Mordedura

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

2.- Detección de Mordeduras con RT.- Aparece en la radiografía como un área oscura localizada en la unión de la soldadura y el metal base (Fig. 105). Una de las ventajas de usar RT es que la localización de la discontinuidad es evidente.

Las limitaciones del método son: (1) la indicación obtenida de una mordedura puede causar confusión cuando se trata de identificar otro tipo de discontinuidades presentes, (2) La interpretación de las mordeduras no provee valores cuantitativos de profundidad.

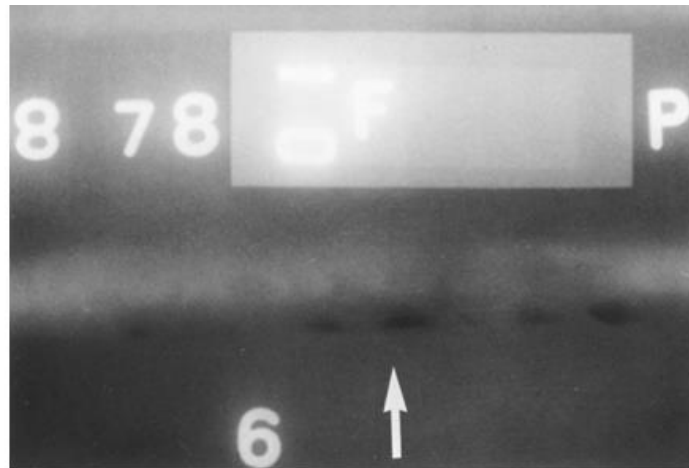


Figura 104. Radiografía con: Mordeduras

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.4.2.9 Fisuras

1.- Descripción.- Las fisuras son fracturas ó rupturas del material de soldadura que ocurren cuando el esfuerzo localizado en el área de ruptura excede la resistencia última a la tensión del metal de soldadura.

Tres son las variedades más encontradas de fisuras en soldaduras: (1) Fisura longitudinal, (2) fisura transversal, (3) fisura de raíz.

Fisuras longitudinales.- Son las fisuras orientadas a lo largo de la longitud ó aproximadamente paralelas al eje longitudinal, de la soldadura (Fig. 106).

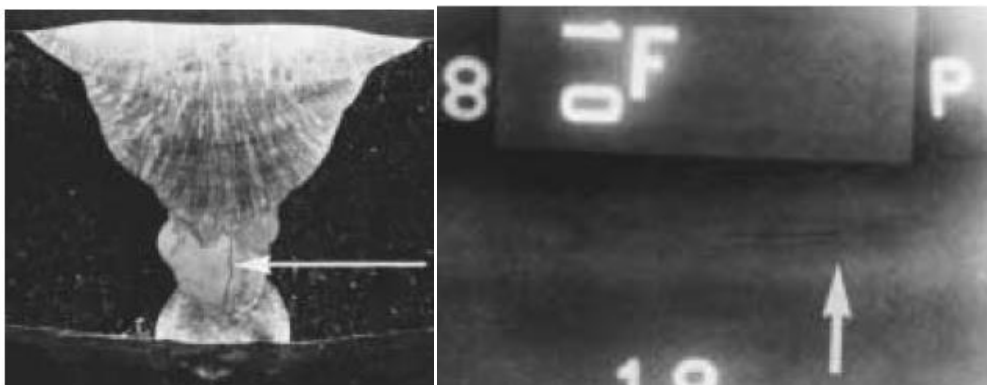


Figura 105. Fisuras longitudinales

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

Fisuras transversales.- Estas fisuras son aproximadamente perpendiculares al eje longitudinal de la soldadura (Fig. 107).

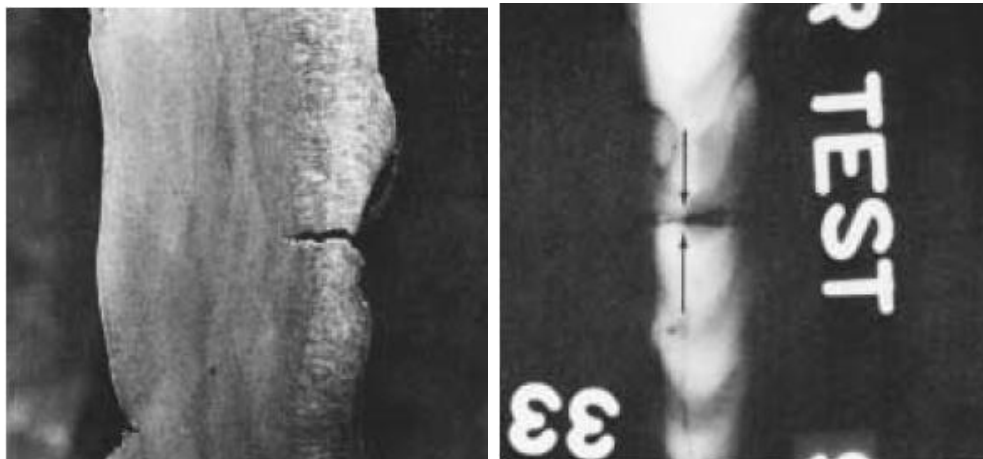


Figura 106. Fisuras transversales

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

Fisuras de raíz.- Son fisuras longitudinales localizadas en el pase de raíz (Fig. 108).

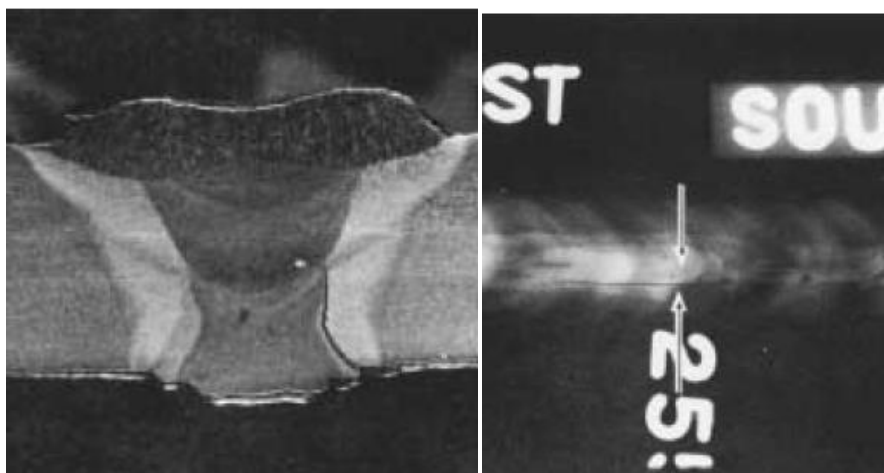


Figura 107. Fisuras de raíz

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

3.5 Evaluación e Interpretación de Soldaduras Mediante Radiografía

3.5.1 Normas aplicadas en Facilidades Petroleras Ecuatorianas, Referentes al Uso de Ensayos No Destructivos

En los campos petroleros ecuatorianos se han aceptado ciertos códigos y normativas para detallar el uso y aplicación de ensayos no destructivos en la construcción de facilidades petroleras. Los códigos utilizados son de origen Estadounidense; se los ha seleccionado y aceptado para su uso, en base a procedimientos internos de las empresas que realizan estos trabajos. Caber recalcar que estos procedimientos son específicamente de uso interno y totalmente confidenciales hacia el público en general.

A continuación se presenta una breve descripción de los códigos y estándares utilizados en Ecuador, para realizar control de calidad a soldaduras dentro y fuera de estaciones petroleras.

3.5.1.1 “ASME Boiler and Pressure Vessel Code”

Section V – Nondestructive Examination

Esta sección del código hace referencia a la evaluación de materiales mediante ensayos no destructivos, se encuentra dividido en dos subsecciones:

1. subsección A;
2. subsección B.

1.- Subsección A - métodos no destructivos de evaluación.- Esta sección del código contiene los métodos y requerimientos para la evaluación no destructiva (NDT). Estos métodos tienen como objetivo detectar imperfecciones superficiales y subsuperficiales en materiales, soldaduras, partes fabricadas, y componentes. Incluye los métodos de examinación: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

- ✓ radiografía industrial,
- ✓ ultrasonidos;
- ✓ líquidos penetrantes;
- ✓ partículas magnéticas;
- ✓ Eddy Current;
- ✓ inspección visual;
- ✓ ensayo de fugas;
- ✓ emisiones acústicas.

Algunos de los artículos que podemos encontrar en esta subsección del código ASME V versión 2010, son: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

- ✓ *Artículo 1.-* Requerimientos Generales ;
- ✓ *Artículos del 2 al 13.-* Evaluación mediante las 8 técnicas de ensayos no destructivos mencionadas anteriormente, cada técnica consta con dos secciones de apéndices: (1) mandatorios, (2) no mandatorios;
- ✓ *Artículo 14.-* Calificación del Sistema de Evaluación (NDT).

Para los documentos que hacen referencia directamente al artículo 1 (requerimientos generales) con calificación de personal que aplica ensayos no destructivos, la calificación deberá ser de acuerdo con la práctica escrita del empleador, la cual debe estar en conformidad con uno de los siguientes documentos: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

- ✓ ASNT No. SNT-TC-1A, prácticas recomendadas;
- ✓ ANSI/ASNT CP-189, estándares para calificación y certificación de personal en ensayos no destructivos;
- ✓ Programas nacionales ó internacionales de certificación como ASNT – ACCP, pueden ser utilizados alternativamente.

2.- Subsección B – documentos adoptados por la sección V.-

Algunos de los artículos que podemos encontrar en esta subsección del código de la ASME V revisión 2010, son:

- ✓ *Artículos del 22 al 29.*- Estándares para cada uno de los 8 métodos mencionados anteriormente;
- ✓ *Artículo 30.*- Terminología de los Estándares de Evaluación No Destructivos.

Para mayor información sobre las secciones y artículos, dirigirse al código citado.

3.5.1.2 “API STANDARD 1104”

Welding of Pipelines and Related Facilities

Este estándar cubre las soldaduras por arco y gas de uniones a tope, filete y de tipo socket de tuberías de acero al carbono y de baja aleación utilizadas en la compresión, bombeo y transporte de petróleo crudo, productos del petróleo, gases combustibles, dióxido de carbono, nitrógeno y, donde sea aplicable, cubre soldaduras en sistemas de distribución. Es aplicable tanto para construcciones nuevas como aquellas que se encuentran en servicio. La soldadura puede ser hecha por SMAW, SAW, GTAW, GMAW, FCAW, soldadura por arco plasma, soldadura oxiacetilénica ó soldadura por chisporroteo ó una combinación de estos procesos usando una técnica de soldadura manual, semi automática, mecanizada, ó automática, ó una combinación de estas técnicas. Las soldaduras pueden ser producidas en posición ó mediante rotación, ó a través de una combinación de éstas. (American Petroleum Institute, 2005)

Este estándar también cubre los procedimientos para ensayos de radiografía, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y ultrasonidos, así como los estándares de aceptación a ser aplicados en la producción de soldaduras ensayadas destructivamente ó inspeccionadas por los métodos de radiografía, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, ultrasonidos e inspección visual. (American Petroleum Institute, 2005)

Se encuentra dividido en secciones. A continuación, se citará algunas de las secciones del estándar API 1104 versión 2005 que hacen referencia a

la aplicación y el uso de ensayos no destructivos: (American Petroleum Institute, 2005)

- ✓ *Sección 8.*- Inspección y Ensayo de Soldaduras de Producción;
- ✓ *Sección 9.*- Estándares de Aceptación para Ensayos No Destructivos;
- ✓ *Sección 10.*- Reparación y Remoción de Defectos;
- ✓ *Sección 11.*- Procedimientos para Ensayos No Destructivos.

Para mayor información sobre estas secciones, dirigirse al código citado.

3.5.1.3 “ASME Code for Pressure Piping”

Section B31.3 – Process Piping

Las reglas para el código de tuberías de proceso sección B31.3, han sido desarrolladas considerando tubería encontrada típicamente en refinerías de petróleo, plantas químicas, farmacéuticas, textiles, plantas de papel, plantas y terminales de proceso relacionadas.

Este código prescribe requerimientos para materiales y componentes, diseño, fabricación, ensamble, erección, examinación, inspección y evaluación de tuberías. El código aplica a tuberías para todos los fluidos, incluyendo: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

- ✓ químicos primarios, intermedios y finalizados;
- ✓ productos de petróleo;
- ✓ gas, vapor, aire y agua;
- ✓ sólidos fluidizados;
- ✓ refrigerantes;
- ✓ fluidos criogénicos.

Se divide en capítulos, cada capítulo generalmente se encuentra separado por partes, a continuación se cita dos de los capítulos del código ASME B31.3 revisión 2010, en los cuales se habla sobre la aplicación y el uso de ensayos no destructivos: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

- ✓ *Capítulo VI.*- Inspección, Evaluación, y Pruebas;
- ✓ *Capítulo IX.*- Tubería de Alta Presión;

Capítulo IX.- Parte 10.- Inspección, Evaluación, y Pruebas.

Para mayor información sobre estos capítulos, dirigirse al código citado.

3.5.1.4 “ASME Boiler and Pressure Vessel Code”

Section IX – Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators

La sección IX del código ASME se relaciona con la calificación de soldadores, operarios de soldadura, soldadores para soldadura fuerte y operarios de soldadura fuerte, y los procedimientos que ellos emplean al soldar ó al hacer soldadura fuerte de acuerdo con el código de calderas y recipientes sujetos a presión de la ASME y con el código para tuberías de presión ASME 31. Está dividido en dos partes: la Parte QW da requerimientos para soldar y la Parte QB contiene requerimientos para soldadura fuerte. (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

A continuación, se cita algunas partes del código ASME IX versión 2010, donde se habla sobre la aplicación y el uso de ensayos no destructivos: (The American Society of Mechanical Engineers, 2010)

- ✓ *QW-190.*- Otros Ensayos y Pruebas;
- ✓ *QW-191.*- END Volumétricos (Gammagrafía y Ultrasonidos);
- ✓ *QW-194.*- Examen Visual;
- ✓ *QW-195.*- Examen de Líquidos Penetrantes.

Para mayor información sobre estas partes, dirigirse al código citado.

3.5.1.5 “API STANDARD 650”

Welded Steel Tanks for Oil Storage

Este estándar cubre requerimientos para materiales, diseño, fabricación, montaje y pruebas de tanques soldados verticales cilíndricos, no

enterrados con extremo superior abierto ó cerrado en varios tamaños y capacidades para presiones internas aproximadas a la atmosférica (no deben exceder el peso de las láminas del techo), pero se permiten presiones internas más altas cuando se cumplen requerimientos adicionales. Este estándar aplica para tanques en los cuales la totalidad del fondo del tanque está soportado uniformemente y para tanques en servicio no refrigerado que tienen una temperatura máxima de diseño de 90°C (200°F) ó menos. (American Petroleum Institute, 2007)

Está diseñado para construir tanques con seguridad adecuada y costos razonables para almacenamiento de petróleo y sus derivados y otros productos líquidos comúnmente usados y almacenados por la industria petrolera. El código no establece tamaños específicos de tanques y por el contrario se puede escoger cualquier tamaño que sea necesario. Su intención es ayudar a los clientes y a los fabricantes a comprar, fabricar y montar los tanques y no pretende prohibir la compra ó fabricación de tanques que cumplan con otras especificaciones. (American Petroleum Institute, 2007)

La sección 8 del estándar API 650 revisión 2007, es la que hace referencia al uso y aplicación de ensayos no destructivos. A continuación, se cita algunas de las secciones: (American Petroleum Institute, 2007)

- ✓ *Sección 8.1.*- Método radiográfico;
- ✓ *Sección 8.2.*- Evaluación por Partículas Magnéticas;
- ✓ *Sección 8.3.*- Evaluación por Ultrasonidos;
- ✓ *Sección 8.4.*- Evaluación por Líquidos Penetrantes;
- ✓ *Sección 8.5.*- Evaluación Visual.

Para mayor información sobre estas secciones, dirigirse al estándar citado.

3.5.1.6 “ASME Boiler and Pressure Vessel Code”

Section VIII division 1- Rules for Construction of Pressure Vessels

La división 1, contiene requerimientos obligatorios, prohibiciones específicas, y guías no obligatorias para materiales, diseño, fabricación, evaluación, inspección, pruebas, certificación y alivio de presión para recipientes a presión. La División se encuentra dividida en tres subsecciones, apéndices mandatorios y apéndices no mandatorios.

La subsección A, consiste en la parte UG, la cual cubre los requerimientos generales aplicables a todos los recipientes a presión. La subsección B, cubre los requerimientos específicos que son aplicables a los varios métodos usados en la fabricación de recipientes a presión; esta subsección consiste en las partes UW, UF y UB (soldadura/ forja/ soldadura fuerte, respectivamente). La subsección C cubre requerimientos específicos que son aplicables a las varias clases de materiales usados en la construcción de recipientes a presión, esta subsección consiste en las partes UCS, UNF, UHA, UCI, UCL, UCD, UHT, ULW y UTL. (The American Society of Mechanical Engineers, 2007)

A continuación, se cita algunas de las partes del código ASME VIII División 1 revisión 2007, donde se habla sobre la aplicación y uso de ensayos no destructivos: (The American Society of Mechanical Engineers, 2007)

- ✓ *Parte UW-50*.- Evaluación no destructiva de soldaduras en recipientes testeados neumáticamente;
- ✓ *Parte UW-51*.- Examinación radiográfica de juntas soldadas;
- ✓ *Parte UW-53*.- Técnica para examinación con ultrasonidos de juntas soldadas;
- ✓ *Apéndice 6*.- Métodos de examinación con partículas magnéticas;
- ✓ *Apéndice 8*.- Métodos de examinación con líquidos penetrantes;
- ✓ *Apéndice 12*.- Examinación ultrasónica de soldaduras.

Para mayor información sobre estas partes, dirigirse al código citado.

3.5.2 Resumen de Criterios de Aceptación/Rechazo Aplicados en Facilidades Petroleras Ecuatorianas para Evaluar el Resultado de las Radiografías Generadas por el Ensayo de Gammagrafía

En las tablas del Anexo 1, se presenta un resumen de los criterios de aceptación/ rechazo utilizados en facilidades petroleras ecuatorianas para evaluar e interpretar el resultado de las indicaciones generadas por el ensayo de gammagrafía. Como se indicó anteriormente, el uso de estas normas es en base a procedimientos internos de las empresas que realizan los trabajos de construcción dentro de facilidades petroleras, procedimientos que son específicamente para uso interno y totalmente confidencial hacia el público en general.

Estas tablas fueron creadas en base a las siguientes normas:

- ✓ **API 1104 Revisión 2013**, para líneas y ductos fuera de las estaciones (inspección en juntas de producción y calificación de soldadores).
- ✓ **API 650 Revisión 2010**, ver: ASME Sección VIII División 1 UW-51(b).
- ✓ **ASME Sección VIII División 1 UW-51(b) Revisión 2007**
- ✓ **ASME B31.3 Revisión 2012**, tabla 341.3.2 (para inspección de juntas soldadas en estaciones, pozos y refinerías).
- ✓ **ASME IX Revisión 2010**, QW-91 Volumetric NDE

3.5.3 Radiografías de Referencia en Depósitos de Soldadura

Las radiografías de referencia se encuentran dentro del Anexo 2, se entregan 9. Cada radiografía cuenta con una tabla descriptiva, en la cual se indican aspectos como:

- ✓ Material, espesor, diámetro;
- ✓ proceso de soldadura utilizado;
- ✓ norma que aplica;
- ✓ identificación de la indicación;

- ✓ aplicación del criterio de aceptación rechazo;
- ✓ aprobación ó rechazo de la junta soldada.

Estas radiografías fueron digitalizadas a partir de una original. Las muestras originales se la obtuvo realizando inspección a juntas soldadas para facilidades petroleras de la empresa PETROAMAZONAS EP, en la amazonia ecuatoriana, y no pueden ser presentadas como anexos ya que pertenecen estrictamente a PETROAMAZONAS EP.

Dentro del proceso para la obtención de estas muestras radiografías se han aplicado los principios que rigen el ensayo de gammagrafía, la selección de la norma de referencia y la aplicación de los criterios de aceptación/rechazo; todos estos temas fueron desarrollados a lo largo del capítulo.

Por motivos de confidencialidad requeridos por PETROAMAZONAS EP Y RADIN, no se describirá aspectos considerados confidenciales para la empresa, aspectos como:

- ✓ Identificación de la junta;
- ✓ lugar donde se encuentra la junta;
- ✓ nombre del proyecto al que pertenece la junta;

3.5.4 Reportes Generados para Constatar la Inspección

Es muy importante un medio físico por el cual se constate la aplicación del ensayo no destructivo. Generalmente se debe llevar un registro diario del trabajo realizado, en el cual consten aspectos como la detección de defectos u otras novedades que se hallaron al realizar la inspección mediante la aplicación del ensayo. Por este motivo la empresa que realiza las actividades de inspección debe tener formatos de reportes para cada técnica por separado. Un ejemplo del formato diario para el ensayo radiográfico se encuentra en el Anexo 5.

3.5.5 Preguntas para Evaluación Teórica sobre RT

En el Anexo 6, se presenta una recopilación de 20 preguntas, las cuales fueron obtenidas de los libros de estudio para rendir las pruebas de ASNT nivel III.

CAPITULO IV

CURSO DE ENSAYO DE ULTRASONIDOS

El objetivo de este curso es presentar un medio de información donde se encuentre los principios que rigen el ensayo radiográfico, las normativas que hacen referencia a los NDT, un resumen de criterios de aceptación/rechazo basado en las normativas antes mencionadas (aplicados a UT) y finalmente resultados de referencia que se obtiene con este ensayo. Cabe recalcar que las normativas mencionadas, son las aplicadas en la construcción de facilidades petroleras en Ecuador.

A continuación se muestra los puntos como se desarrollará el curso:

4.1 Introducción

4.2 Equipo de Ultrasonidos

4.3 Métodos Básicos de Ultrasonidos

4.4 Evaluación e Interpretación de Soldaduras Mediante Ultrasonidos

Cada uno de los puntos antes mencionados contiene dentro de su estructura temas que se consideran importantes para el desarrollo e implementación de éste.

4.1. Introducción

4.1.1 Definición de Ensayo de Ultrasonidos

Sonido con altas frecuencias ó ultrasonidos, es uno de los métodos usados en la inspección mediante ensayos no destructivos. Básicamente, las ondas de ultrasonidos son transmitidas desde un transductor hacia un objeto y las ondas que retornan son analizadas. Si alguna discontinuidad en el material es detectada, el sonido va a rebotar en ésta y será vista en la señal que regresa.

Los ultrasonidos pueden ser usados para detectar espesores de materiales y determinar la localización de discontinuidades en partes ó estructuras.

4.1.2 Principios Básicos de la Acústica

4.1.2.1 Naturaleza de las Ondas de Sonido

Las ondas sonoras son vibraciones de partículas que componen sólidos, líquidos ó gases. Estas ondas, son un ejemplo de energía mecánica, existen siempre y cuando se mantenga vibrando al objeto.

