



16
20/11/89

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"CUAUTITLAN"**

**INTRODUCCION AL EXAMEN DE MATERIALES
MEDIANTE "PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N :

FERNANDO SAUCEDO FLORES
JOSE FERNANDO GUTIERREZ VIEYRA

DIRECTOR DE TESIS:
ING. SAMUEL PEREZ DIAZ

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO

1989

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE GENERAL

Página

| | |
|---|----|
| INTRODUCCION | 1 |
| CAPITULO 1 | |
| 1. ETAPAS BASICAS DE LA INSPECCION | 2 |
| 1.1 Elección del método y técnicas operatorias idóneas..... | 3 |
| 1.2 Realización del ensayo y obtención de una indicación propia..... | 3 |
| 1.3 Interpretación de la indicación..... | 4 |
| 1.4 Evaluación de la indicación | 4 |
| 1.5 Definiciones..... | 5 |
| CAPITULO 2 | |
| 2. LIQUIDOS PENETRANTES..... | 6 |
| 2.1 Antecedentes | 7 |
| 2.2 Fundamentos del método | 7 |
| 2.3 Etapas básicas del ensayo..... | 8 |
| 2.4 Aplicaciones | 9 |
| 2.5 Ventajas | 9 |
| 2.6 Limitaciones del método..... | 10 |
| 2.7 Comparación con otros métodos..... | 10 |
| 2.8 Naturaleza y propiedades de los líquidos penetrantes..... | 13 |
| 2.9 Características físicas de los líquidos penetrantes..... | 13 |
| 2.10 Tipos de líquidos penetrantes..... | 14 |
| 2.11 Naturaleza y propiedades de los reveladores..... | 15 |
| 2.12 Propiedades de los reveladores..... | 16 |
| 2.13 Tipos de reveladores..... | 16 |
| 2.14 Tiempo de penetración, de eliminación y de revelado..... | 19 |
| 2.15 Fuentes de luz negra | 21 |
| 2.16 Interpretación de las indicaciones..... | 23 |
| 2.17 Aspecto de las indicaciones | 24 |
| 2.18 Registro de las indicaciones | 26 |
| 2.19 Indicaciones falsas | 27 |
| CAPITULO 3 | |
| 3. PARTICULAS MAGNETICAS..... | 32 |
| 3.1 Fundamentos del método | 33 |
| 3.2 Establecimiento de un campo magnético | 35 |
| 3.2.1 Campo magnético circular | 35 |
| 3.2.2 Campo magnético longitudinal | 40 |
| 3.2.3 Magnetización por cable | 43 |
| 3.2.4 Uso de puntas | 44 |
| 3.2.5 Uso del yugo | 44 |
| 3.3 Tipos de partículas magnéticas | 47 |
| 3.4 Elección del tipo de corriente de magnetización y sensibilidad.... | 51 |
| 3.4.1 Comparación de sensibilidad entre su aplicación por vía se- ca y vía húmeda..... | 51 |
| 3.5 Indicaciones por partículas magnéticas | 54 |
| 3.5.1 Indicaciones relevantes | 54 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.5.2 | Indicaciones no relevantes | 55 |
| 3.5.3 | Eliminación de indicaciones no relevantes..... | 59 |
| 3.5.4 | Indicaciones falsas | 59 |
| 3.6 | Desmagnetización | 61 |
| 3.6.1 | Sistemas de desmagnetización | 62 |
| 3.6.2 | Medida del campo magnético residual | 65 |
| 3.7 | Interpretación y registro de las indicaciones | 66 |
| 3.7.1 | Interpretación de las indicaciones..... | 66 |
| 3.7.2 | Registro de las indicaciones | 66 |

CAPITULO 4

| | | |
|---------|---|-----|
| 4. | ULTRASONIDOS | 68 |
| 4.1 | Antecedentes | 69 |
| 4.2 | Descripción del examen | 70 |
| 4.2.1 | Generación de ondas ultrasónicas | 71 |
| 4.2.2 | Efecto piezoelectrico | 71 |
| 4.2.3 | Palpadores | 73 |
| 4.3 | Transmisión de ondas : leyes fundamentales | 74 |
| 4.3.1 | Parámetros básicos | 74 |
| 4.3.2 | Tipos de ondas | 76 |
| 4.3.2.1 | Ondas longitudinales | 76 |
| 4.3.2.2 | Ondas transversales | 77 |
| 4.3.2.3 | Ondas superficiales | 77 |
| 4.3.2.4 | Ondas de Lamb | 77 |
| 4.3.3 | Velocidad de las ondas en sólidos | 77 |
| 4.3.4 | Impedancia acústica | 78 |
| 4.3.5 | Reflexión y refracción | 79 |
| 4.3.6 | Interferencia | 81 |
| 4.4 | Estudio comparativo con la radiografía y otras técnicas | 87 |
| 4.5 | Técnicas de examen | 90 |
| 4.5.1 | Métodos de reflexión y transmisión | 90 |
| 4.5.2 | Examen de materiales | 94 |
| 4.5.3 | Examen de soldaduras | 95 |
| 4.5.4 | Examen de soldadura de aceros inoxidables | 98 |
| 4.6 | Métodos e instrumentos | 100 |
| 4.6.1 | Palpadores | 100 |
| 4.6.2 | Tipos de palpadores | 101 |
| 4.6.2.1 | Palpadores normales..... | 101 |
| 4.6.2.2 | Palpadores angulares..... | 101 |
| 4.6.2.3 | Palpadores emisor-receptor independiente..... | 102 |
| 4.6.2.4 | Palpadores especiales | 103 |
| 4.6.3 | Características de los palpadores | 103 |
| 4.6.4 | Métodos de ensayo | 104 |
| 4.6.4.1 | Método por reflexión | 104 |
| 4.6.4.2 | Método por transmisión o transparencia | 106 |
| 4.6.4.3 | Método por resonancia | 107 |
| 4.6.5 | Ensayos por contacto y en inmersión | 107 |
| 4.6.6 | Ensayos manuales y automáticos | 109 |