El único sentido humano capaz de detectar las ondas sonoras es el oído y está restringido a un rango relativamente bajo de frecuencias de vibración llamadas “rango audible”. Esto quiere decir que existen frecuencias muy altas ó muy bajas que no pueden ser detectadas por el oído humano.

La unidad de frecuencia es el Hertzio (Hz), definido como “un ciclo de vibración por segundo”. Sonidos por debajo de los 16 Hz están debajo del límite del oído humano y son llamados “vibraciones subsónicas”, sonidos por encima de los 20.000 Hz están sobre el límite audible del oído humano y son conocidos como “vibraciones ultrasónicas”. Cuando se trabaja en el rango audible, es común usar el término “tono” para referirnos a la frecuencia, un sonido con tono alto significa una frecuencia audible alta, mientras que un sonido con tono bajo significa una frecuencia audible baja.

Existen dispositivos llamados “transductores”, los cuales cambian las ondas sonoras en energía eléctrica que puede ser indicada como señales visuales en un display de cristal líquido (LCD). Esto nos permite detectar los sonidos que se encuentran fuera y dentro del rango audible. Por definición, un transductor es un dispositivo que puede cambiar una forma de energía en otra y viceversa. Materiales que presentan un efecto piezoeléctrico son comúnmente utilizados para generar y detectar ondas sonoras.

4.1.2.2 Generación de Ondas Sonoras

1.- Vibración y movimiento periódico.- Una vibración es un ejemplo de movimiento periódico, término que refiere a un cuerpo ó partícula, la cual va a tener un cambio representativo de posición con el tiempo. Para estudiar los requerimientos esenciales de una vibración consideraremos la Fig. 109. La pesa (W), está suspendida desde una viga con un resorte. En reposo, dos fuerzas iguales y opuestas están actuando en la pesa, la gravedad (G) actúa hacia abajo y está opuesta a la tensión (T) del resorte. La pesa se encuentra en estado de equilibrio.

Si la pesa es levantada, aflojando el resorte y luego se la suelta, la gravedad intentará restaurar la pesa a su posición original. Si la pesa es jalada hacia abajo, la tensión del resorte incrementará; y cuando la pesa sea soltada, esta tensión extra tratará de restaurar la pesa a su posición original. Esta combinación provee todo lo esencial para mantener una vibración.

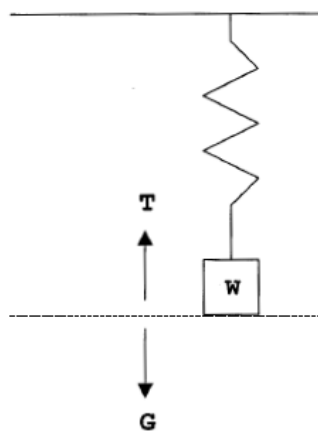


Figura 108. Pesa en un resorte, posición de reposo

Fuente: (Hellier, 2003)

Imaginemos que la pesa es jalada hacia abajo desde su posición de reposo A, hacia una posición B, y luego se la suelta (Fig. 110). El estiramiento extra en el resorte va a ejercer una fuerza en W que acelerará la pesa a su posición A. Mientras la pesa regresa, el estiramiento del resorte se reducirá hasta la posición A, la fuerza G y T serán iguales otra vez. Como la pesa fue acelerada en todo este tiempo, ahora ha alcanzado su velocidad

máxima. Toda masa en movimiento posee inercia, y esta inercia llevará la pesa más arriba de su posición de equilibrio A. Pero, apenas pase la posición A, el resorte se aflojará y así T será menor que G, en otras palabras la gravedad empezará a jalar lentamente la pesa hacia abajo. Eventualmente, la pesa va hacia una nueva posición de reposo C. Ahora la gravedad acelerará la pesa otra vez a su posición A, aquí la inercia se asegura que la pesa vuelva a realizar toda la cadena de eventos mencionados.

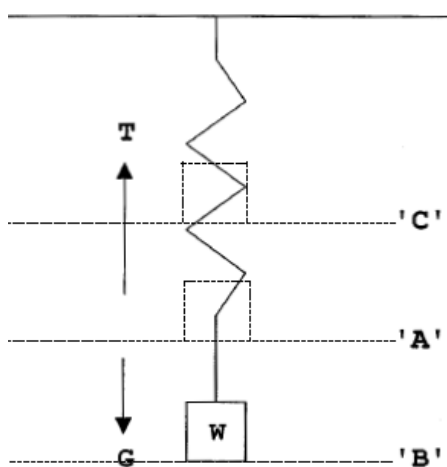


Figura 109. Pesa en resorte, extendido desde su posición de reposo

Fuente: (Hellier, 2003)

En la siguiente figura se muestra el trazo típico de todo el movimiento periódico descrito anteriormente.

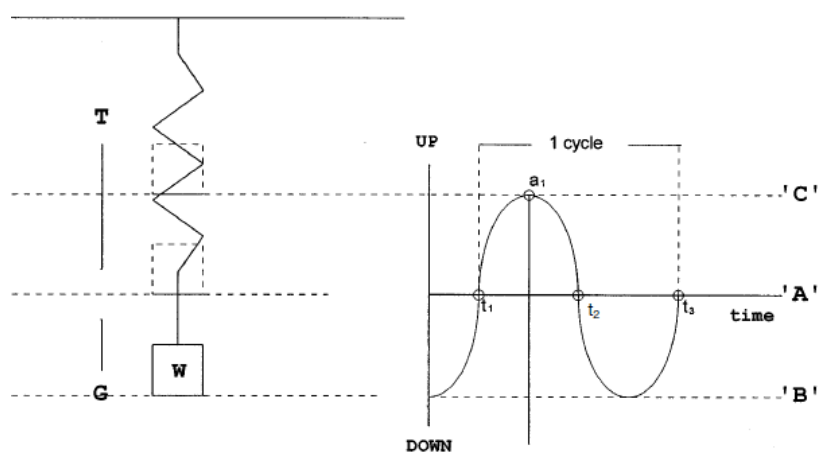


Figura 110. Trazo del movimiento periódico

Fuente: (Hellier, 2003)

Entre t_1 y t_3 la pesa ha viajado a su límite superior, bajado hacia su límite inferior y otra vez ha comenzado el ciclo. El trazo entre t_1 y t_3 es un “ciclo” del movimiento de la pesa, en un periodo dado. Se ha definido a la frecuencia de vibración como el número de ciclos completados en un segundo. El máximo desplazamiento de la pesa es a_1 , se lo conoce como amplitud de la vibración.

2.- Vibraciones sonoras.- Para las ondas sonoras en sólidos, líquidos y gases, los cuerpos vibrantes son las partículas que conforman la sustancia, y las fuerzas de retorno son los lazos elásticos que mantienen la sustancia junta.

Podemos imaginar que las partículas están unidas por resortes. Si una partícula se mueve hacia otra cercana, el resorte de ésta queda aplastado y tiende a empujar al invasor de regreso a su posición. Similarmente, si la partícula se mueve lejos de otra cercana, el resorte queda estirado y la partícula será jalada hacia su lugar original por el resorte.

El sonido audible es un ejemplo de un modo de vibración llamado “onda de compresión”. Esta onda viaja desde la fuente por una sucesión de maniobras, desde una partícula hacia otra. Cada partícula vibra a la frecuencia del sonido, oscilando de un lado a otro una distancia que es la amplitud ó volumen del sonido. Mientras cada partícula oscila de un lado a otro, ésta aplasta el “resorte” hacia otra partícula cercana y esta comienza a oscilar. La oscilación pasa de una partícula a la siguiente, y así sucesivamente, este proceso se lo conoce como propagación de la onda a través del material, nótese que las partículas no emigran a otro lugar, éstas solo oscilan alrededor de la misma posición.

3.- Modos de propagación.- El modo de propagación de una onda de sonido (onda de compresión) que se describió anteriormente, solo puede existir en sólidos, líquidos ó gases. Otros modos de vibración pueden existir, pero solo en sólidos.

Los modos de propagación del sonido generalmente son descritos en términos de la dirección del movimiento de la partícula con relación a la dirección en la cual la onda sonora viaja.

Las “ondas de compresión” (ondas longitudinales) pueden ser definidas *como*:

Ondas en las cuales el movimiento de la partícula se encuentra en el mismo sentido que la dirección de propagación (Fig. 112).

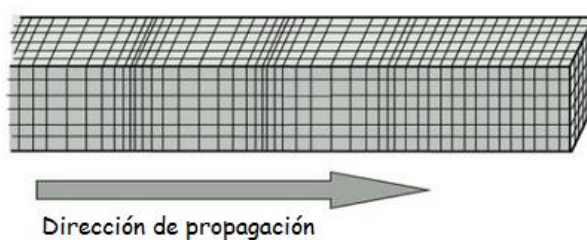


Figura 111. Onda longitudinal

Fuente: (wikipedia, 2014)

Los tres estados de la materia mencionados tienen fuerzas que unen las partículas entre sí, para resistir el aplastamiento ó la separación (compresión ó tensión). En sólidos, está fuerza es provista por el módulo de elasticidad (módulo de Young).

Los sólidos a diferencia de los líquidos y gases, también tienen una propiedad llamada rigidez. La rigidez es la resistencia que posee el material para resistir cargas cortantes, está regida por el “módulo de rigidez” y este es el que permite al sonido propagarse en diferentes formas bajo ciertas circunstancias. Este nuevo modo de propagación es conocido como “onda cortante” (onda transversal) y es definido como:

Ondas en las que el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación (Fig. 113).

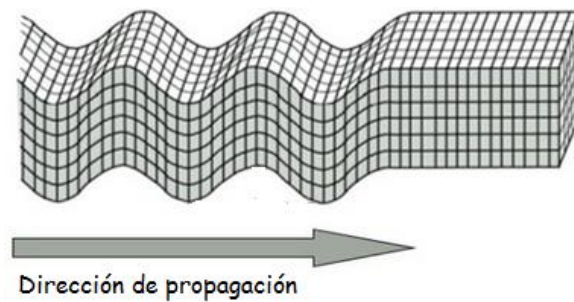


Figura 112. Onda transversal

Fuente: (wikipedia, 2014)

Si la onda transversal está dispuesta de modo que solo se desliza a través de la superficie del sólido, esta cambia a un modo en el cual sigue el contorno con un movimiento de partículas peculiar. Esta onda de seguimiento del contorno es llamada “onda superficial” y es definida como:

Onda en la que el movimiento de la partícula es elíptico, con el eje mayor de la elipse perpendicular a la dirección de propagación (Fig. 114).

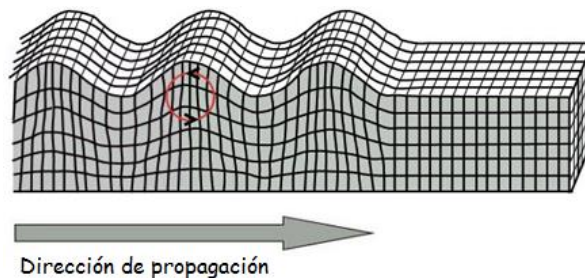


Figura 113. Onda superficial

Fuente: (wikipedia, 2014)

Finalmente, existe un tipo especial de onda longitudinal, esta onda se desliza a través de la superficie como una onda superficial y es llamada “onda lateral”. Es utilizada en las técnicas de TOFD.

Por lo tanto, los cuatro principales modos de propagación son: ondas de compresión (ondas longitudinales), ondas transversales, ondas superficiales (ondas Rayleigh) y ondas laterales.

4.1.2.3 Propiedades de las Ondas de Sonido

1.- Velocidad.- El sonido viaja a diferentes velocidades a través de materiales diferentes. Esto es notorio, por ejemplo, cuando un trabajador golpea un riel del tren y es observado desde una distancia, como la velocidad de la luz es mayor a la del sonido, el observador primero mirará como el trabajador golpea el riel, luego escuchará el sonido que es transmitido en el meta y finalmente escuchará el eco que se genera en el aire. Esto nos muestra que la velocidad del sonido en las rieles es más rápido que la velocidad del sonido en el aire. Es verdad que el sonido viaja más rápido en líquidos que en gases y más rápido en metales que en líquidos. Por lo tanto, es verdad que el sonido viaja a diferentes velocidades en diferentes metales, hay una diferente velocidad del sonido para cada material.

En ultrasonidos, esto es conocido como *velocidad del sonido para el material*.

Los principales factores que afectan esta velocidad son la elasticidad y la densidad del material. Existen tablas donde se encuentra velocidades del sonido para materiales dados, las velocidades dadas en estas tablas son para ondas longitudinales V_L y ondas transversales V_T (Tabla. 20)

Tabla 20. Velocidades del sonido para materiales típicos

Fuente: (The American Society for Nondestructive, 2011)

Material	Velocity (km·s ⁻¹)	
	V _L	V _T
Metals		
Aluminum uranium alloy	6.35	3.10
Aluminum, galvanized	6.25	3.10
Beryllium	12.80	8.71
Brass (naval)	4.43	2.12
Bronze, phosphor (5 percent)	3.53	2.23
Copper	4.66	2.26
Lead, pure	2.16	0.70
Lead, antimony (6 percent)	2.16	0.81
Magnesium	5.79	3.10
Mercury	1.42	—
Molybdenum	6.29	3.35
Nickel	5.63	2.96
Nickel chromium alloy (wrought)	7.82	3.02
Molybdenum alloy (wrought)	6.02	2.72
Silver nickel (18 percent)	4.62	2.32
Steel	5.85	3.23
Stainless steel, austenitic	5.66	3.12
Stainless steel, martensitic	7.39	2.99
Titanium	6.10	3.12
Tungsten	5.18	2.87
Nonmetals		
Acrylic resin	2.67	1.12
Air	0.33	—
Fused quartz	5.93	3.75
Ice	3.98	1.99
Oil (transformer)	1.38	—
Plate glass	5.77	3.43

Las ondas superficiales también tienen su velocidad particular, generalmente es tomada como aproximadamente el 90% de la velocidad de la onda transversal.

2.- Longitud de onda.- Mientras las partículas están completando cada ciclo de su vibración, la onda sonora está moviéndose en la dirección de propagación, la onda sonora va a moverse cierta distancia dependiendo de la velocidad característica del material.

Esta distancia, para un material dado y una frecuencia de sonido conocida es llamada longitud de onda. La longitud de onda puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$(17) \quad \lambda = \frac{V}{f}$$

Donde, “ λ ” = longitud de onda [m], “ V ” = velocidad del sonido [m/s] y “ f ” = frecuencia del sonido [Hz].

3.- Reflexión del sonido.- La región que se encuentra entre un medio y otro es llamada “interface”. En la interface, una porción del sonido será transmitida al siguiente medio y la porción sobrante será reflejada al primer medio. Por ejemplo, si tenemos una interface entre una placa de metal y aire, casi toda la energía será reflejada, mientras que si sumergimos la placa en agua, 88% de la energía será reflejada y 12% será transmitida. Las porciones reflejadas y transmitidas, dependerán de las propiedades del material en cada lado de la interface.

Se ha asignado a cada material un factor que es usado para calcular la reflectividad en una interface. Este factor es llamado “impedancia acústica” y se le ha asignado el símbolo “**Z**”. La impedancia acústica es el producto de la densidad y la velocidad del material. Matemáticamente se la puede calcular así:

$$(18) \quad Z = \rho \times V$$

Donde, “**Z**” = impedancia acústica, “ **ρ** ” = densidad del material, “**V**”= velocidad del material.

Para calcular el porcentaje de energía reflejada en un interface entre dos materiales, se utiliza la siguiente fórmula:

$$(19) \quad R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \times 100\%$$

Donde, “**R**” = energía reflejada, “**Z₁ & Z₂**”= impedancia acústica del material en cada lado de la interface.

4.- Refracción del sonido.- Hasta el momento solo hemos tratado el sonido que entra perpendicular a la superficie, cuando el sonido es introducido con un ángulo respecto de la superficie, este ángulo es llamado “*ángulo de incidencia*”.

La Figura 115a muestra un haz de sonido viajando a través de una interface con un ángulo de incidencia “**i^o**” a la perpendicular usualmente

llamada normal. La velocidad del sonido en el Medio 1 es V_1 y en el Medio 2 al otro lado de la interface la velocidad es V_2 .

Asumiendo como ejemplo que V_1 es más lenta que V_2 , como sería el caso en el que el Medio 1 sea agua y el Medio 2 acero. Mientras el haz de sonido se desplaza a través del Medio 1, la velocidad será la misma hasta que la esquina izquierda del haz llegue a la interfaz, el momento en que esta esquina alcance el Medio 2, su velocidad aumentará. Pero el sonido que aún se encuentra en el Medio 1 se mantiene a la velocidad antigua. Gradualmente, mientras el resto del haz atraviese la interfaz alcanzando el Medio 2, su velocidad también incrementará.

Durante esta transición, el haz de sonido gira alrededor de un nuevo ángulo en el Medio 2, llamado “*ángulo de refracción*”. La razón de esta refracción es la diferencia de velocidades en cada lado de la interfaz.

La ley de Snell nos permite calcular este nuevo ángulo, siempre y cuando las dos velocidades y el ángulo de incidencia sean conocidos. La ecuación de la ley de Snell es la siguiente:

$$(20) \quad \frac{\text{sen } i^\circ}{V_1} = \frac{\text{sen } R^\circ}{V_2}$$

Donde, “*sen i*°”= seno del ángulo de incidencia, “*sen R*°”= seno del ángulo de refracción, “ V_1 ”= velocidad en el Medio 1, “ V_2 ”= velocidad en el Medio 2.

La refracción hace referencia a la porción de energía de sonido transmitida hacia la interface; la porción de energía reflejada deja la interface con un *ángulo de reflexión* que es igual al ángulo de incidencia, $i^\circ = r^\circ$ (Fig. 115b).

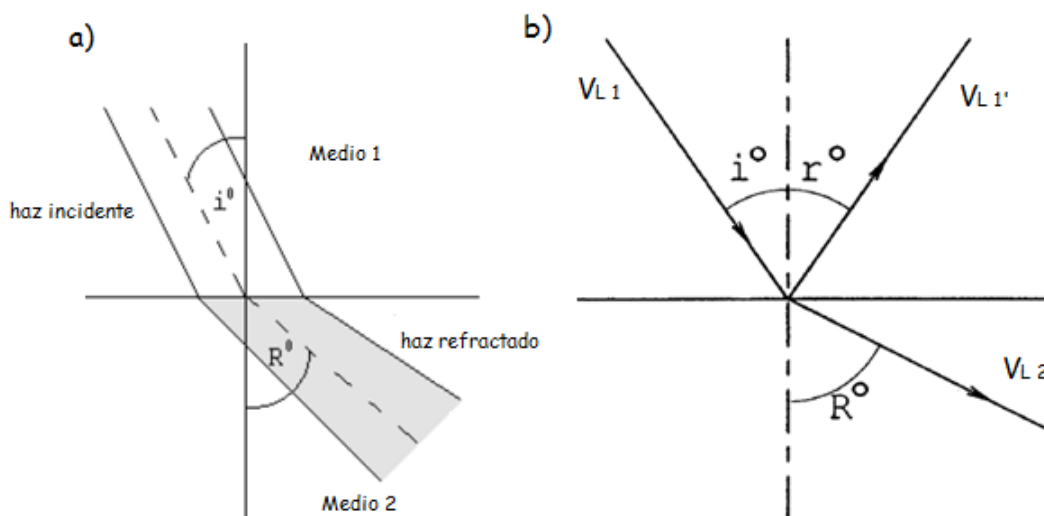


Figura 114. (a) haz de sonido con ángulo de incidencia, (b) ángulo de reflexión $i^\circ = r^\circ$

Fuente: (Hellier, 2003)

4.1.2.4 Conversión de Modo

Mientras el haz de sonido se introduce con un ángulo de incidencia en un sólido, se genera un fenómeno llamado conversión de modo. A pesar de que el haz incidente son ondas longitudinales, ondas transversales refractadas comienzan a aparecer en el sólido mientras el sonido cruza la interface, adicionales a las ondas longitudinales refractadas (Fig. 116). Para pequeños ángulos de incidencia, la amplitud de la onda transversal refractada puede ser ignorada, pero cuando el ángulo de incidencia incrementa, la amplitud de esta onda también lo hace.

Estas ondas refractadas no tendrán un mismo ángulo R° , porque la velocidad de $V_T < V_L$, se puede comprobar esto mediante la aplicación de la ley de Snell.

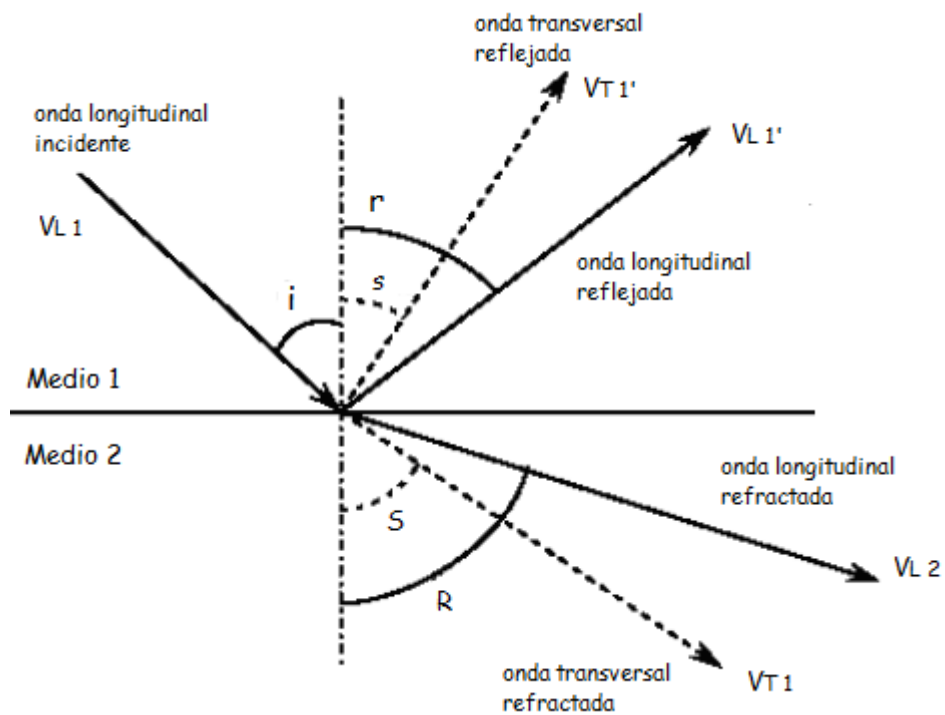


Figura 115. Ondas refractadas: transversal y longitudinal

Con este fenómeno, el problema que se presenta en la detección de discontinuidades es notorio, dos haces viajando a diferentes velocidades y en diferentes direcciones. Para evitar esto el ángulo de incidencia se lo incrementó hasta que la onda longitudinal refractada esté a 90° respecto a la normal. Cualquier incremento en el ángulo de incidencia solo dejará ondas transversales refractadas en el Medio 2.

El ángulo de incidencia que da como resultado un ángulo de refracción de 90° para la onda longitudinal es llamado "*primer ángulo crítico*". El primer ángulo crítico para interface de agua a acero es alrededor de 15° , y para plexiglás a acero el ángulo es alrededor de 28° .

Si el ángulo incidente es incrementando mucho más que el primer ángulo crítico, eventualmente la onda transversal será refractada a 90° . Cuando esto sucede, este ángulo es llamado "*segundo ángulo crítico*", a partir de este ángulo la onda transversal sufre otra conversión de modo y se transforma en una onda superficial. Si el ángulo de incidencia se lo incrementa mucho más que el segundo ángulo crítico, el haz sonido no penetrará en el Medio 2.

4.1.2.5 Acoplante

La propiedad de reflexión puede ser a menudo un problema porque si el transductor es simplemente colocado sobre el material va a existir un vacío de aire entre el transductor y la pieza. Si tenemos una interface entre un sólido y aire, esto crea 100% de reflexión, por lo tanto el sonido nunca se transmitirá en el sólido. Para superar este problema, debe existir algún modo para excluir el aire usando un medio el cual una la impedancia acústica del transductor con la del metal. La sustancia que nos permite realizar esto se llama “acoplante”.

La mayoría de acoplantes permiten una transmisión del sonido que va desde el 10% al 15%, el mejor de estos es la glicerina que permite alrededor del 15%. Los acoplantes comúnmente utilizados son: agua, queroseno, aceite, grasa, glicerina y geles especiales.

4.1.2.6 Características del Haz de Sonido

Algunas de las ilustraciones vistas anteriormente hablan de sonido como si este fuera una sola onda, pero el sonido se traslada a través de un haz de ondas. Dentro de este haz, la intensidad ó la amplitud de la energía del sonido varía. Por conveniencia, se ha dividido al haz en dos diferentes zonas llamadas “near field” y “far field”. En estos dos campos, la intensidad del sonido varía. La palabra usada para describir a pérdida gradual de energía del sonido es “atenuación”. La Atenuación es el efecto combinado de un número de parámetros:

1. efectos de interferencia y difracción;
2. absorción;
3. dispersión;
4. propagación del haz.

1.- Efectos de la interferencia y difracción.- Se ha desarrollo una manera conveniente para observar la propagación de la energía mediante ondas desde una fuente generadora. Huygens, nos dice que una fuente es más bien como dejar caer una roca en un balde con agua, la perturbación

generada se mueve hacia afuera, expandiéndose en forma de círculos en el agua. En la Figura 117a, se muestra una fuente puntual rodeada por círculos concéntricos, estos círculos representan las sucesivas ondas de presión del sonido detenidas en un instante, una vez que el sonido ha comenzado. Los espacios entre cada círculo representan la rarefacción de la onda, proceso en el cual el cuerpo ó sustancia se hace menos denso, se contrapone al fenómeno de compresión. La distancia existente entre estos círculos también representa la longitud de onda del sonido en el material.

Los transductores ultrasónicos no son una fuente puntual, tienen un diámetro y un área superficial, esto es llamado una “fuente finita” y Huygens dice que esto se puede considerar como una combinación infinita de fuentes puntuales. En figura 117b se muestra una fuente finita con algunas de sus fuentes puntuales detenidas en un instante, una vez que la vibración ha comenzado. Se puede observar que la parte frontal de las fuentes puntuales se combina y formar una onda unificada, un “haz” que se propaga desde la fuente. Pero nótese como se pierde un poco del sonido alrededor de los extremos, este fenómeno se conoce como “difracción” en los extremos; esto es una de las formas de pérdida de energía en el near field.

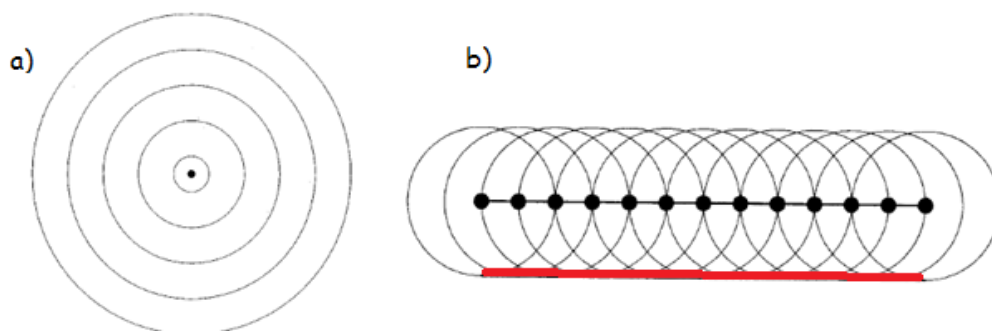


Figura 116. (a) Fuente puntual, (b) Haz generado

Fuente: (Hellier, 2003)

La siguiente fuente de pérdida necesita un poco más de explicación. La figura 118 muestra una fuente finita, pero esta vez solo se muestra la fuente puntual en el centro y en los extremos del transductor. Frente a la fuente está un punto “P”, el cual está esperando que el sonido llegue hacia

él. En el gráfico, la onda de presión que viene desde la mitad ya llegó a “P”, pero las ondas de los extremos tardarán un poco más en llegar. El punto “P” será empujado en la dirección de propagación por la onda del medio. La figura 119 muestra la situación un tiempo después, cuando las ondas de presión desde los extremos también llegan a “P”. El resultado de esto es que “P” otra vez será empujado en la dirección de propagación, esto sin tomar la rarefacción de las ondas provenientes del medio.

En el gráfico, cuando las ondas de los extremos llegan al punto, éste es empujado por la tercera onda de presión proveniente del medio, dando así un mayor empujón al punto. Estos tres empujones simultáneos son llamados “*interferencia constructiva*” porque el efecto final es un incremento local en la intensidad del sonido. Esto sucede porque la longitud de onda será la misma para los tres puntos, considerando que tienen una misma frecuencia.

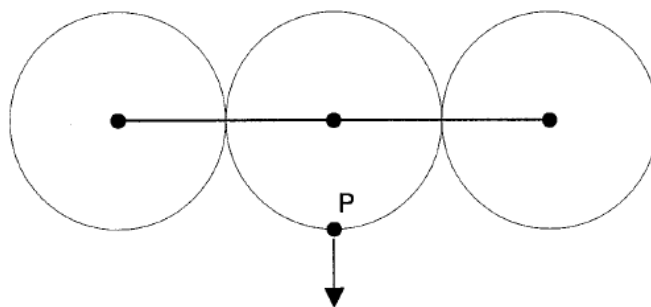


Figura 117. Fuente puntual 2

Fuente: (Hellier, 2003)

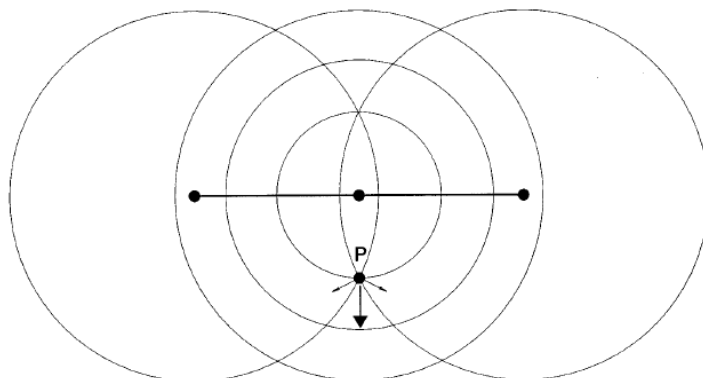


Figura 118. Fuente puntual 3

Fuente: (Hellier, 2003)

Un cambio de frecuencia ó de posición de “P” puede generar un desfase entre las ondas que llegan a “P” como se muestra en la Figura 120. En este gráfico, las primeras ondas de presión desde los extremos han llegado al punto “P” pero desde la fuente del medio ha llegado rarefacción. Ahora el punto está siendo empujado hacia delante y jalado hacia atrás. Esto es conocido como “*interferencia destructiva*” la cual conduce a la reducción de la energía del sonido, incluso podría conllevar a la reducción total del sonido en el punto “P”. La razón de esta “interferencia destructiva” es la diferencia de longitud en el camino desde “P” hasta centro y los extremos.

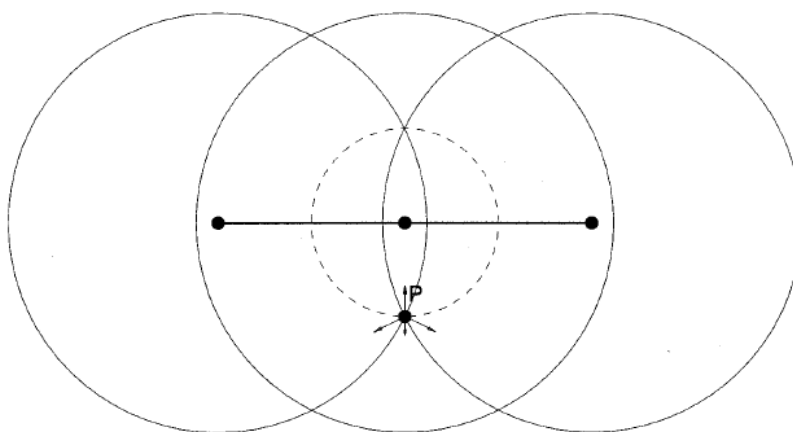


Figura 119. Fuente puntual 4

Fuente: (Hellier, 2003)

Eventualmente, existe una distancia desde “P” hacia el centro y los extremos (Fig. 121), dónde la diferencia de longitud del camino se volverá significativamente menor que una longitud de onda y el efecto de interferencia decrece.

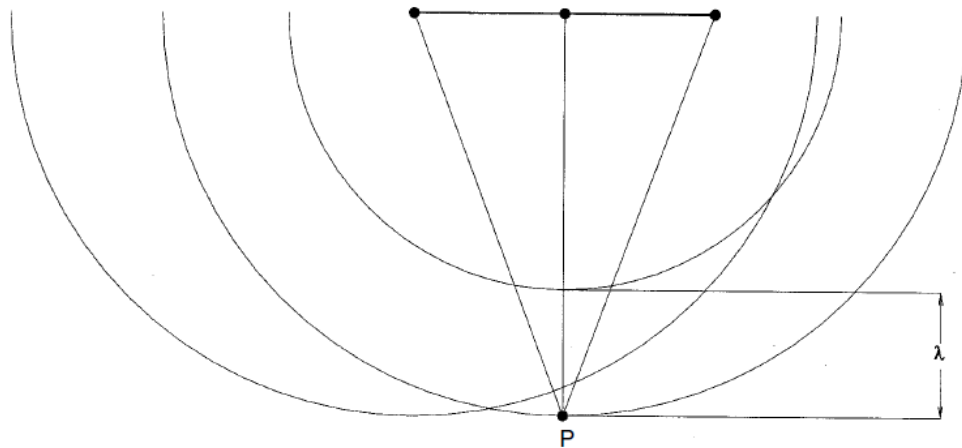


Figura 120. Fuente puntual 5

Fuente: (Hellier, 2003)

Esta distancia es el final del near field y se la calcula con la ecuación:

$$(20) \quad NF = \frac{D^2}{4 \times \lambda} \quad \text{ó} \quad NF = \frac{D^2 \times f}{4V}$$

Donde, “**D**”= diámetro del transductor, “**λ**”= longitud de onda, “**f**”= frecuencia, “**V**”= velocidad.

2.- Absorción.- El sonido se propaga a través de la vibración de las partículas de un sólido, líquido ó gas, el movimiento de estas partículas causa fricción y absorbe un poco de energía. La tasa de energía que es absorbida depende del material en el cual el sonido se propaga y de la frecuencia del sonido. En general a una mayor frecuencia, una mayor absorción, viéndolo de otro modo una menor frecuencia el sonido penetrará más lejos en el material.

3.- Dispersión.- Las ondas del sonido serán reflejadas desde las interfaces del material que está siendo analizado, y los límites de grano en sólidos son interfaces que pueden estar orientadas aleatoriamente al haz. Esto causa que el sonido se refleje en varias direcciones ó se “disperse”. Materiales de grano fino causan menor dispersión.

La energía dispersada que no llega al transductor es energía perdida. La absorción y la dispersión son factores de pérdida de energía que se encuentra en el near field y en el far field.

4.- Propagación del haz (ángulo de divergencia).- El near field es considerado como una forma cilíndrica, del mismo diámetro del transductor. A continuación del near field se encuentra el "*far field*", aquí el haz se propaga en una forma de cono. El ángulo del cono (Fig. 122), puede ser calculado con la ecuación:

$$(21) \sin \frac{\theta}{2} = \frac{1.22\lambda}{D}$$

Dónde, $\sin \frac{\theta}{2}$ = mitad del ángulo de propagación, D= diámetro del transductor, λ = longitud de onda.

La ecuación (21) incluye la constante 1.22, esto nos ayuda a calcular el ángulo de propagación del haz extendido hasta el límite absoluto del haz donde el sonido deja de existir. En la práctica se suele usar el valor de 0.56 como constante, este valor predice el ángulo del haz cuando el sonido ha alcanzado la mitad de su intensidad. Estas constantes son comúnmente utilizadas para cálculos de formas de haz teóricas.

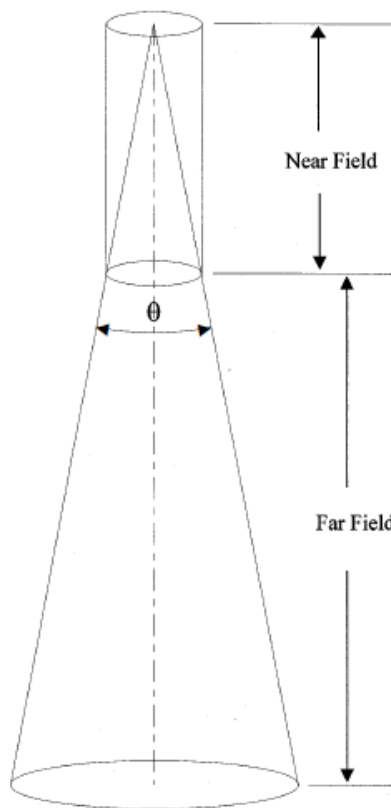


Figura 121. Near field y far field

Fuente: (Hellier, 2003)

En la figura 123, se muestra la manera en la cual la amplitud cambia a través de la propagación de la onda.

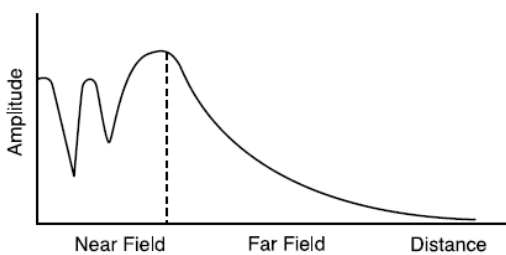


Figura 122. Amplitud de la onda vs propagación

Fuente: (Hellier, 2003)

4.1.2.7 Sistema de Decibeles

Se puede decir que el voltaje producido en el transductor es relativo a la intensidad del sonido. La unidad para medir esta intensidad del sonido es

el “decibel”. En la siguiente gráfica podemos observar la propagación del sonido y los decibeles:

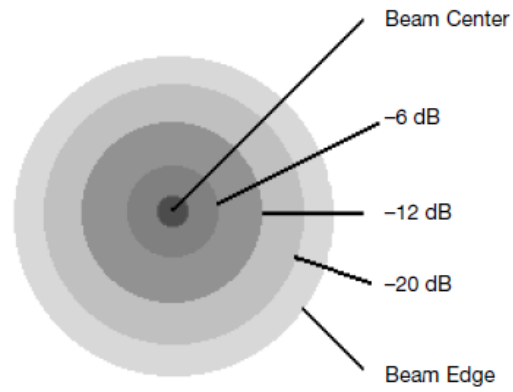


Figura 123. Propagación del sonido

Fuente: (Hellier, 2003)

4.2 Equipo de Ultrasonidos

4.2.1 Instrumentación Pulso-Eco

4.2.1.1 Componentes básicos

El sistema Pulso-Eco contiene cuatro componentes básicos:

1. transductor;
2. pulsador;
3. receptor/amplificador;
4. display (pantalla).

Para entender como el sistema de ultrasonidos pulso-eco funciona, es necesario mirar un ciclo de eventos ó un pulso. La secuencia es la siguiente:

1. el reloj señala al pulsador para que genere un pulso corto de alto voltaje hacia el transductor, simultáneamente se suministra voltaje al módulo de activación tiempo-base;
2. el módulo de activación tiempo-base comienza un “punto” en la pantalla;
3. el pulso de voltaje llega al transductor y se convierte en vibraciones mecánicas que entran en la pieza. Estas vibraciones (energía) ahora viajan en un “camino sonoro” a través de la pieza, todo este tiempo el punto se mueve horizontalmente en la pantalla;
4. la energía en la pieza se refleja en la interfaz posterior de la pieza y regresa hacia el transductor, donde se convierte en voltaje (el voltaje reflejado es una fracción del voltaje original);
5. este voltaje es recibido y amplificado por el receptor/amplificador;
6. el voltaje amplificado es enviado al eje vertical Y (positivo) del display, aquí el punto va hacia arriba. Este movimiento es conocido como “señal”, significa el tiempo que la energía ha tomado para hacer el viaje de ida y vuelta a través de la pieza desde el momento en que salió del transductor hasta el momento en el que ingresa nuevamente;

7. Cuando la energía reflejada ingresa al transductor, un porcentaje de ésta se refleja en la interfaz superior de la pieza y ahora hace un segundo viaje a través de la pieza (el punto continúa su viaje horizontal en la pantalla). La energía se refleja una vez más en la interfaz posterior, una vez más regresa para ser receptada y amplificada. El amplificador nuevamente manda el voltaje hacia el eje Y, el punto otra vez va hacia arriba pero esta vez en una posición después. Esto es una “señal repetida” que es menor en amplitud debido a factores como la atenuación y otras pérdidas. El punto es liberado para continuar su recorrido en la pantalla. Esta secuencia se repetirá hasta que la energía en la pieza sea atenuada. La pantalla mostrará señales repetidas múltiples de acuerdo a la cantidad de amplificación calibrada (ganancia);
8. El reloj inicia por segunda vez al pulsador, iniciando un nuevo pulso. Esto se repite n número de veces por segundo, y es conocido como *tasa de repetición del pulso*.

En la siguiente figura se puede apreciar todo el proceso descrito arriba:

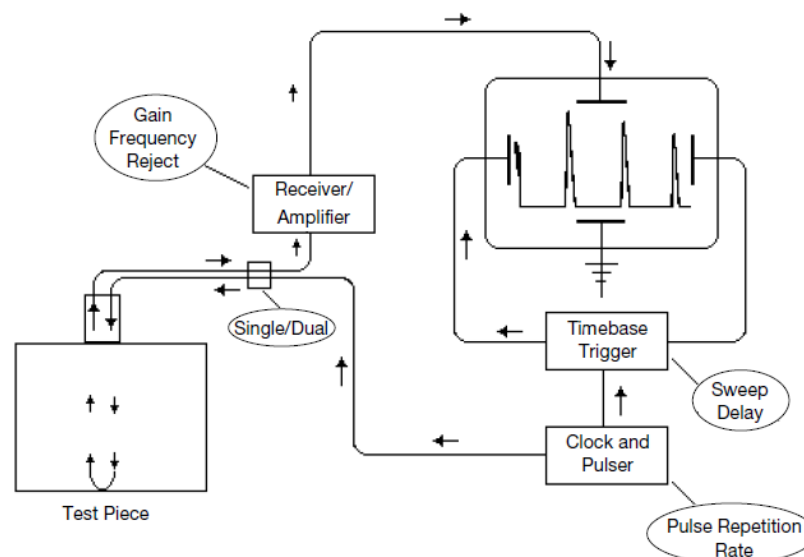


Figura 124. Instrumentación básica pulso-eco
Fuente: (Hellier, 2003)

4.2.1.2 Presentaciones en la pantalla

1.- A-SCAN.- Es una forma de presentación de una onda que muestra el tiempo y la amplitud de una señal ultrasónica. El A-scan representa las reflexiones existentes en una posición del haz ultrasónico dentro del material analizado.

La figura 126, muestra el eco de dos agujeros en un bloque de acero. El haz de sonido vertical producido por un transductor de un solo elemento, interceptó dos de los tres agujeros y generó dos reflexiones distintas a diferentes tiempos. Estos tiempos son proporcionales a la profundidad de los agujeros.

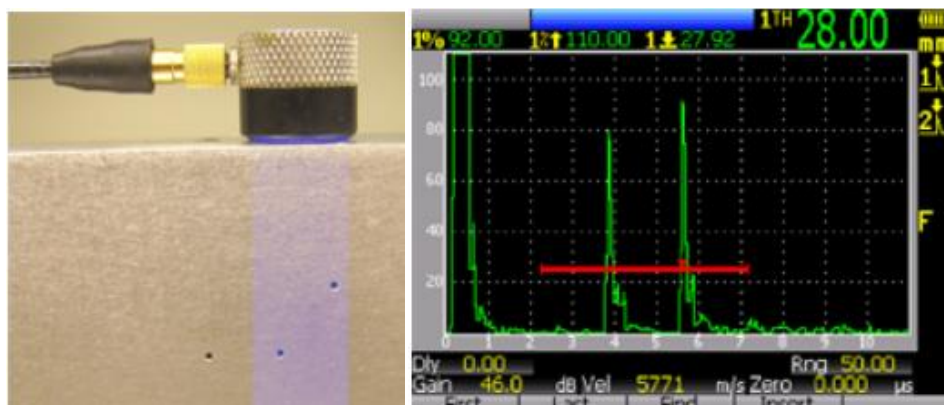


Figura 125. A-scan

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006)

El eje Y de la pantalla representa la amplitud del haz sonoro, el eje X representa el tiempo donde la amplitud es generada.

2.- C-SCAN.- El C-scan es una imagen en dos dimensiones, se muestra en la pantalla como una vista superior ó plana del material que se analiza. Es similar a la vista que se obtiene en una radiografía, el color representa la señal de amplitud en cada punto del material mapeado (en su posición X-Y).

La siguiente imagen muestra un C-scan realizado a un bloque de acero que contiene 6 agujeros.

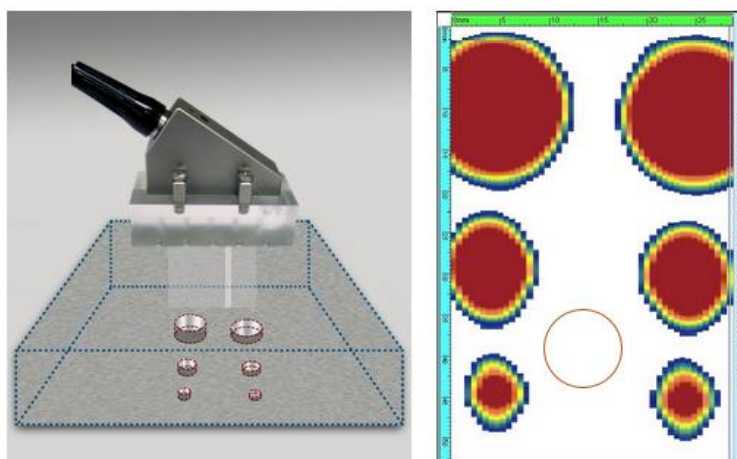


Figura 126. C-scan

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006)

3.- S-SCAN.- La imagen S-scan ó escaneo sectorial, muestra una vista de corte seccional en dos dimensiones. El eje horizontal representa al ancho de la pieza y el eje vertical la profundidad. Este es el formato más común en equipos de ultrasonidos con arreglo de fases.

En el siguiente ejemplo el haz sonoro se mueve en dirección contraria a las manecillas del reloj, de este modo reconoce a los tres agujeros presentes en el bloque de acero que se analiza.

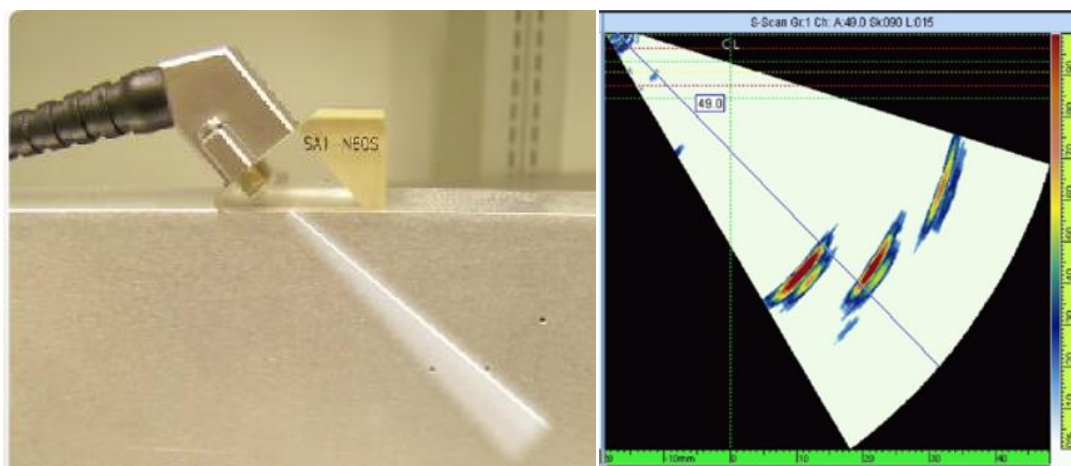


Figura 127. S-scan

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006)

4.2.2 Transductores

Los transductores (Fig. 129) son los elementos encargados de transformar una forma de energía a otra. Un transductor ultrasónico convierte energía eléctrica en energía mecánica, en forma de sonido, y viceversa.

4.2.2.1 Componentes principales de un transductor

Los principales componentes de un transductor son:

1. elemento activo;
2. refuerzo;
3. placa de desgaste.

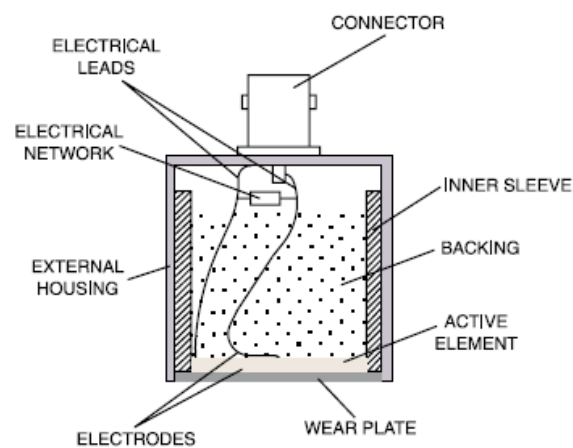


Figura 128. Sección de un transductor de contacto

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006)

1.- Elemento Activo.- Es un elemento de material piezoeléctrico, convierte la energía eléctrica en energía ultrasónica. Los materiales más comunes utilizados son los cerámicos polarizados, los cuales pueden ser cortados en una gran variedad de formas para producir diferentes tipos de ondas.

2.- Refuerzo.- Usualmente es un material altamente atenuador con alta densidad, es usado para controlar la vibración del transductor absorbiendo la energía producida en la parte posterior del elemento activo.

Cuando la impedancia acústica del refuerzo es igual a la impedancia acústica del elemento activo, el resultado será un transductor con buen rango de resolución pero puede tener una baja amplitud de señal. Si las impedancias acústicas son diferentes entre el elemento y el refuerzo, se obtendrá una baja resolución pero una mayor amplitud de señal ó una mejor sensibilidad.

3.- Placa de desgaste.- El principal propósito de esta placa es proteger al elemento activo del ambiente de trabajo. En el caso de los transductores de contacto, la placa de desgaste debe ser fabricada de un material durable y resistente a la corrosión.

4.2.2.2 Sensibilidad y resolución

1.- Sensibilidad.- Es la habilidad de un sistema de ultrasonidos para detectar reflectores (discontinuidades) a una profundidad dada en el material analizado. Mientras mayor sea la señal recibida desde los reflectores, mayor es la sensibilidad del transductor.

2.- Resolución.- Es la habilidad de un sistema de ultrasonidos para producir indicaciones distintas y simultaneas, desde reflectores localizados en posiciones cercanas, casi la misma posición, con respecto al haz ultrasónico.

4.2.2.3 Tipos de transductores

1.- Transductores de un solo elemento.- Solamente poseen un elemento activo que utiliza para producir y detectar la señal del ultrasonido. Generalmente son transductores de contacto directo que generan ondas longitudinales. Contiene al elemento dentro de una carcasa resistente para soportar el deslizamiento con los materiales analizados.

Son diseñados ergonómicamente para que pueda deslizarse fácilmente sobre otros materiales y puedan ser utilizados manualmente. A menudo se puede remplazar su placa de desgaste para alargar su vida útil.

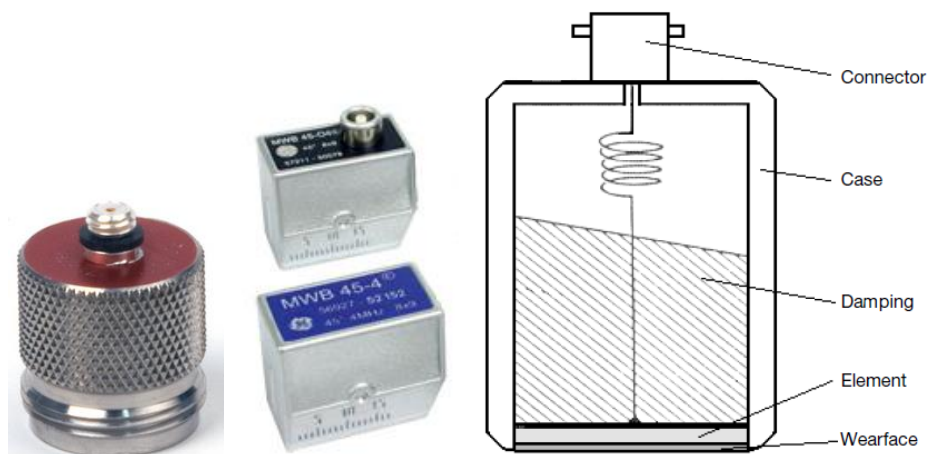


Figura 129. Transductor de elemento simple

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006), (Hellier, 2003)

2.- Transductores duales.- Consiste en dos elementos longitudinales (un transmisor y un receptor), se encuentra dentro de la misma carcasa pero aislado uno del otro por una barrera acústica. Los elementos están ubicados con un ligero ángulo de inclinación que genera una forma de V para facilitar la recepción de la señal. Los transductores de elemento dual ofrecen lecturas más consistentes en materiales fuertemente corroídos y también pueden ser usados en ambientes de alta temperatura.

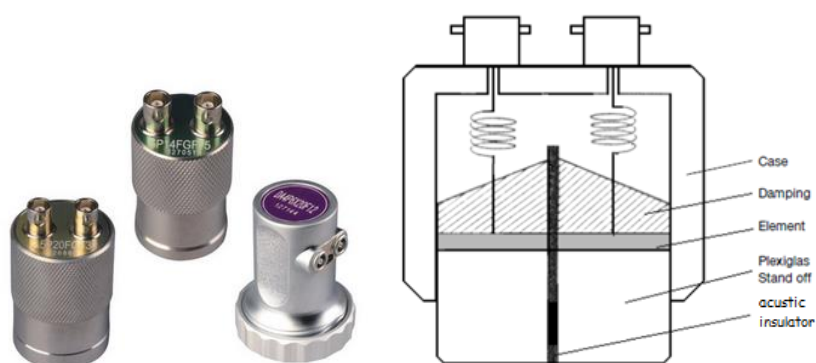


Figura 130. Transductor dual

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006), (Hellier, 2003)

3.- Transductores de haz angular.- Son transductores de un solo elemento, se los acopla a una zapata para introducir ondas longitudinales ó transversales (con un ángulo de incidencia seleccionado) en el material inspeccionado. Estos transductores permiten la inspección de áreas en partes no son accesibles con un haz ultrasónico generado con un transductor de un solo elemento normal.

Se los utiliza generalmente para la inspección de soldaduras, en dónde la superficie de la soldadura bloquea el acceso a la zona de soldadura de interés en caso de querer analizarlo con un transductor de contacto estándar.

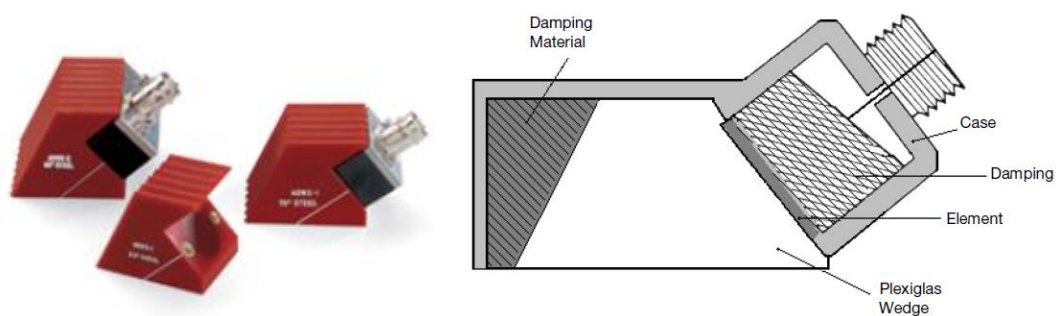


Figura 131. Transductor de haz angular

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006), (Hellier, 2003)

4.- Transductores de inmersión.- Estos transductores no tienen contacto con el componente. Son diseñados para operar en un ambiente líquido y todos sus componentes son impermeables. Usualmente su placa de desgaste tiene impedancia igual a la del agua. Usa agua como acoplante y línea de retado.

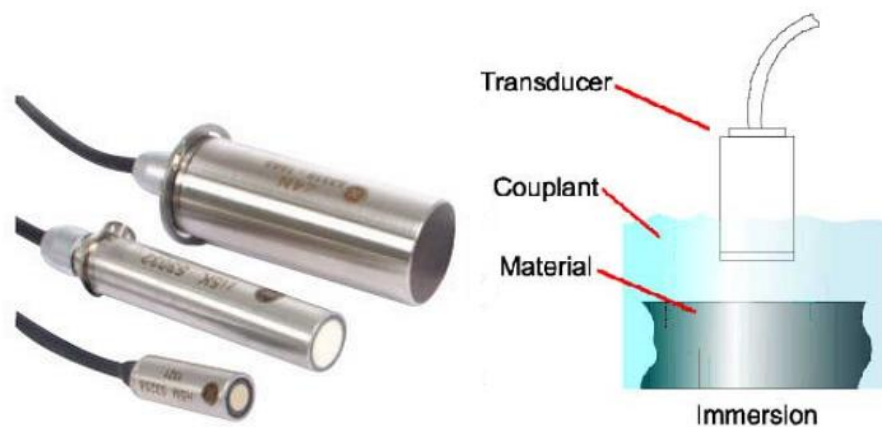


Figura 132. Transductor de inmersión

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006), (Hellier, 2003)

5.- Transductor con arreglo de fases.- Este transductores incorpora elementos que están dispuestos en ciertas maneras con el fin de centrarse dinámicamente ó dirigir la energía. Este transductor envía pulsos secuenciales a los elementos, usa una combinación de elementos en el arreglo y temporiza los pulsos usados para excitar los elementos. Produce un haz enfocado en varias profundidades del material analizado (Fig. 134), combina múltiples ondas para formar un haz de forma particular.

La configuración de los elementos puede ser circular ó rectangular, depende de la forma de haz deseado y de la dirección de la energía de propagación. Los transductores con arreglo lineal son los más utilizados en el campo industrial.



Figura 133. Transductor con arreglo de fases

Fuente: (OLYMPUS NDT, 2006), (Hellier, 2003)

6.- Transductor acústico electromagnético.- Es un método alternativo para recibir y generar energía ultrasónica, son fabricados con bobinas. Se coloca el transductor muy próximo al material que se analiza, las

bobinas producen un campo magnético que interactúa con el metal, produciendo una deformación en la superficie del material. Esta deformación produce la onda de energía ultrasónica.

Entre las ventajas de este método tenemos dos principales: (1) No necesita acoplante ya que no es un transductor de contacto, (2) se los puede utilizar en análisis de componentes que se encuentran a altas temperaturas.

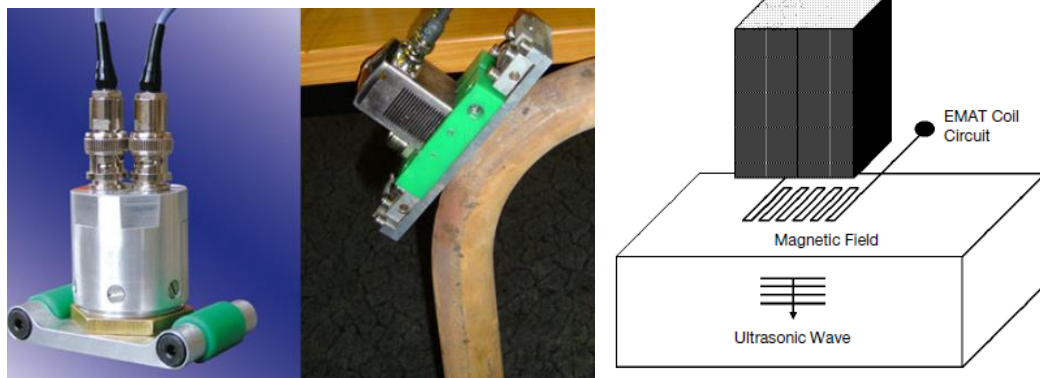


Figura 134. Transductor acústico electromagnético

Fuente: (Hellier, 2003)

Comparados con los transductores piezoeléctricos, éstos tienen baja eficiencia y su tamaño es mucho más grande.

4.2.3 Calibración

La calibración se refiere al acto de evaluar, ajustar la precisión y exactitud del equipo de ultrasonidos. Existen dos formas de calibración que deben ser aplicadas.

La calibración de la parte eléctrica del equipo para asegurar su desempeño como se lo diseñó. Esta operación es realizada por el fabricante del equipo y no se la mencionará en esta sección.

También se debe realizar una “calibración de usuario”. Esta calibración es necesaria porque la mayoría de equipos de ultrasonido pueden ser reconfigurados para una gran variedad de aplicaciones. El usuario debe calibrar el sistema, lo cual incluye la configuración, el

transductor y la prueba de configuración para validar el nivel deseado de presión y exactitud que se desea alcanzar.

Para realizar la calibración de usuario, se utiliza bloques estándar de referencia. Estos bloques contienen rasgos característicos que nos sirven para calibrar nuestro equipo, como por ejemplo: radios de curvatura, orificios, diferencia de espesores, etc.

A continuación se muestran algunos de los estándares más usados para la calibración del equipo de ultrasonidos.

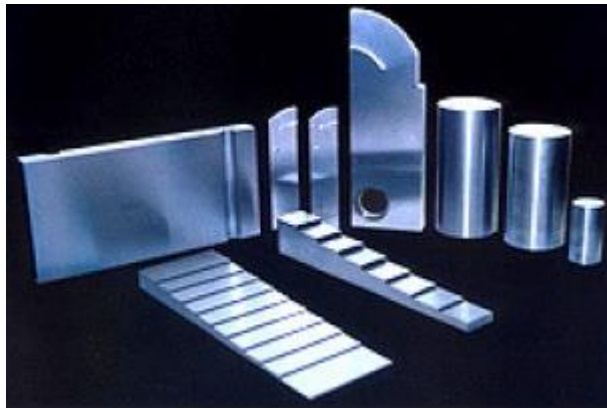


Figura 135. Estándares de calibración UT

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

La principal función de estos bloques es calibrar los instrumentos antes de realizar la inspección, y en general, también se los utiliza para:

1. revisar el rendimiento del transductor (sensibilidad, resolución, dispersión del haz, etc);
2. determinar el ángulo refractado que se produce;
3. calcular la distancia del camino sonoro;
4. evaluar el rendimiento del equipo (linealidad, tiempo de respuesta, etc).

El material de los bloques debe ser el mismo ó similar al material que se va a inspeccionar.

4.2.3.1 Introducción a algunos bloques estándar comunes

Existe una amplia variedad de bloques para calibración, tienen diferentes diseños, tamaños y sistemas de unidades (mm ó pulgadas). El tipo de bloque que se utilizará depende de la aplicación que va a tener el ensayo de ultrasonidos, también depende de la forma de la pieza que se inspeccionará.

Los bloques estándar, comúnmente más utilizados, son los bloques del Instituto Internacional de Soldadura (IIW), y de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS).

A continuación se describirán los bloques de calibración más usados, en la industria.

1.- Bloque de calibración tipo IIW.- Los bloques de referencia tipo IIW usualmente vienen con medidas inglesas. Incluyen referencias de calibración como: muescas, ranuras circulares, desniveles. Existen tres versiones de este bloque, dos grandes y una pequeña (llamada mini), la versión mini de este bloque, es la mitad del tamaño de los bloques grandes y su peso es cuatro veces menor. El bloque IIW tipo US-1 es el primer diseño, el bloque IIW tipo US-2 fue creado por el fuerza aérea de Estados Unidos, finalmente el bloque mini es la última versión de estos bloques.

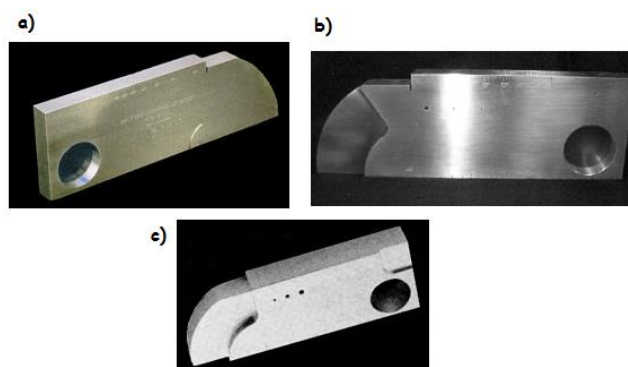


Figura 136. a) IIW tipo US-1 b) IIW tipo US-2 c) IIW tipo Mini

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

Los bloques IIW son usados para calibrar elementos que realizan inspección con incidencia normal y dispersa. Instrucciones del uso de estos bloques se puede encontrar en el anexo de la ASTM estándar E164, Standard Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments.

2.- Bloque de calibración *ángulo-haz*.- Este bloque es más pequeño y liviano que un bloque IIW pero cumple las mismas funciones. Puede ser utilizado para comprobar el ángulo de divergencia y el punto de salida del transductor. El bloque también se lo utiliza para hacer calibraciones de sensibilidad y distancia, para haz normal y haz angular.

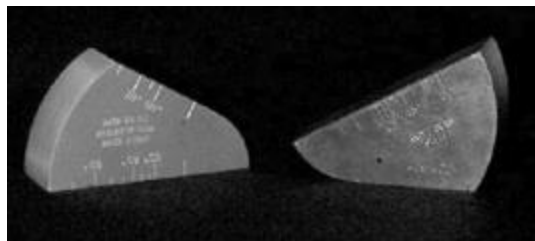


Figura 137. Bloque de calibración ángulo-haz

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

3.- Bloque de calibración AWS, *distancia/sensibilidad de onda transversal (DSC)*.- Es similar al anterior, se lo utiliza para determinar el punto de salida del haz y el ángulo de refracción en transductores de haz angular. También se puede calibrar la distancia y la sensibilidad del haz normal y haz angular. Instrucciones del uso de estos bloques se puede encontrar en el anexo de la ASTM estándar E164, Standard Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments.



Figura 138. Bloque de calibración DSC

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

4.- Bloque de calibración AWS, *distancia de onda transversal (DC)*.- Es un bloque estándar para la calibración de distancia y punto de salida del haz. Instrucciones del uso de estos bloques se puede encontrar en el anexo de la ASTM estándar E164, Standard Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments.



Figura 139. Bloque de calibración DC

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

5.- Bloque de calibración AWS de Resolución (RC).- Es utilizado para determinar la resolución de los transductores de haz angular. Se los fabrica para ángulos de refracción de 45, 60 y 70.



Figura 140. Bloque de calibración RC

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

6.- Gradillas de calibración.- Viene en gran variedad de longitudes, configuraciones y tamaños. Comúnmente son fabricadas de cuatro ó cinco gradas. Son utilizadas en calibración para medición de espesores.

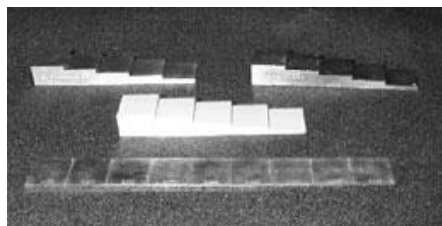


Figura 141. Gradillas de calibración

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

4.3 Métodos Básicos de Ultrasonidos

4.3.1 Escaneo por Contacto Usando Ondas Longitudinales

Esta técnica usualmente utiliza transductores de cristal simple ó dual, direccionando la energía ultrasónica de forma perpendicular ó casi perpendicular hacia la superficie que se escanea. También es conocida como técnica de haz recto, aquí las reflexiones provenientes de discontinuidades ó de la pared posterior del material, son utilizadas para determinar la idoneidad de un componente para servicio. Para obtener una reflexión, es necesario que el reflector se encuentre en posición normal respecto al haz. Discontinuidades laminares y volumétricas como: poros de gas, inclusiones metálicas, se orientan idóneamente para la aplicación del método. Discontinuidades que tienen un ángulo respecto a la superficie de escaneo, pueden no generar una reflexión ó pueden reflejar al sonido fuera del transductor.

En la siguiente figura se muestra un transductor de onda longitudinal simple, situado para realizar la medición de espesor de la pieza, a su lado derecho, se muestra el A-scan correspondiente, en el cual el tiempo-base fue calibrado para 25mm. El pulso inicial aparece en cero a la izquierda del trazo, y la reflexión que regresa aparece a 18mm.

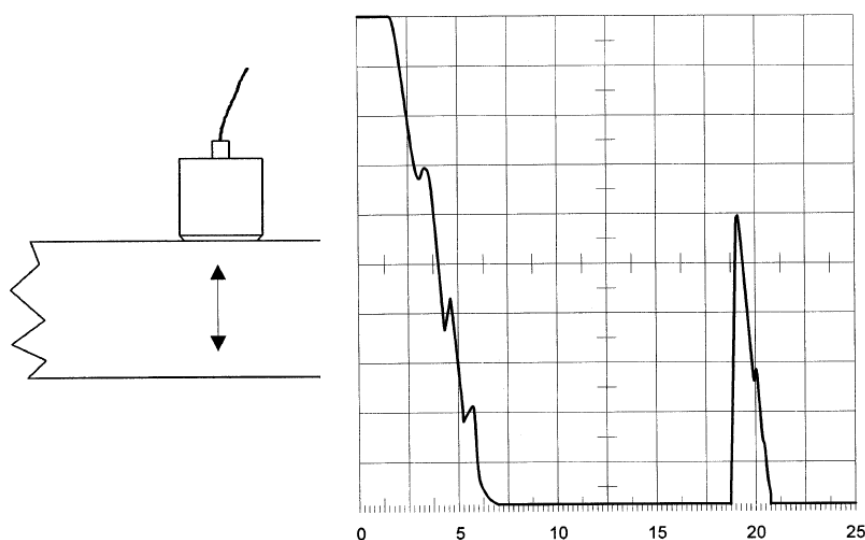


Figura 142. Medición de espesor con transductor de un elemento

Fuente: (Hellier, 2003)

La medición de espesores, es el ejemplo más simple de este método. Se puede observar que el pulso inicial ocupa casi 6 mm del tiempo-base, esto se lo conoce como “zona muerta” (mientras el cristal está transmitiendo la señal, el trazo no puede indicar claramente las señales recibidas en este tramo).

En la siguiente figura se muestra un transductor de elemento dual, situado para realizar la medición de espesor a una pieza de 4 mm, a su lado derecho, se muestra el A-scan correspondiente, en el cual el tiempo-base fue calibrado para 25 mm. Al utilizar un transductor dual, el emisor está aislado del receptor, de este modo no hay un pulso inicial y por lo tanto no habrá zona muerta. La primera reflexión es la generada por la parte posterior de la pieza (back wall echo “BWE”). Se puede observar la existencia de múltiples BWE a 8, 12, 16, 20 y 24 mm en la línea tiempo-base. Al dividir la posición de cada uno de estas nuevas señales para el número de pico al que pertenecen, también se obtiene el espesor de la pieza (4 mm), ejemplo: $16/4 = 4$ mm.

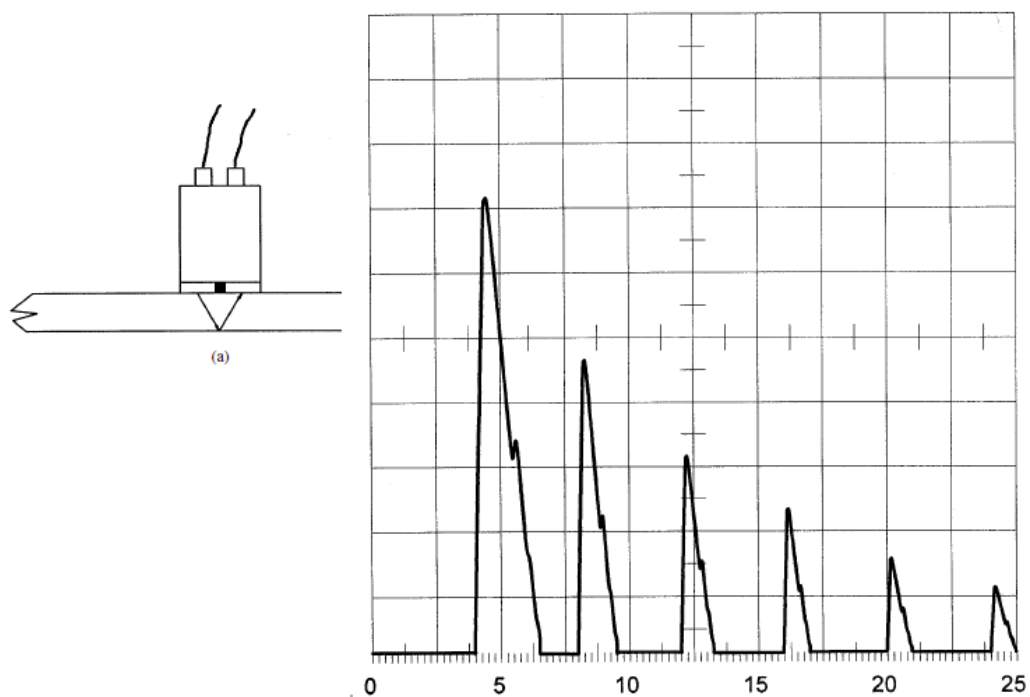


Figura 143. Medición de espesor con transductor de dos elementos

Fuente: (Hellier, 2003)

A continuación se muestra un transductor de un solo elemento, colocado para detectar laminaciones en una placa de acero de 20 mm de espesor. La laminación es más pequeña que el haz. Se observa que la posición del primer eco es a 11 mm y que el BWE indica 20 mm de espesor. El BWE tiene una amplitud reducida porque una parte del haz ya fue reflejada en la laminación. Si la laminación sería más grande que el haz, no existiría un BWE, por otra parte si la laminación es muy pequeña, el trazo de la amplitud será pequeño, en este caso se deberá incrementar la ganancia del equipo para ver la amplitud real.

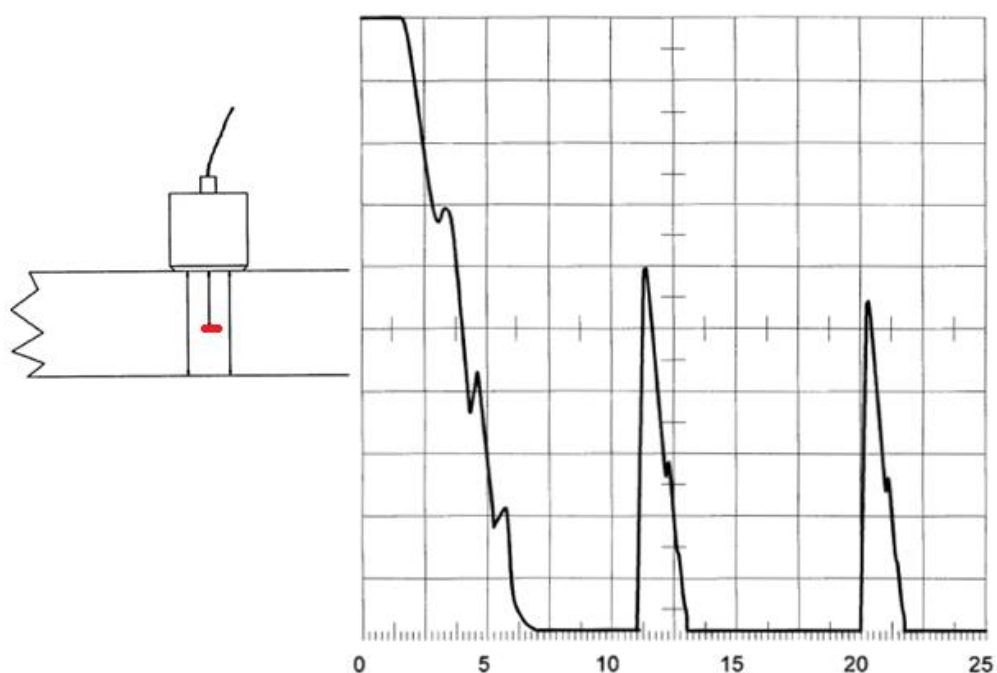


Figura 144. Detección de laminaciones con transductor de un elemento

Fuente: (Hellier, 2003)

En la figura 146, se puede observar dos discontinuidades que se encuentran con una orientación no favorable para este método. En la figura 146 (a), la discontinuidad refleja el haz lejos del transductor y también obstruye el BWE, como resultado no habrá señales visibles en la pantalla. En la figura 146 (b), la dirección vertical de la fisura permite pasar al haz de sonido en cada lado, pero no refleja ninguna anomalía, solo genera el BWE.

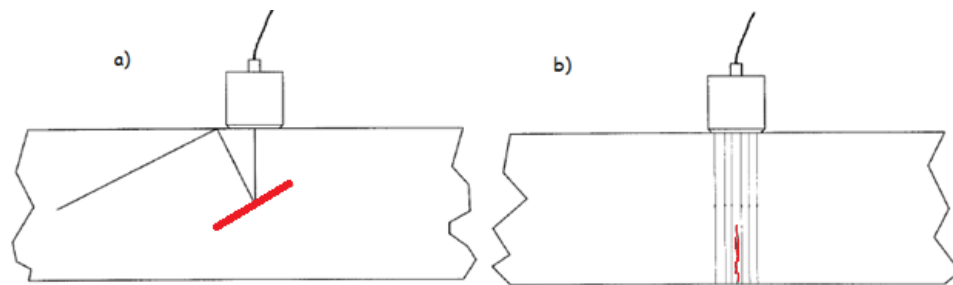


Figura 145. Discontinuidades en posición no favorable para el método

Fuente: (Hellier, 2003)

Finalmente, se muestra la técnica de múltiples ecos (fig. 147), usada en placas de espesores pequeños. Se ha calibrado el tiempo-base para 50 mm, la pieza a inspeccionar es de 3 mm de espesor. En la posición 1, el patrón de eco múltiple se extiende a 30 mm (14 señales), fig. 147(b). Con el transductor en la posición 2, sobre la laminación, el patrón de eco múltiple solamente se extiende hasta 15 mm, fig. 147(c). Esto sucede porque los ecos están muy cerca entre ellos, a tal punto que se genera interferencia entre ellos no dejando un tiempo-base claro entre ellos.

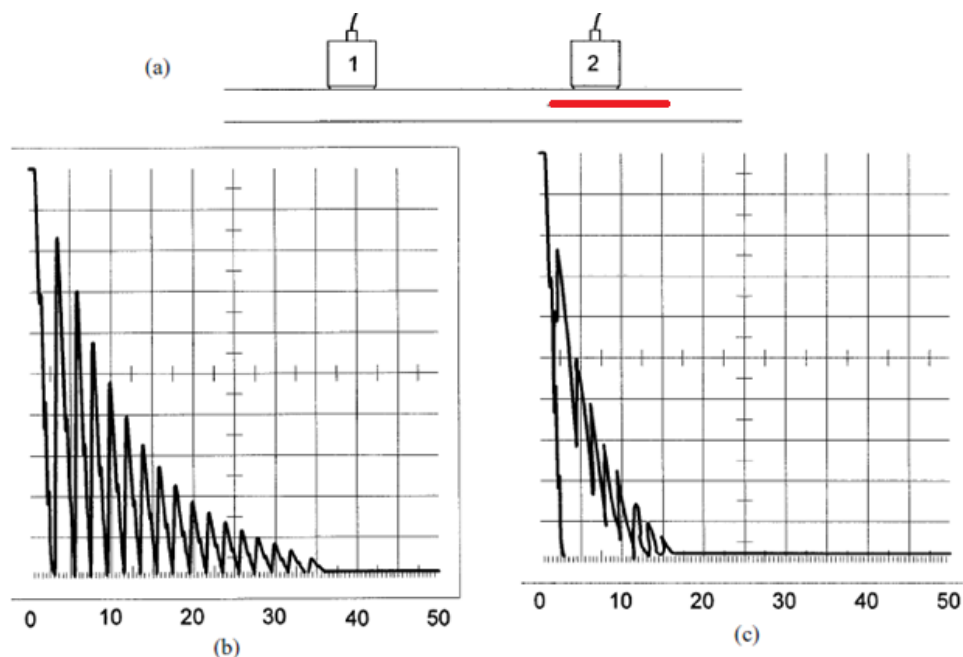


Figura 146. Detección de laminación en placa de espesor 3mm, técnica de múltiples ecos

Fuente: (Hellier, 2003)

4.3.2 Escaneo por Contacto Usando Ondas Transversales y Haz Angular

Si algunas discontinuidades tienen una orientación desfavorable para el haz recto, será necesario inclinar el haz con un ángulo apropiado, para asegurar que el haz golpee la discontinuidad lo más perpendicular posible. Para ángulos pequeños (más de 10° en el material que se examina), pueden ser utilizadas ondas longitudinales. Sin embargo, para ángulos mayores, el modo de conversión a ondas transversales es mucho más útil. Los ángulos comunes ó “preferidos” existentes en el mercado para ultrasonidos con ondas transversales son 45° , 60° y 70° , sin embargo otros ángulos pueden ser encontrados. Los ángulos marcados en los transductores de onda transversal son para acero, a menos que le siga una letra de identificación para otro material, ejemplo: “45 Al”, significa transductor de 45° de ondas transversales para aluminio.

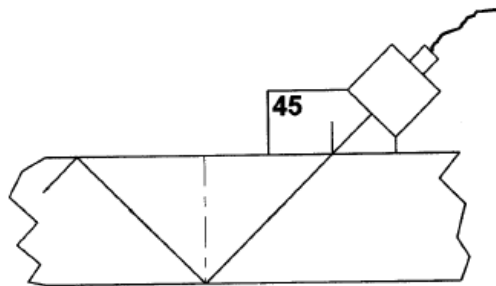


Figura 147. Escaneo utilizando un transductor de haz angular y ondas transversales

Fuente: (Hellier, 2003)

A continuación, se muestra dos gráficos, en los cuales mediante esta técnica se encuentran discontinuidades en el extremo inferior fig. 149(a), y en el extremo superior fig. 149(b), el espesor de la pieza es de 20 mm.

La distancia existente entre los puntos A-B se la conoce como *half skip distance* y entre los puntos A-D como *full skip distance*, el punto C es llamado *half skip position*. Para una probeta de 45° , la distancia de A-B generalmente es el espesor de la pieza.

En el gráfico (a) se puede observar que la distancia de A-C es de 28 mm, lo cual se muestra en el A-scan, mientras que en el gráfico (b) se

aprecia que la distancia de A-C-D es de 56 mm, como se mira en el respectivo A-scan.

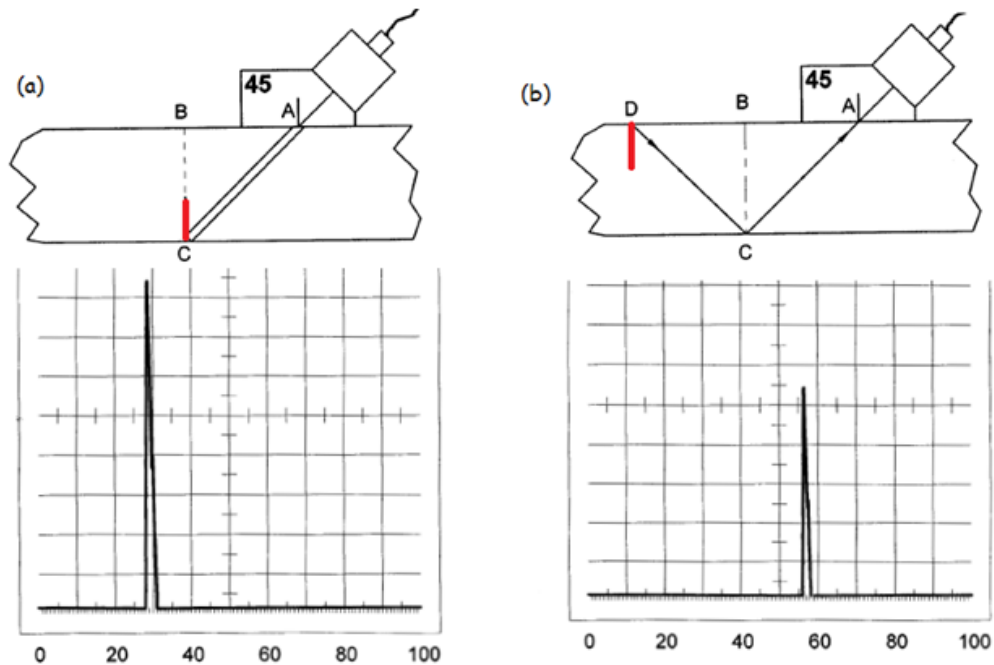


Figura 148. Half skip distance, full skip distance y half skip position

Fuente: (Hellier, 2003)

4.3.3 Técnica de Distancia de la Trayectoria del Haz

Es claro que no todas las discontinuidades ocurren en el extremo inferior ó el extremo superior. En soldaduras, por ejemplo, discontinuidades planas y volumétricas pueden ocurrir en cualquier parte dentro del volumen de la pieza. Para poder detectar, evaluar correctamente, y posicionar éstas discontinuidades, es necesario determinar la distancia de la trayectoria del haz hasta donde ocurre la reflexión. La distancia junto con la dirección del haz y el ángulo, permite que la posición de la discontinuidad sea trazada.

Discontinuidades volumétricas como poros de gas ó inclusiones en las soldaduras, no son muy sensibles al haz angular, por otra parte las discontinuidades planas, como falta de fusión en soldaduras, fisuras angulares, son muy sensibles al haz angular.

La siguiente figura muestra como se puede utilizar la técnica para detectar falta de fusión en una soldadura de 20 mm de espesor. La figura 150(a) muestra el bisel antes de soldar, la figura 150(b) muestra la soldadura

completa. En la figura 150(c), se muestra un transductor de 60° y de onda transversal, posicionado para obtener un eco máximo de la discontinuidad. La figura 150(d), muestra el trazo generado con el eco de la discontinuidad.

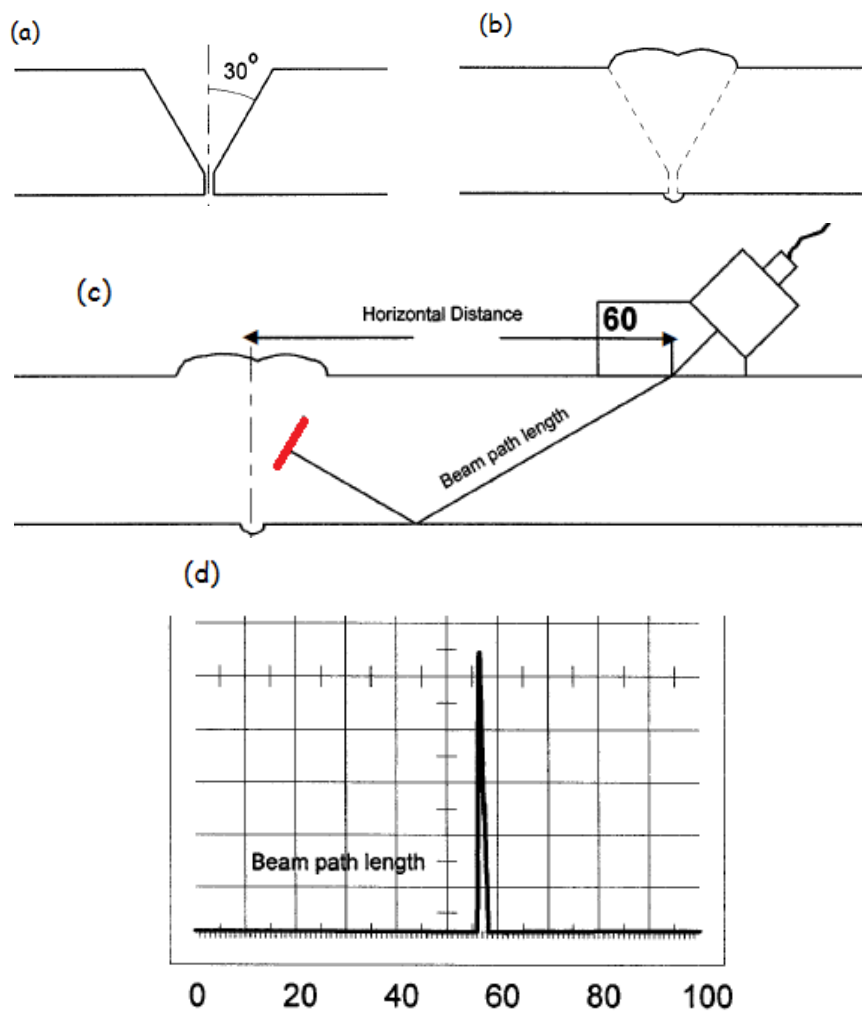


Figura 149. Detección de discontinuidad en soldadura

Fuente: (Hellier, 2003)

Una vez que se ha obtenido el eco máximo, se debe realizar dos medidas. La primera medición es en el rango del tiempo-base, se obtiene la longitud de la trayectoria del haz hasta la discontinuidad. La segunda medida es la distancia horizontal desde el punto de salida del transductor hasta el centro del cordón de soldadura. Estas dos mediciones, junto al ángulo de incidencia, son suficientes para encontrar la posición del reflector.

4.3.4 Técnica de Transductores Múltiples

Esta técnica implica dos transductores, un emisor y un receptor, colocados en lados opuestos (frente a frente) de la pieza inspeccionada. Por tanto, necesita acceso a ambos lados del componente; en la técnica, la pieza es desplazada ó se la hace rotar dentro del campo sonoro, para ser escaneada. Los reflectores existentes en la pieza causarán reducción en la cantidad de sonido que llega al receptor y la señal mostrada en la pantalla será una de baja amplitud.

Las ventajas principales de la técnica son:

1. discontinuidades en materiales altamente atenuantes pueden ser detectadas;
2. se puede inspeccionar la sección completa;
3. no existen pulsos iniciales (zona muerta).

También se deben considerar algunas de las desventajas al utilizar este método:

1. pérdidas de acoplante en cada lado;
2. falta de alineamiento entre los transductores;
3. Cambios en la atenuación del material.

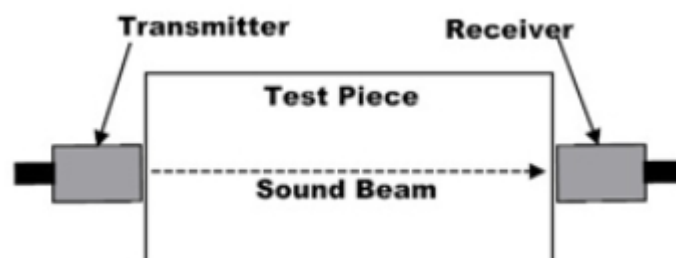


Figura 150. Técnica de transductores múltiples

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

4.3.5 Técnica de Inmersión

Las técnicas de escaneo por contacto son comúnmente utilizadas para escanear áreas pequeñas de componentes en servicio y para escanear componentes largos que no pueden ser movilizados a una configuración de inmersión. La técnica de inmersión es comúnmente utilizada en escaneo de áreas largas de planchas, tuberías, y productos durante su manufactura.

En esta técnica la pieza a inspeccionar es sumergida en un tanque de agua, el agua es utilizada como acoplante entre el medio y la pieza. La máquina de ultrasonidos es colocada en una plataforma móvil en una de las paredes del tanque, de este modo se puede desplazar el equipo en toda la altura del tanque. La plataforma y el movimiento tubular permiten al transductor desplazarse alrededor de los ejes X, Y, Z. Piezas a inspeccionarse redondas, son a menudo montadas en rodillos, de este modo la pieza puede rotar y el transductor se desplaza en el eje longitudinal de la plataforma, de este modo se puede inspeccionar toda la circunferencia. En la técnica de inmersión, se pueden utilizar transductores múltiples al mismo tiempo, de este modo se realiza una inspección más completa.

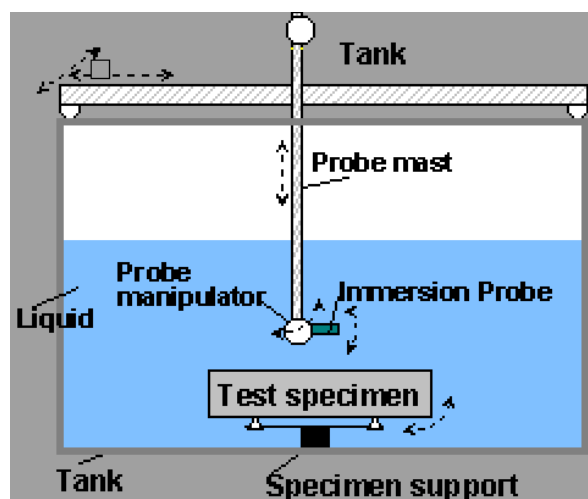


Figura 151. Técnica de inmersión

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

4.4 Evaluación e Interpretación de Soldaduras Mediante Ultrasonidos

4.4.1 Detección de Discontinuidades Típicas en los Depósitos de Soldadura

4.4.1.1 Concavidad de Raíz

La concavidad de raíz suele dar una amplia indicación que es menor a la generada por el BWE (back wall echo).

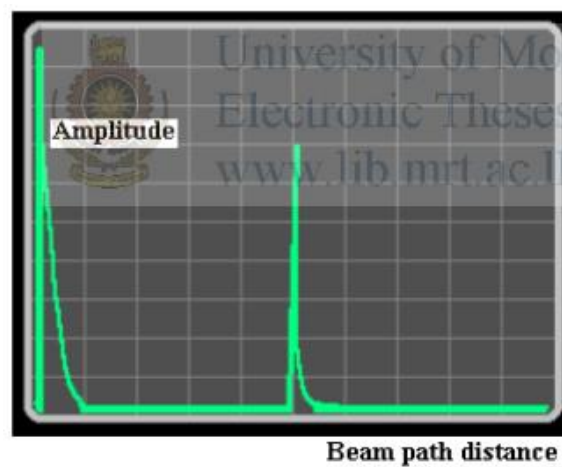


Figura 152. A-scan de concavidad de raíz

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

4.4.1.2 Convexidad de Raíz

La convexidad de raíz suele dar una amplia indicación que es mayor a la generada por el BWE (back wall echo).

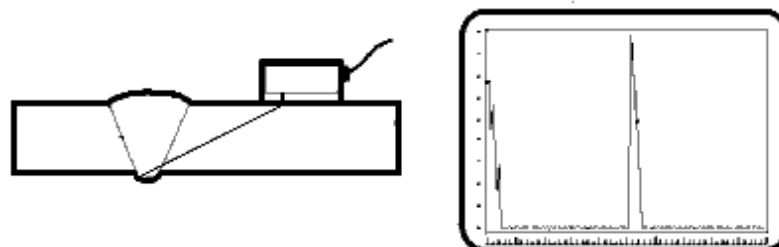


Figura 153. A-scan de convexidad de raíz

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

4.4.1.3 Inclusiones

Aparecen como interfaces definidas dentro del metal. Pequeñas agrupaciones de inclusiones en diferentes planos causan pérdida en la reflexión generada por éstas. Las señales de escoria mostradas en la pantalla suelen ser como una agrupación de señales con amplitudes individuales que varían en altura y posición.

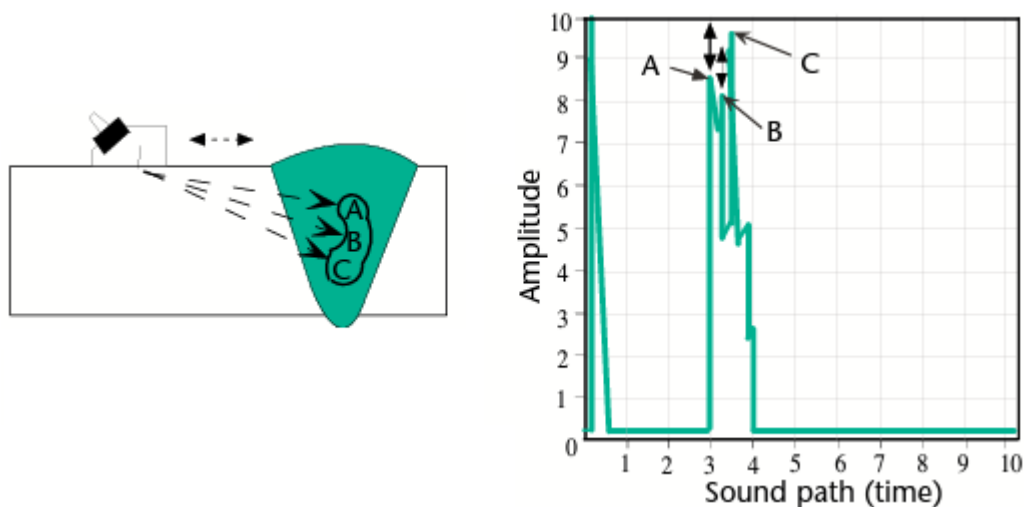


Figura 154. A-scan de inclusiones

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

Las inclusiones de Tungsteno suelen dar un trazo en la pantalla similar al de los poros de gas.

4.4.1.4 Fusión Incompleta

Si la falta de fusión está localizada en la parte inferior de la soldadura, una señal muy sólida será mostrada. Si un segundo trazo aparece en la misma señal, esto indica la probabilidad de que la falta de fusión sea en la parte superior de la soldadura. Las técnicas de ultrasonidos con haz angular, detectan fácilmente estas discontinuidades.

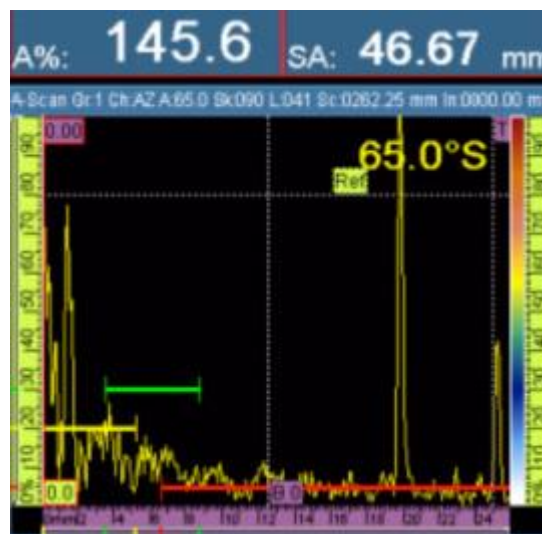


Figura 155. A-scan de falta de fusión

4.4.1.5 Falta Penetración

Se muestra en la pantalla como una indicación de fisura, pero la señal es mucho más estrecha.

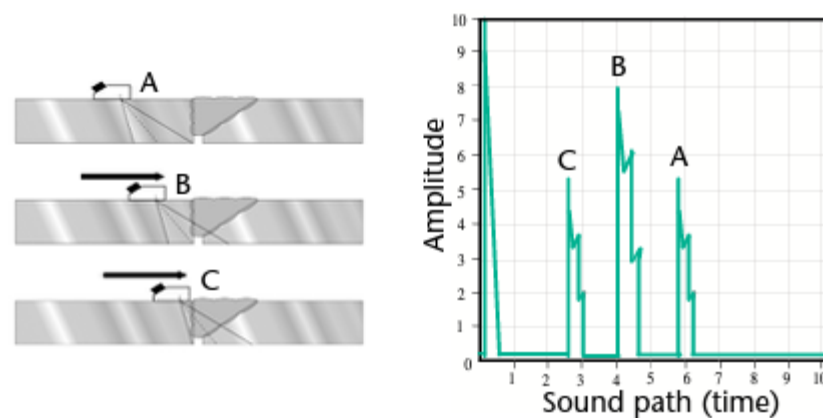


Figura 156. A-scan de falta de penetración

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

4.5.1.6 Porosidades

La señal generada por estos reflectores tiene una menor amplitud a la generada por el BWE, cuando se trata de un poro individual pequeño la pantalla muestra una sola señal estrecha, si se trata de un poro individual grande se muestra una secuencia de señales muy juntas,

finalmente, si se trata de una agrupación de poros se muestra una secuencia de señales.

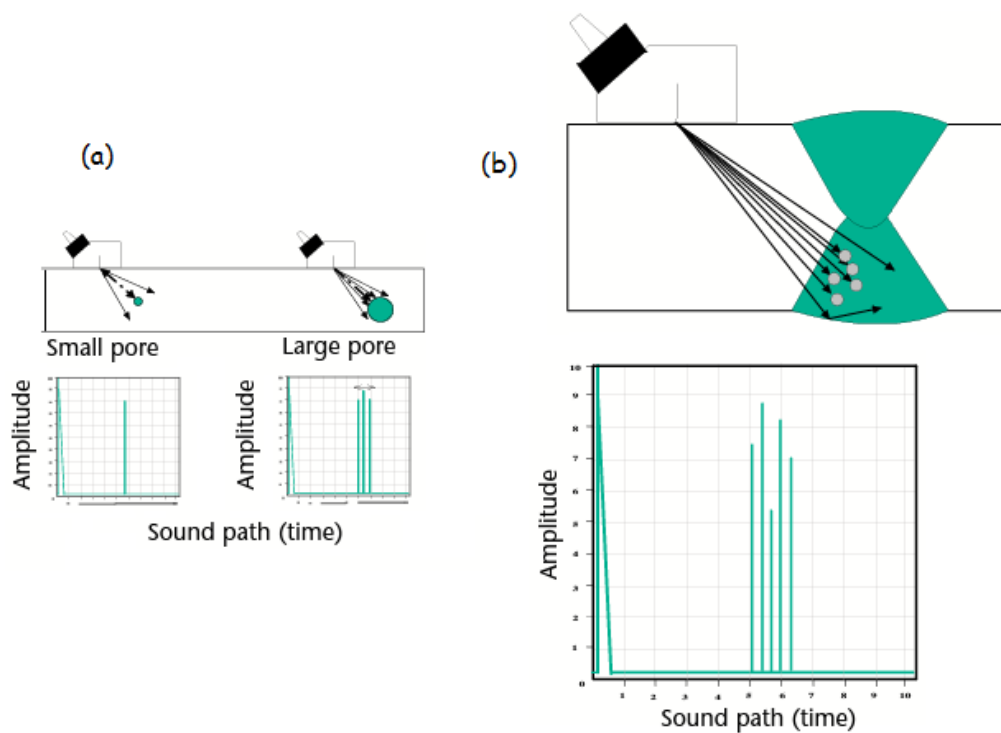


Figura 157. A-scan de porosidades, (a) poro pequeño y grande, (b) agrupación de poros

Fuente: (NDT Resource Center, 2014)

4.4.2 Resumen de Criterios de Aceptación/Rechazo Aplicados en Facilidades Petroleras Ecuatorianas para Evaluar el Resultado de los Escaneos Generados por el Ensayo de Ultrasonidos

En las tablas del Anexo 1, se presenta un resumen de los criterios de aceptación/ rechazo utilizados en facilidades petroleras ecuatorianas para evaluar e interpretar el resultado de las indicaciones generadas por el ensayo de gammagrafía. Como se indicó anteriormente, el uso de estas normas es en base a procedimientos internos de las empresas que realizan los trabajos de construcción dentro de facilidades petroleras, procedimientos que son específicamente para uso interno y totalmente confidencial hacia el público en general.

Estas tablas fueron creadas en base a las siguientes normas:

- ✓ **API 1104 Revisión 2013**, para líneas y ductos fuera de las estaciones (inspección en juntas de producción y calificación de soldadores).
- ✓ **API 650 Revisión 2010**, ver: ASME Sección VIII División 1 UW-51(b).
- ✓ **ASME Sección VIII División 1 UW-51(b) Revisión 2007**
- ✓ **ASME B31.3 Revisión 2012**, tabla 341.3.2 (para inspección de juntas soldadas en estaciones, pozos y refinerías).
- ✓ **ASME IX Revisión 2010**, QW-91 Volumetric NDE

4.4.3 Escaneos de Referencia en Depósitos de Soldadura

Los escaneos de referencia se encuentran dentro del Anexo 3, se entregan 10. Cada escaneo cuenta con una tabla descriptiva, en la cual se indican aspectos como:

- ✓ Material, espesor, diámetro;
- ✓ proceso de soldadura utilizado;
- ✓ norma que aplica;
- ✓ identificación de la indicación;
- ✓ aplicación del criterio de aceptación rechazo;
- ✓ aprobación ó rechazo de la junta soldada.

Estos escaneos fueron generados al realizar inspección a juntas soldadas para facilidades petroleras de la empresa PETROAMAZONAS EP, en la amazonia ecuatoriana, los archivos generados por el equipo de ultrasonidos no pueden ser presentados como anexos ya que pertenecen estrictamente a PETROAMAZONAS EP.

Dentro del proceso para la obtención de estos escaneos, se han aplicado los principios que rigen el ensayo de ultrasonidos, la selección de la norma de referencia y la aplicación de los criterios de aceptación/rechazo; todos estos temas fueron desarrollados a lo largo del capítulo.

Por motivos de confidencialidad requeridos por PETROAMAZONAS EP Y RADIN, no se describirá aspectos considerados confidenciales para la empresa, aspectos como:

- ✓ Identificación de la junta;
- ✓ lugar donde se encuentra la junta;
- ✓ nombre del proyecto al que pertenece la junta;

4.4.4 Reportes Generados para Constatar la Inspección

Es muy importante un medio físico por el cual se constate la aplicación del ensayo no destructivo. Generalmente se debe llevar un registro diario del trabajo realizado, en el cual consten aspectos como la detección de defectos u otras novedades que se hallaron al realizar la inspección mediante la aplicación del ensayo. Por este motivo la empresa que realiza las actividades de inspección debe tener formatos de reportes para cada técnica por separado. Un ejemplo del formato diario para el ensayo de ultrasonidos se encuentra en el Anexo 5.

4.4.5 Preguntas para Evaluación Teórica sobre UT

En el Anexo 6, se presenta una recopilación de 20 preguntas, las cuales fueron obtenidas de los libros de estudio para rendir las pruebas de ASNT nivel III.

CAPITULO V

CURSO DE ENSAYO DE LIQUIDOS PENETRANTES

El objetivo de este curso es presentar un medio de información donde se encuentre los principios que rigen el ensayo radiográfico, las normativas que hacen referencia a los NDT, un resumen de criterios de aceptación/rechazo basado en las normativas antes mencionadas (aplicados a PT) y finalmente resultados de referencia que se obtiene con este ensayo. Cabe recalcar que las normativas mencionadas, son las aplicadas en la construcción de facilidades petroleras en Ecuador.

A continuación se muestra los puntos como se desarrollará el curso:

5.1 Definición de Ensayo de Líquidos Penetrantes

5.2 Principios Básicos del Ensayo de Líquidos Penetrantes

5.3 Propiedades de los Líquidos Penetrantes, Emulsificadores, Removedores, y Reveladores

5.4 Mecanismo de Penetración, Emulsificación y de Revelación

5.5 Procesos del Ensayo de Líquidos Penetrantes

5.6 Evaluación e Interpretación de Soldaduras Mediante Líquidos Penetrantes

Cada uno de los puntos antes mencionados contiene dentro de su estructura temas que se consideran importantes para el desarrollo e implementación de éste.

5.1 Definición de Ensayo de Líquidos Penetrantes

El ensayo de líquidos penetrantes revela y localiza discontinuidades dispuestas en las superficies de materiales sólidos no porosos ó rugosos, todo esto gracias a la acción capilar que poseen los líquidos penetrantes. Estos líquidos se filtran por aberturas diminutas dispuestas en la superficie del material indicando así la localización de la discontinuidad.

5.2 Principios Básicos del Ensayo de Líquidos Penetrantes

5.2.1 Proceso Básico del Ensayo de Líquidos Penetrantes

El principio básico de este ensayo está basado en la acción capilar del líquido. La capilaridad es un fenómeno superficial que permite al líquido ingresar en las aberturas como resultado de las energías que están presentes en la superficie de éstas. El proceso de aplicación básico del ensayo, consiste en seis pasos:

1. Pre-limpieza y secado de la superficie del objeto a inspeccionarse.
2. Aplicación del líquido penetrante en la superficie del objeto.
3. Remoción del exceso de líquido penetrante en la superficie del objeto.
4. Aplicación del revelador.
5. Examinación visual e interpretación de las indicaciones producidas en la superficie por el líquido penetrante
6. Pos-limpieza del objeto para remover residuos del proceso.

La siguiente figura muestra un esquema del procedimiento.

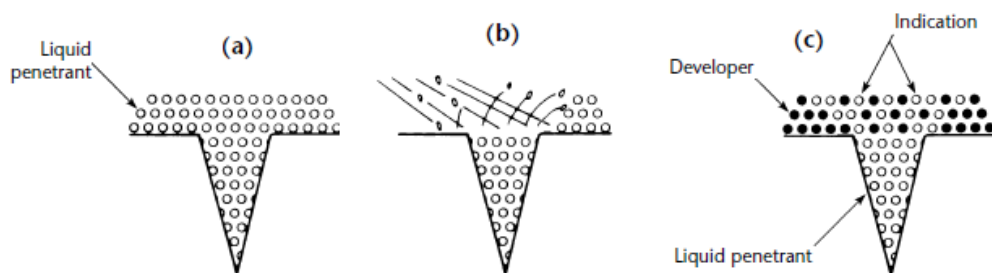


Figura 158. Proceso básico del ensayo de líquidos penetrantes, (a) aplicación del penetrante, (b) remoción de excesos, (c) aplicación del revelador

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.2.2 Clasificación de los Líquidos Penetrantes

Se los puede calificar de acuerdo a dos aspectos:

1. tipo de tinte;
2. método de remoción.

5.2.2.1 Clasificación por tipo de tinte.- Se clasifican en tres:

1. *líquido penetrante fluorescente*, contiene un tinte fluorescente que emite luz amarilla verdosa cuando se lo expone a radiación ultravioleta;
2. *líquido penetrante visible*, contiene un tinte que es visible bajo luz natural. La visibilidad se mejorada con la aplicación de un revelador color blanco, el tinte visible generalmente es de color rojo ó azul;
3. *líquido penetrante dual*, el penetrante contiene un tinte que puede ser visible bajo luz natural ó bajo radiación ultravioleta, el color visible usualmente es rojo, mientras que el fluorescente es naranja.

5.2.2.2 Clasificación por método de remoción.- Se clasifican en tres:

1. *removible con agua*, la remoción del exceso de líquido penetrante solamente se necesita agua;
2. *pos-emulsionable* (fig.160), la remoción del exceso de líquido penetrante se realiza en primer lugar con un baño de emulsificador, formando en la mayoría de casos una emulsión que puede ser removida posteriormente con agua;
3. *removible con solventes*, la remoción del exceso de líquido penetrante se la realiza con solventes especificados por el fabricante. La mayoría de líquidos penetrantes removibles con solventes son pos-emulsionables.

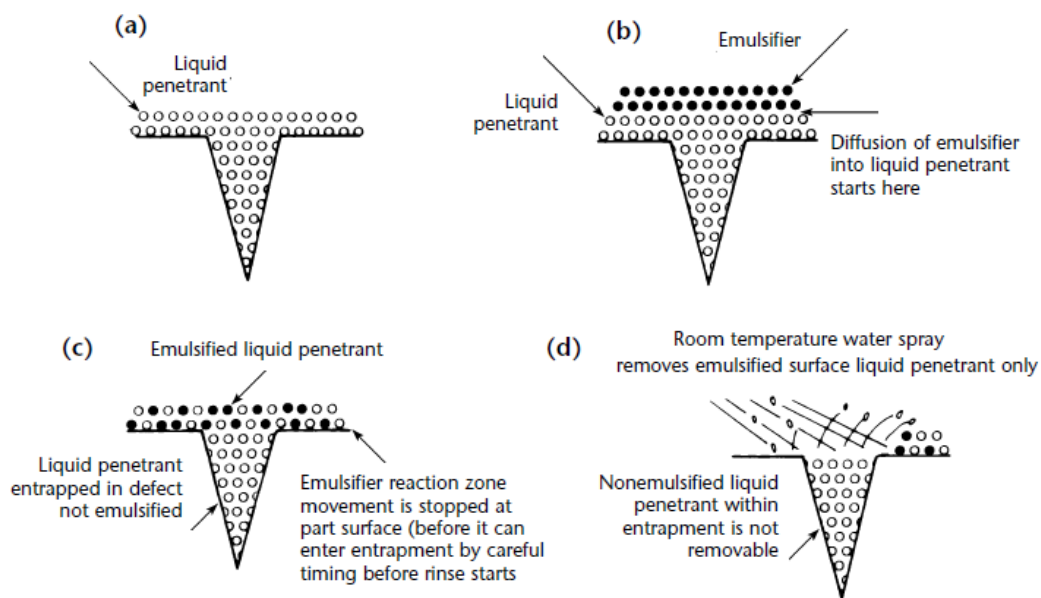


Figura 159. Proceso pos-emulsionable, (a) aplicación del penetrante, (b) aplicación del emulsificador, (c) el emulsificador se mezcla con el líquido penetrante, (d) limpieza con agua del exceso de líquido penetrante

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.2.3 Emulsionantes y Removedores

5.2.3.1 Emulsionantes.- Existen dos tipos de emulsionantes:

1. tipo hidrófilo (tienen afinidad por el agua);
2. tipo lipófilos (tiene afinidad con aceites).

A los primeros se los conoce como removedores, están compuestos de agentes emulsificadores disueltos en agua de manera concentrada; los segundos están formados por una mezcla de líquidos y como base aceite, así formar una mezcla que puede ser removida con agua, vienen en una presentación lista para usarse.

5.2.3.2 Removedores.- Los más comunes eran fabricados a base de petróleo ó disolventes clorados, pero por su forma inflamable ahora se usa detergentes ó solventes a base de agua. El agua sola, puede ser utilizada como solvente de tintes penetrantes removibles con agua.

5.2.4 Tipos de Reveladores

El revelador incrementa la intensidad (brillo) del líquido penetrante fluorescente y el contraste de las indicaciones generadas por el líquido

penetrante visible. También provee la función de secado, la cual sirve para extraer el líquido penetrante dentro de la discontinuidad hacia la superficie, haciéndolo más visible. Otra de las funciones es dispersar el líquido penetrante en la superficie, alargando la apariencia de la indicación.

5.2.4.1 Reveladores en polvo.- Son aplicados a superficies secas por suspensión en aire, mediante rocío electrostático y por inmersión. El polvo es ligero, de forma de pelusa y se adhiere a la superficie del objeto en una capa fina. Estos reveladores no se los utiliza con líquido penetrante visible porque no producen una capa de contraste satisfactorio. La forma más común es el rocío electrostático.

5.2.4.2 Reveladores solubles en agua (acuosos).- Consiste en polvo disuelto en agua, se lo aplica sumergiendo a la pieza en éste ó por rocío en la superficie. Mientras la pieza se seca, una fina capa de polvo se mantiene en la superficie. Sin embargo hay que tener cuidado que el revelador genere charcos, de este modo se obtendrá una capa de espesor regular.

5.2.4.3 Reveladores no acuosos.- Viene en presentaciones listas para el uso, frecuentemente en aerosoles. Este tipo de revelador es el más sensible porque la acción del solvente contribuye a que el revelador entre en la discontinuidad y se disuelva en el líquido penetrante. Esta acción incrementa el volumen y reduce la viscosidad del líquido penetrante filtrándolo hacia la superficie.

5.3 Propiedades de los Líquidos Penetrantes, Emulsificadores, Removedores, y Reveladores.

5.3.1 Líquidos Penetrantes

Existen requisitos básicos que debe cumplir un líquido penetrante para un desempeño correcto:

1. ser capaz de humedecer y eventualmente distribuirse sobre la superficie del objeto a inspeccionar;

2. ser capaz de entrar y llenar las cavidades abiertas a la superficie por más pequeñas que éstas sean;
3. resistir la remoción y mantenerse dentro de la discontinuidad, durante el proceso de limpieza del exceso de líquido penetrante;
4. ser capaz de salir de la discontinuidad después del proceso de remoción de exceso de líquido penetrante;
5. tener una alta visibilidad ó contraste;
6. que no corroa el objeto;
7. que no sea tóxico.

5.3.1.1 Propiedades Corrosivas.- Los penetrantes, emulsificadores y removedores, no deben reaccionar con metales causando pitting, fisuras ó mancharlos. Este requerimiento es complicado porque generalmente las piezas inspeccionadas están sujetas temperaturas variables. Si se deja restos de líquido penetrante en una pieza expuesta a altas temperaturas, se pueden generar los defectos mencionados anteriormente.

5.3.1.2 Color.- El portador ó vehículo en el líquido penetrante es prácticamente sin color y transparente. Esto dificulta mirarlo cuando está atrapado en pequeñas aberturas superficiales y agujeros. Un tinte ó mezcla de tintes es disuelto en este portador para proveer un alto contraste, fácilmente visible en una indicación. Dos tipos de tintes son usados, visibles ó fluorescentes

5.3.1.3 Tintes visibles.- Los líquidos penetrantes visibles, son visibles bajo condiciones de luz natural y son de color rojo, naranja y purpura. El color más utilizado es el rojo, éste brinda un alto contraste con el revelador y algunas superficies metálicas. Su costo es bajo y vienen en presentaciones listas para el uso.

5.3.1.4 Tintes fluorescentes.- Algunos minerales y compuestos químicos tiene la habilidad para emitir luz visible cuando se los expone a una energía de onda corta (rayos-X, luz ultravioleta). Esta propiedad de convertir energía en luz visible es la fluorescencia. Los tintes de penetrantes

fluorescentes, generalmente están entre 475nm a 575nm, lo cual se ubica en el espectro visible de luz verde ó amarilla.

5.3.1.5 Viscosidad.- Es una medida de la resistencia de un líquido a cambiar su forma física, varía con la temperatura, aumenta con temperatura alta, y disminuye con temperatura baja. La viscosidad no tiene efecto en la habilidad de penetración; por ejemplo la melaza (generada en el procesamiento de la azúcar) tiene baja viscosidad y una alta capacidad para penetrar, mientras que el agua tiene alta viscosidad pero baja capacidad de penetración.

Desde un punto de vista práctico, la viscosidad afecta la velocidad de penetración del líquido, también determina la cantidad de penetrante y emulsificador que se queda dentro de la discontinuidad.

5.3.1.6 Punto de inflamabilidad.- Es la temperatura a la cual un líquido genera el suficiente vapor de sí mismo para causar ignición con la presencia de fuego. Esta propiedad no afecta el desenvolvimiento del líquido, pero es importante como una medida de precaución.

5.3.1.7 Sensibilidad.- Definida como la habilidad para producir una indicación visible desde una indicación abierta a la superficie muy pequeña y estrecha. Se relaciona con la habilidad para penetrar y con el contraste que puede generar el penetrante. La selección del nivel de sensibilidad que se va a utilizar depende del tamaño de la potencial discontinuidad, ancho y volumen de la discontinuidad, forma, y acabado superficial.

5.3.1.8 Intensidad de fluorescencia.- Es la cantidad de luz visible dada cuando un tinte fluorescente es expuesto a luz ultravioleta. Hay algunas variables que influyen en la intensidad de fluorescencia:

1. el espesor de la película de penetrante;
2. la intensidad de la luz ultravioleta que choca con la superficie del objeto inspeccionado;
3. la cantidad de concentración del tinte penetrante en el líquido;

4. la capacidad del tinte para absorber la luz ultravioleta;
5. la eficiencia del tinte para convertir los electrones liberados en luz visible.

5.3.2 Emulsificadores ó Removedores

Los penetrantes fabricados a base de petróleo no son solubles en agua, sin embargo, hay sustancias químicas (emulsificadores) que combinados con éstos forman una mezcla removible con agua. Los emulsificadores son combinaciones complejas de químicos. Idealmente, se debe remover todo el exceso de líquido penetrante de todas las áreas (incluyendo filetes, esquinas) sin que se remueva el penetrante atrapado dentro de la discontinuidad. Formulando esta idea, la mezcla de emulsificador con penetrante es un balance delicado, una mezcla muy agresiva va a dejar una superficie limpia, pero también va a remover el penetrante atrapado en la discontinuidad, mientras que una mezcla que no sea agresiva va a dejar restos de penetrante en la superficie. Los emulsificadores son específicos para cada tipo de penetrante, las condiciones necesarias las define el fabricante. Los penetrantes removibles con agua, ya contienen emulsificador como parte de su formulación, por lo tanto no es necesario realizar mezclas.

Los emulsificadores lipófilos son una especie de jabón líquido que se esparce en el penetrante, produciendo una mezcla que puede ser removida con agua; añadir emulsificador lipófilo a un penetrante pos-emulsionable no produce un penetrante lavable con agua satisfactorio.

Los emulsificadores hidrófilos, llamados removedores para diferenciarlos de los anteriores, consisten en una mezcla de químicos conocidos como surfactantes (alivian la tensión superficial del líquido), éstos son suministrados como líquidos concentrados y se los mezcla con agua antes ó después del proceso de remoción del penetrante. La concentración debe tener un 5% máximo de agua.

5.3.3 Reveladores

Los reveladores ayudan a extraer el penetrante atrapado en la discontinuidad hacia la superficie, también proveen contraste entre la superficie de la pieza y la indicación. Su sensibilidad y removilidad son propiedades que se pueden comprobar utilizando estándares de referencia. Los reveladores en polvo y no acuosos vienen en presentaciones listas para su uso. Los reveladores solubles en agua (acuosos) son suministrados como mezclas concentradas con agua, de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

5.4 Mecanismo de Penetración, Emulsificación y de Revelación

5.4.1 Penetración

La detección de discontinuidades mediante este ensayo, depende de la habilidad del penetrante para entrar en las discontinuidades y mantenerse atrapado dentro de ellas. Esto requiere que el penetrante se difunda suavemente sobre la superficie y eventualmente forme un recubrimiento sobre ésta. Se debe considerar los siguientes conceptos:

5.4.1.1 Habilidad para humedecer.- Es la habilidad de un líquido para difundirse sobre una superficie sólida.

5.4.1.2 Ángulo de contacto.- La habilidad para humedecer y el ángulo de contacto son inversamente proporcionales, a mayor habilidad para humedecer menor será el ángulo de contacto. Este ángulo determina la habilidad para humedecer y varía dependiendo el material que se humedece, por ejemplo, el ángulo de contacto entre el agua y la plata es 90 grados; el ángulo entre el mercurio y el vidrio es 132 grados, etc. La siguiente figura muestra la relación entre el ángulo de contacto y la habilidad para humedecer.

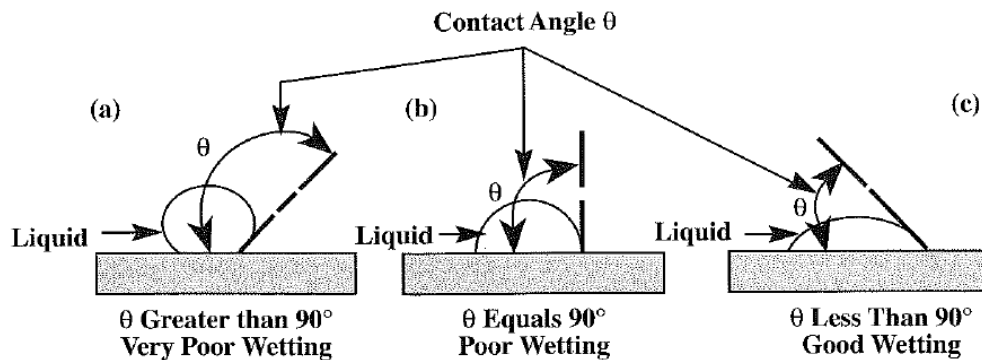


Figura 160. Relación entre el ángulo de contacto y la habilidad para humedecer

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.4.1.3 Acción capilar.- Es la responsable de que el líquido penetrante entre y salga de la discontinuidad. La acción capilar es demostrada con la elevación de líquido en un tubo de diámetro pequeño. La elevación del líquido no ocurrirá a menos que el líquido humedezca al tubo, cuando el líquido humedece el tubo el nivel de líquido se incrementa a causa del ángulo de contacto y de la tensión superficial del líquido.

Un ángulo de contacto menor a 90 grados, causa que el extremo del líquido se haga curvo hacia la pared del tubo y junto a la tensión superficial del líquido, éste se adhiere a la pared del tubo, atrayendo líquido adicional hacia la superficie humedecida y causando que el líquido incremente su nivel. Cuando el ángulo de contacto es mayor a 90 grados, ocurre lo contrario, el líquido sufre una depresión y baja su nivel. Si el ángulo de contacto es de 90 grados, el líquido no se dispersa y el nivel del líquido en el tubo y fuera de éste se mantiene estable.

La siguiente figura ilustra la relación entre el ángulo de contacto y el nivel del líquido dentro del tubo.

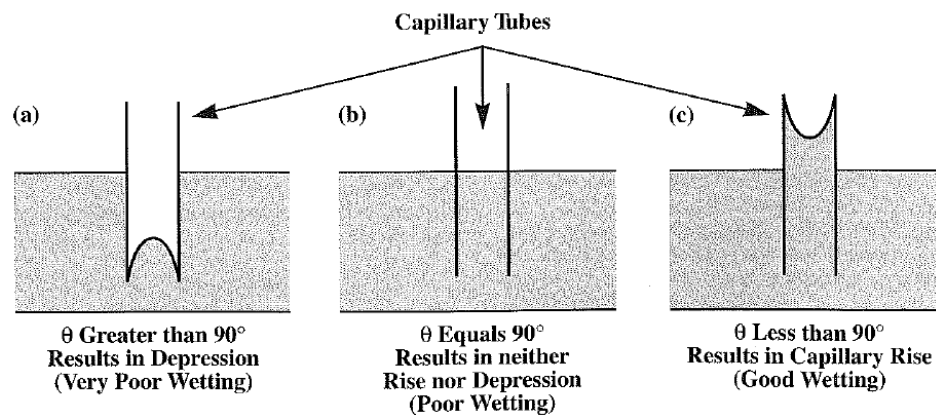


Figura 161. Relación entre el ángulo de contacto y el nivel del líquido dentro de un tubo de diámetro pequeño

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.4.1.4 Efectos de la temperatura.- Los efectos de temperatura varían dependiendo del tipo de penetrante y el método utilizado. Generalmente hablando, un rendimiento satisfactorio se logra en el rango de 4°C a 38°C . Temperaturas menores a 4°C , incrementan la viscosidad del penetrante y disminuye su acción capilar. A temperaturas mayores a 49°C , la evaporación del líquido puede afectar la intensidad de color ó la fluorescencia del penetrante.

5.4.2 Emulsificación

El aceite y el agua son mutuamente insolubles; sin embargo, si se añade una pequeña cantidad de aceite en agua y se los mezcla violentamente, el aceite forma pequeñas gotas. Dependiendo de su tamaño, éstas pequeñas gotas se mantendrán en suspensión, dando a la mezcla una diferente tonalidad. Esta mezcla es llamada "emulsión". Hay algunos químicos que tienen la habilidad de mezclarse con aceites y formar una mezcla fácilmente emulsionable. Cuando un penetrante fabricado a base de petróleo es combinado con un emulsificante, la mezcla puede ser removida con agua. Hay dos tipos de emulsificantes: emulsificador lipófilo y emulsificador hidrófilo.

5.4.2.1 Acción del emulsificador lipófilo.- Trabaja a través de un proceso llamado difusión. La difusión, es la mezcla entre moléculas gracias al movimiento aleatorio que éstas poseen. Cuando dos líquidos miscibles que no reaccionan químicamente son puestos en un mismo recipiente, su movimiento molecular permite a éstas penetrar unas a otras y eventualmente convertirse en una mezcla uniforme. La tasa de difusión incrementa con concentraciones altas y temperaturas elevadas.

En nuestro caso el penetrante se difunde en el emulsificador y viceversa. Este proceso de difusión es el responsable de las mezclas pos-emulsionables.

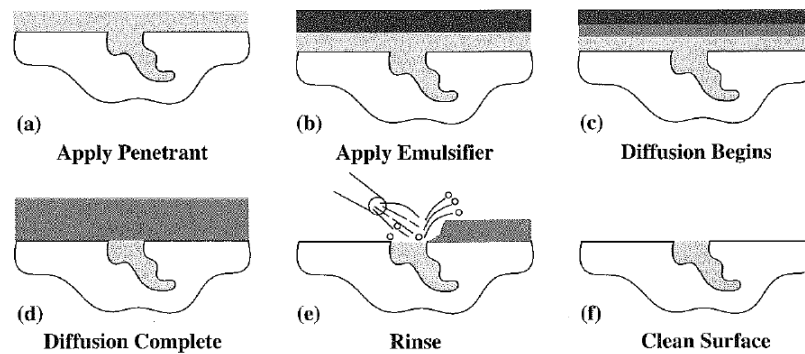


Figura 162. Mecanismo de acción de emulsificador lipófilo

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.4.2.2 Acción del emulsificador hidrófilo.- Consiste en una mezcla de químicos llamados surfactantes, éstos son suministrados como concentraciones y mezclados con agua antes ó después del proceso de remoción. A diferencia de los emulsificantes lipófilos, los hidrófilos son inmiscibles en el penetrante y la difusión no ocurrirá. Todo el proceso de limpieza se lleva a cabo en la superficie, el penetrante atrapado no está involucrado hasta que éste queda expuesto.

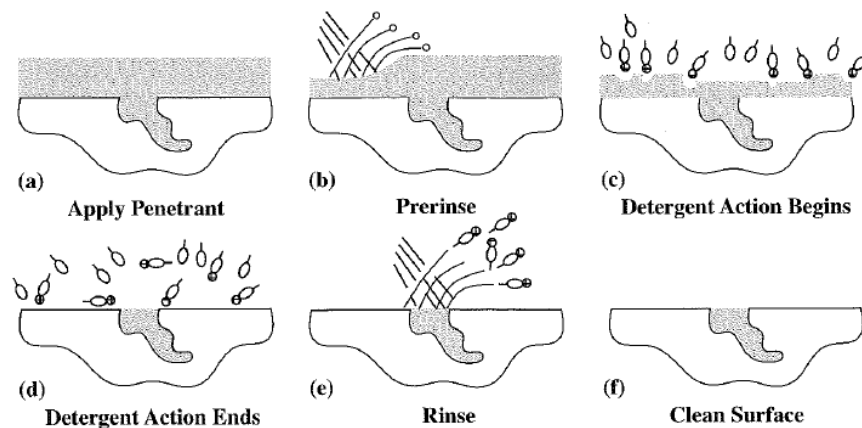


Figura 163. Mecanismo de acción de emulsificador hidrófilo

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.4.2.3 Removedor tipo solvente.- El mecanismo de remoción es a través de un solvente y acción de dilución. Algunos removedores destilados del petróleo contienen aceites que se evaporan lentamente, sin embargo, cuando se los utiliza como removedores de penetrante, no intervienen con la salida del penetrante de las discontinuidades.

5.4.3 Revelación

La función básica de los reveladores es mejorar la visibilidad de las indicaciones generadas por el penetrante. El mejoramiento de la visibilidad se lo consigue a través de numerosos mecanismos, entre los cuales tenemos:

1. ayuda en la extracción del penetrante atrapado en las discontinuidades abiertas a la superficie y transferir al menos una parte de éste hacia la superficie;
2. Incrementar el tamaño efectivo de la película de penetrante exudada desde la discontinuidad;
3. Incrementa el contraste entre la indicación y la superficie.

5.5 Procesos del Ensayo de Líquidos Penetrantes

El proceso para líquidos penetrantes visibles y fluorescentes es similar. Incluyendo el tiempo de fijación, tiempo de emulsificación, tiempo y

temperatura de la limpieza con agua, temperatura y tiempo de secado, intensidad de la luz ultravioleta ó la luz normal; factores que son establecidos por el procedimiento del cliente.

5.5.1 Líquidos Penetrantes Removibles con Agua

Para asegurarse que éste método es confiable, reproducible y mantiene suficiente sensibilidad para el propósito requerido, el método consta de los siguientes pasos:

1. Pre limpieza y secado de la superficie a inspeccionar. Una superficie contaminada no proveerá indicaciones confiables. En algunos casos es necesario lijar la superficie para poder levantar capas de escorias.
2. Aplicar el líquido penetrante a las superficies limpias y secas. Dejar el suficiente tiempo de fijación para que el líquido penetrante entre en las discontinuidades. El líquido penetrante debe humedecer toda la superficie a inspeccionar formando una capa delgada y uniforme. Si el líquido penetrante deja áreas desnudas, la superficie del objeto no está lo suficientemente limpia.
3. Luego de un tiempo de fijación apropiado, se debe remover el exceso de líquido penetrante con agua a temperatura ambiente, ésta puede ser aplicada mediante un espray. Si se utiliza un revelador disuelto en agua, éste debe ser aplicado a continuación de la limpieza con agua.
4. En caso de utilizar reveladores en polvo ó no acuosos, se debe dejar secar la pieza, después de la limpieza del exceso de líquido penetrante.
5. Una vez aplicado el tiempo de revelado apropiado, el líquido penetrante que ingresó en las discontinuidades las trazará, haciéndolas visibles.
6. Se debe observar e interpretar las indicaciones de discontinuidades que generó el líquido penetrante. Esto se lo debe realizar bajo las condiciones de luz necesarias.
7. Realizar la pos-limpieza de la superficie para remover residuos del proceso que podrían causar daños como corrosión del material.

La figura 165, nos indica un diagrama del proceso indicado.

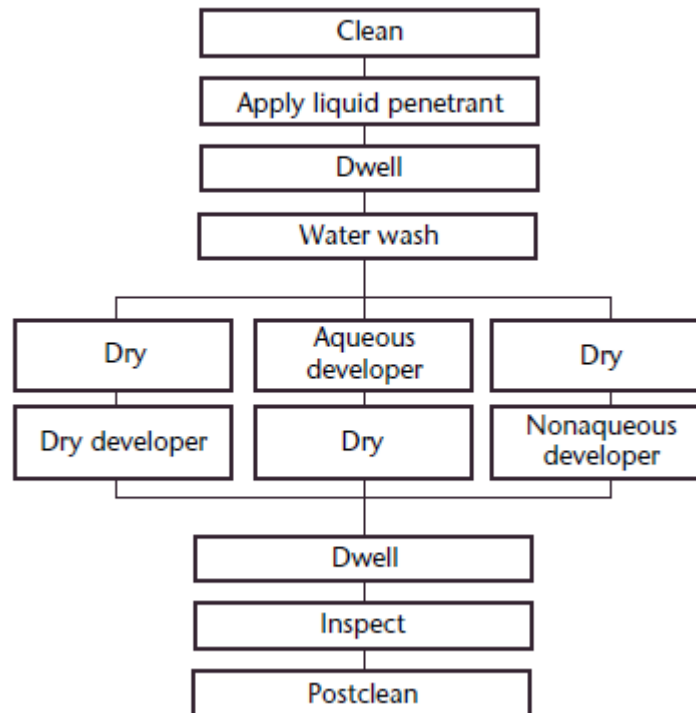


Figura 164. Proceso de líquidos penetrantes removibles con agua

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.5.2 Líquidos Penetrantes Pos-Emulsionables Lipófilos

La figura 166, muestra el diagrama de este proceso. Los pasos iniciales de pre limpieza, secado, aplicación del líquido penetrante, tiempo de fijación son los mismos que el procedimiento anterior. Como el penetrante no contiene un emulsificador, se debe aplicar dos pasos adicionales que constan en la aplicación del emulsificador y tiempo de emulsificación adecuado. Aplicado el emulsificador se podrá limpiar de la superficie el líquido penetrante, luego se debe secar el objeto y aplicar revelador en éste. Si se utiliza revelador acuoso, éste debe ser colocado a continuación de la limpieza del líquido penetrante con agua. Finalmente, se deja el tiempo de revelado correcto, se evalúa las indicaciones generadas por el líquido penetrante y se realiza la pos limpieza de la pieza.

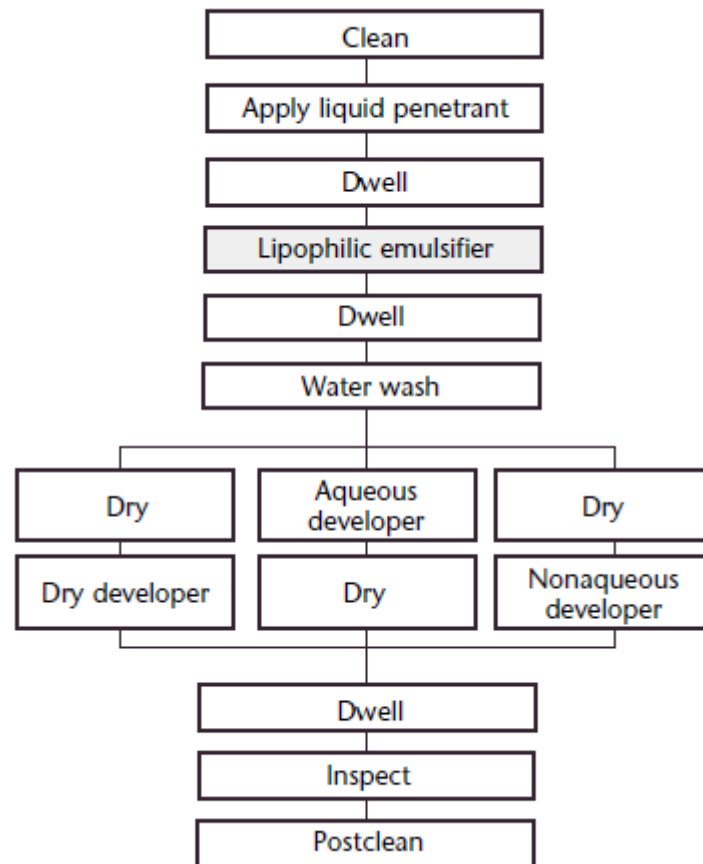


Figura 165. Proceso de líquidos penetrantes pos-emulsionables lipófilos

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.5.3 Líquidos Penetrantes Pos-Emulsionables Hidrófilos

La figura 167, muestra el diagrama de este proceso. Los pasos iniciales de pre limpieza, secado, aplicación del líquido penetrante, tiempo de fijación son los mismos que el procedimiento anterior. La diferencia es que después del tiempo de fijación del líquido penétrate, se debe realizar un pre lavado con agua, luego se podrá aplicar el emulsificador y se realizarán el resto de pasos.

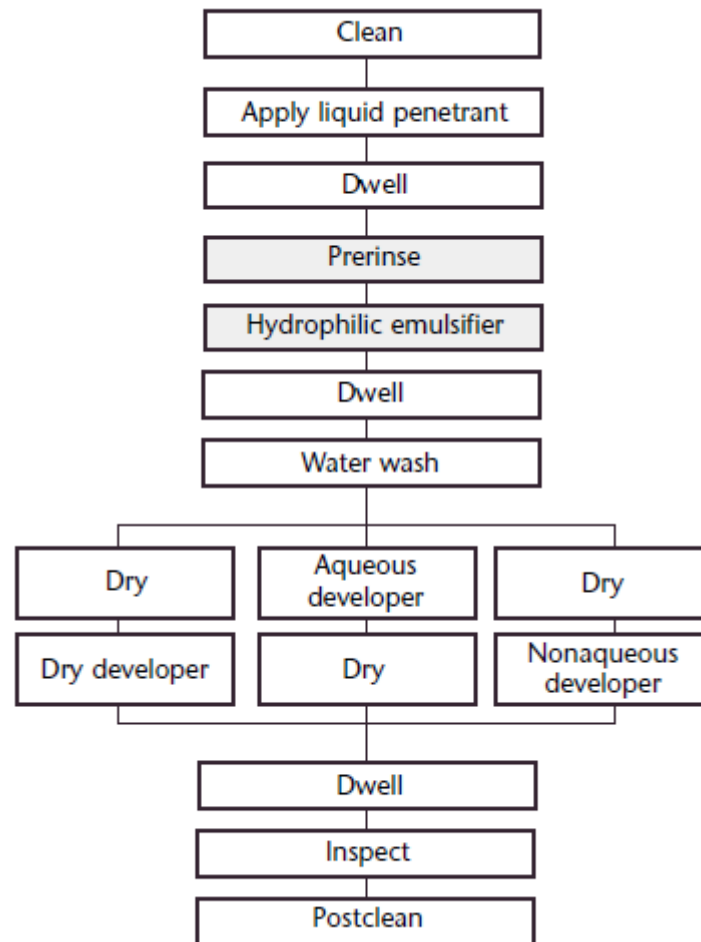


Figura 166. Proceso de líquidos penetrantes pos-emulsionables hidrófilos

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.5.4 Líquidos Penetrantes Removibles con Solventes

La figura 168, muestra el diagrama de este proceso. Normalmente los removedores son solventes a base de petróleo, pero también pueden ser cualquier combinación de solventes.

Como los removedores funcionan por la acción del solvente, su uso desmesurado puede ser un problema. Los siguientes pasos son recomendables para la etapa de limpieza del exceso de líquido penetrante:

1. Limpiar la superficie del objeto con un trapo seco, puede ser una franela ó papel absorbente.
2. Remover los restos de líquido penetrante utilizando la franela ó el papel empapado con solvente.

3. Limpiar nuevamente con un trapo seco ó papel absorbente para remover cualquier restante de solvente en la superficie.

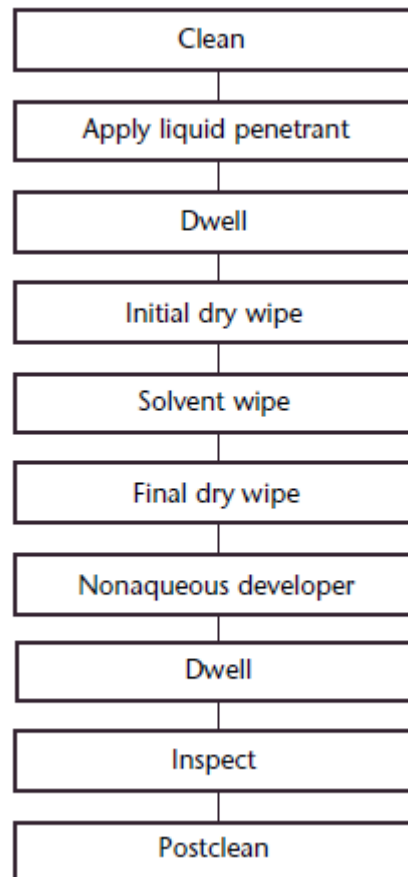


Figura 167. Proceso de líquidos penetrantes removibles con solvente

Fuente: (American Society for Nondestructive Testing, 2011)

5.6 Evaluación e Interpretación de Soldaduras Mediante Líquidos Penetrantes

5.6.1 Detección de Discontinuidades Típicas en los Depósitos de Soldadura Mediante Líquidos Penetrantes

5.6.1.1 Golpe de Arco

1.- Descripción.- Es un defecto superficial encontrado en material soldado ferroso y no ferroso. Se sitúa en la superficie del material base donde el soldador ha tocado momentáneamente el electrodo para iniciar el arco. Este defecto se puede prevenir usando una pieza de metal chatarra para iniciar el arco. Generalmente abarcan pequeñas fisuras y porosidades.

2.- Detección de con líquidos penetrantes.- Puede aparecer como una discontinuidad ancha ó redondeada.

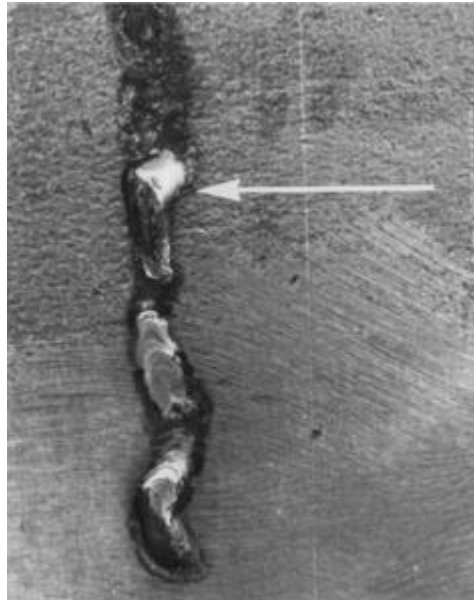


Figura 168. Indicación de golpe de arco

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

5.6.1.2 Fisura en la zona afectada por el calor

1.- Descripción.- Es un defecto superficial encontrado en material soldado ferroso y no ferroso. Este tipo de fisura a menudo es poco profunda y muy estrecha. Generalmente se ubica paralela a la soldadura.

2.- Detección de con líquidos penetrantes.- Aparece como una línea continua.

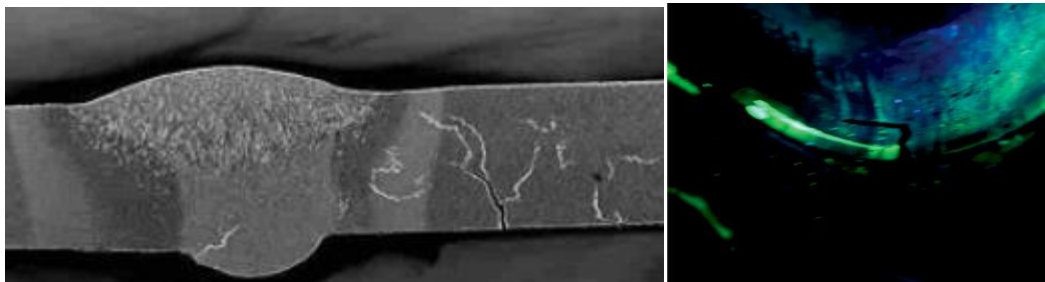


Figura 169. Fisuras en la zona afectada por el calor

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

5.6.1.3 Falta de penetración

Detección de con líquidos penetrantes.- Aparece como una indicación irregular de ancho variable.

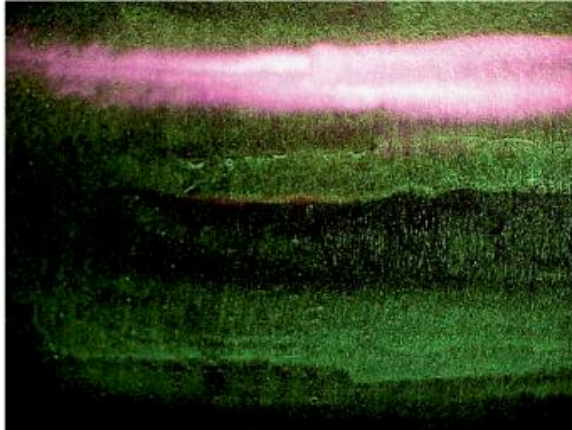


Figura 170. Indicación de falta de penetración producida por líquido penetrante fluorescente

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

5.6.1.4 Porosidades

Detección de con líquidos penetrantes.- Aparece como indicaciones redondeadas y irregulares de ancho variable.



Figura 171. Indicación de porosidades producidas por líquido penetrante fluorescente

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

5.6.1.5 Fisuras tipo estrella

Detección de con líquidos penetrantes.- Aparece como indicaciones ramificadas irregularmente.



Figura 172. Indicación de fisuras tipo estrella producidas por líquido penetrante fluorescente

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

5.6.1.6 Mordeduras

Detección de con líquidos penetrantes.- Indicación en forma de picadura ó linear, adyacente a la superficie ó al pie de la soldadura

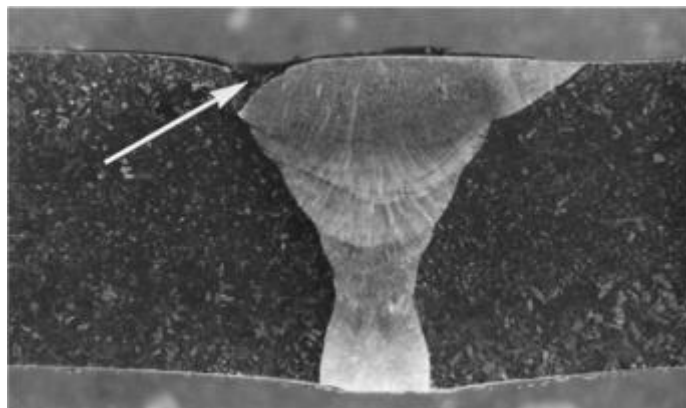


Figura 173. Mordedura en cordón de soldadura

Fuente: (The American Society for Nondestructive Testing, 2013)

5.6.2 Resumen de Criterios de Aceptación/Rechazo Aplicados en Facilidades Petroleras Ecuatorianas para Evaluar el Resultado de las Indicaciones Generadas por el Ensayo de Líquidos Penetrantes

En las tablas del Anexo 1, se presenta un resumen de los criterios de aceptación/ rechazo utilizados en facilidades petroleras ecuatorianas para evaluar e interpretar el resultado de las indicaciones generadas por el ensayo de gammagrafía. Como se indicó anteriormente, el uso de estas normas es en base a procedimientos internos de las empresas que realizan los trabajos de construcción dentro de facilidades petroleras, procedimientos

que son específicamente para uso interno y totalmente confidencial hacia el público en general.

Estas tablas fueron creadas en base a las siguientes normas:

- ✓ **API 1104 Revisión 2013**, para líneas y ductos fuera de las estaciones (inspección en juntas de producción y calificación de soldadores).
- ✓ **API 650 Revisión 2010**, ver: ASME Sección VIII División 1 UW-51(b).
- ✓ **ASME Sección VIII División 1 UW-51(b) Revisión 2007**
- ✓ **ASME B31.3 Revisión 2012**, tabla 341.3.2 (para inspección de juntas soldadas en estaciones, pozos y refinerías).
- ✓ **ASME IX Revisión 2010**, QW-91 Volumetric NDE

5.6.3 Fotos con Indicaciones de Referencia en Depósitos de Soldadura

Las fotos con indicaciones de referencia se encuentran dentro del Anexo 4, se entregan 8. Cada foto cuenta con una tabla descriptiva, en la cual se indican aspectos como:

- ✓ Material, espesor, diámetro;
- ✓ proceso de soldadura utilizado;
- ✓ norma que aplica;
- ✓ identificación de la indicación;
- ✓ aplicación del criterio de aceptación rechazo;
- ✓ aprobación ó rechazo de la junta soldada.

Estas fotos contienen indicaciones generadas por el ensayo de líquidos penetrantes y son copia de una foto original. Las fotos originales se las obtuvo realizando inspección a juntas soldadas para facilidades petroleras de la empresa PETROAMAZONAS EP, en la amazonia ecuatoriana, y no pueden ser presentadas como anexos ya que pertenecen estrictamente a PETROAMAZONAS EP.

Dentro del proceso para la obtención de estas fotos con indicaciones, se han aplicado los principios que rigen el ensayo de líquidos penetrantes, la selección de la norma de referencia y la aplicación de los criterios de aceptación/rechazo; todos estos temas fueron desarrollados a lo largo del capítulo.

Por motivos de confidencialidad requeridos por PETROAMAZONAS EP Y RADIN, no se describirá aspectos considerados confidenciales para la empresa, aspectos como:

- ✓ Identificación de la junta;
- ✓ lugar donde se encuentra la junta;
- ✓ nombre del proyecto al que pertenece la junta;

5.6.4 Reportes Generados para Constatar la Inspección

Es muy importante un medio físico por el cual se constate la aplicación del ensayo no destructivo. Generalmente se debe llevar un registro diario del trabajo realizado, en el cual consten aspectos como la detección de defectos u otras novedades que se hallaron al realizar la inspección mediante la aplicación del ensayo. Por este motivo la empresa que realiza las actividades de inspección debe tener formatos de reportes para cada técnica por separado. Un ejemplo del formato diario para el ensayo de líquidos penetrantes se encuentra en el Anexo 5.

3.6.5 Preguntas para Evaluación Teórica sobre PT

En el Anexo 6, se presenta una recopilación de 20 preguntas, las cuales fueron obtenidas de los libros de estudio para rendir las pruebas de ASNT nivel III.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En toda obra mecánica es muy importante la aplicación de ensayos no destructivos para controlar su calidad e integridad estructural. De este modo se logrará construir instalaciones con larga vida, más baratas y más confiables.
- Gracias a los ensayos no destructivos se puede prevenir muchos accidentes comunes en la industria petrolera. Al aplicar un ensayo no destructivo para inspeccionar soldaduras, el grado de confiabilidad de la obra aumenta. Ejemplos de estos accidentes son: derrames de petróleo, explosiones dentro de estaciones, incendios dentro de estaciones, fugas de gas, etc.
- Para la inspección de soldaduras mediante ensayos no destructivos, es imprescindible el uso de normas técnicas de referencia. Estas normas contienen los criterios de aceptación/rechazo, los cuales establecen si las soldaduras tienen ó no defectos. En caso de existir defectos, éstos deben repararse.
- El personal que aplica estos ensayos para inspeccionar soldaduras, necesita cumplir una etapa de entrenamiento, evaluación y certificación, para lo cual se requiere que éste tenga un entrenamiento teórico de los principios que rige el ensayo no destructivo que se encuentra empleando.
- El tema de ensayos no destructivos no se lo ha desarrollado en nuestro país por falta de conocimiento. No se lo ha incluido en el pensum de la mayoría de universidades, no es considerado como asignatura ó como tema de maestría.
- La calificación y certificación del personal que realiza inspecciones de soldaduras mediante ensayos no destructivos, debe ser realizada a

través de un inspector de control de calidad ASNT nivel III con número de registro vigente.

6.2 Recomendaciones

- Se debe implementar una asignatura referente a los NDT, que conste con una parte teórica y otra práctica. Esta materia podría ser dictada de manera presencial ó a semi presencia en la Carrera de Ingeniería Mecánica (ya que ésta se encuentra más relacionada con la construcción de obra mecánica dentro y fuera de facilidades petroleras).
- Es importante el conocimiento del idioma inglés, en el área técnica referente al tema. Esto se podría lograr si la Carrera de Ingeniería Mecánica implementara proyectos para desarrollar monografías acerca de vocabulario técnico en inglés referente a los ensayos no destructivos.
- Se debe motiva a los estudiantes y docentes a la investigación acerca de los ensayos no destructivos, como se lo hace a nivel internacional. Esta investigación es un tema muy importante porque el mundo de los NDT está constante desarrollo, en lo que respecta a nuevas tecnologías, técnicas y métodos. A nivel internacional muchas universidades se encuentran desarrollando e investigando éstos temas.

BIBLIOGRAFÍA

- American Petroleum Institute. (2005). *Soldadura de tuberías e instalaciones relacionadas*. Washington: American Petroleum Institute.
- American Petroleum Institute. (2007). *Welded Steel Tanks for Oil Storage*. Washington: American Petroleum Institute.
- American Society for Nondestructive Testing. (2011). *Liquid Penetrant Testing*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing.
- American Welding Society. (1977). *Guide for the Nondestructive Inspection of Welds, ANSI/AWS B1.0-77*. Miami, Florida, Estados Unidos: American Welding Society.
- B.Carry, H. (2004). *Manual de Soldadura Moderna*. Mexico: Prentice Hall.
- EASTMAN KODAK COMPANY. (1980). *Radiography in Modern Industry*. New York, Estados Unidos: EASTMAN KODAK COMPANY.
- GE-Energy. (s.f.). *Eddy Current Testing*. Obtenido de http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/inspection_technologies/eddy_current_testing.jsp
- Hellier, C. (2003). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Chicago: Mc Graw-Hill.
- Iowa State University. (2014). *Ultrasonic Inspection*. Obtenido de <http://www.iprt.iastate.edu/assistance/nde/tools/ultrasonic>
- ISO 9712:2012. (01 de 12 de 2014). Obtenido de http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=57037
- Jeffus, L. (2010). *Manual de Soldadura GTAW*. Madrid, España: Paraninfo.
- Karl Deutsch. (2014). *Penetrant Testing*. Obtenido de http://www.karldeutsch.de/KD_GENERAL_KnowledgeBase_PT_EN_M1.html
- Maquitodo. (22 de 07 de 2014). *Maquitodo*. Obtenido de <http://www.maquitodo.com.co/soldador-ac-225-glm-110-220v-lincon.html>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador. (29 de Mayo de 2014). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador*. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/subsecretaria-de-control-y-aplicaciones-nucleares/>
- NDT Resource Center. (10 de 2014). *Education Resources*. Obtenido de <https://www.nde-ed.org>

- OLYMPUS NDT. (2006). *Ultrasonic Transducers Technical Notes*. olympus.
- QSA Global. (2007). *Model 650L Source Changer*. Burlington: QSA Global.
- QSA GLOBAL. (2008). *Cobalt-60 Source Projector*. Burlington: QSA GLOBAL.
- QSA GLOBAL. (2009). *Product Catalog*. Burlington: QSA GLOBAL.
- QSA Global. (2011). *Sentinel 880 series source projector*. Burlington: QSA Global.
- Solar Atmospheres. (2014). *Liquid Penetrant Inspection*. Obtenido de <http://solaratm.com/vacuum-furnace-services/fluorescent-penetrant-inspection/>
- Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares del Ecuador. (2011). *Curso Básico de Protección Radiológica* (Tercera edición ed.). Quito, Pichincha, Ecuador: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador.
- The American Society for Nondestructive. (2011). *Ultrasonic Testing*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing.
- The American Society for Nondestructive Testing. (2004). *Working Safely in Radiography*. Columbus, Estados Unidos: The American Society for Nondestructive Testing.
- The American Society for Nondestructive Testing. (2008). *Radiographic Testing*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing.
- The American Society for Nondestructive Testing. (2013). *Relevant Discontinuities - Radiographic Testing*. Columbus: The American Society for Nondestructive Testing.
- The American Society for Nondestructive Testing. (2013). *Relevant Discontinuities - Ultrasonic Testing*. Columbus: The American Society for Nondestructive Testing.
- The American Society for Nondestructive Testing. (2014). *The American Society for Nondestructive Testing*. Obtenido de www.asnt.org
- The American Society for Testing and Materials. (1999). *Standard Practice for Design, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators used for Radiology* (Vol. Designation: ASTM 1025). Miami: The American Society for Testing and Materials.
- The American Society for Testing and Materials. (1999). *Standard Practice for Design, and Material Grouping Classification of Wire Image Quality Indicators used for Radiology*. Miami: The American Society for Testing and Materials.
- The American Society for Testing and Materials. (1999). *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*, (Vols. Designation: ASTM E 1316 – 99a). Miami, Florida, Estados Unidos: The American Society for Testing and Materials.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2007). *“ASME Boiler and Pressure Vessel Code” Section VIII div1*. New York: ASME.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2010). *“ASME Boiler and Pressure Vessel Code” Section IX*. New York: ASME.

The American Society of Mechanical Engineers. (2010). *Nondestructive Examination, Section V*. New York, Estados Unidos: ASME.

The American Society of Mechanical Engineers. (2010). *Pressure Piping- Section B31.3*. New York: ASME.

The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors. (2014). *Magnetic Particle Examination* . Obtenido de <http://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=164&ID=377>

U.S Department of Transportation. (2014). *Bridges&Structures*. Obtenido de <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/signinspection03.cfm>

Visual NDT inspection. (2012). *Visual NDT inspection*. Obtenido de <http://visualndtinspection.com/>

Wikipedia. (2014). *Acoustic Emission Testing*. Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_emission

Wikipedia. (2014). *Crookes Tube*. Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Crookes_tube

Wikipedia. (2014). *Leak Testing*. Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Leak#Leak_testing

Wikipedia. (2014). *Pechblenda*. Obtenido de <http://es.wikipedia.org/wiki/Pechblenda>

Wikipedia. (2014). *Radiographic Testing*. Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Radiographic_testing

Wikipedia. (21 de 07 de 2014). *Shielded metal arc welding*. Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Shielded_metal_arc_welding

wikipedia. (01 de 09 de 2014). *sound waves*. Obtenido de www.wikipedia.org

Wikipedia. (2014). *Thomas Edison*. Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Edison

Wikipedia. (2014). *Ultrasonic Testing*. Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_testing

Wikipedia. (2014). *Wilhelm Conrad Rontgen*.