| | |
|--|-----|
| 5. RADIOGRAFIA..... | 111 |
| 5.1 Principios fundamentales | 112 |
| 5.1.1 Partículas elementales | 112 |
| 5.1.2 Estructura de la materia | 112 |
| 5.1.3 Número atómico y número másico | 112 |
| 5.1.4 Isótopos | 113 |
| 5.1.5 Radiación electromagnética | 113 |
| 5.1.6 Rayos X y rayos Gamma | 114 |
| 5.1.7 Unidades de radiación | 115 |
| 5.2 Generalidades | 116 |
| 5.3 Usos de la radiografía | 117 |
| 5.4 Aplicación | 118 |
| 5.5 Limitaciones | 119 |
| 5.6 Principios de radiografía | 120 |
| 5.7 Radiación | 121 |
| 5.7.1 Penetración de la radiación y absorción diferencial | 121 |
| 5.7.2 Fuentes de radiación | 121 |
| 5.7.3 Intensidad de la radiación | 123 |
| 5.8 Fuentes radiactivas | 124 |
| 5.8.1 Rayos gamma | 124 |
| 5.8.2 Características de los isótopos radiactivos | 124 |
| 5.8.3 Ventajas e inconvenientes de los isótopos en radiografía | 125 |
| 5.8.4 Equipo de gammagrafía | 126 |
| 5.9 Imágenes radiográficas | 129 |
| 5.9.1 Factores geométricos | 129 |
| 5.9.2 Distorsión de la imagen | 130 |
| 5.9.3 Sombra proyectada y penumbra | 131 |
| 5.9.4 Penumbra geométrica | 132 |
| 5.9.5 Penumbra de proceso | 134 |
| 5.9.6 Penumbra inherente | 134 |
| 5.9.7 Relación entre penumbras | 134 |
| 5.9.8 Ley del inverso de los cuadrados | 135 |
| 5.9.9 Radiación difusa | 136 |
| 5.10 Película radiográfica | 138 |
| 5.10.1 Términos radiográficos | 138 |
| 5.10.2 Tipos de película | 139 |
| 5.11 Procesado de las películas | 140 |
| 5.11.1 Cámara oscura | 140 |
| 5.11.2 Revelado..... | 140 |
| 5.11.3 Aclarado o baño de parada | 141 |
| 5.11.4 Fijado | 141 |
| 5.11.5 Lavado | 142 |
| 5.11.6 Secado | 142 |
| 5.11.7 Resultados defectuosos y sus posibles causas | 142 |
| 5.12 Cálculo y control de la exposición | 144 |
| 5.12.1 Variables que intervienen en la exposición | 144 |
| 5.12.2 Cálculo del tiempo de exposición | 147 |
| 5.12.3 Gráficas para el cálculo del tiempo de exposición | 148 |
| 5.13 Calidad radiográfica | 152 |
| 5.13.1 Calidad y sensibilidad radiográfica | 152 |
| 5.13.2 Indicadores de calidad de imagen | 152 |

| | Página |
|---|--------|
| 5.13.3 Tipos de indicadores de calidad de imagen | 153 |
| 5.14 Técnicas radiográficas | 159 |
| 5.14.1 Técnica radiográfica | 159 |
| 5.14.2 Radiografía de piezas que presentan grandes diferencias de espesor | 160 |
| 5.14.3 Inspección radiográfica de uniones soldadas | 160 |
| 5.14.4 Soldaduras a tope planas | 163 |
| 5.14.5 Soldaduras en ángulo | 163 |
| 5.14.6 Radiografías de fundición y forja | 164 |
| CAPITULO 6 | |
| 6. CONCLUSIONES | 165 |
| BIBLIOGRAFIA | 167 |

INTRODUCCION

Con el enorme avance que se ha dado en la ciencia y la tecnología a lo largo de los últimos cuarenta años, surgió la necesidad de crear sistemas de supervisión y control de materiales cada vez más complejos. La taréa primordial de estos sistemas se reduce a aspectos muy importantes tales como reducción de gastos, seguridad y prevención de fallas.

La aplicación de los ensayos o pruebas no destructivas (P.N.D.) es hoy día indispensable en gran número de campos como el control de materias primas y de procesos, la medicina, la aviación, la industria militar y en general toda la industria, maquinaria o aparato en general que sufra desgaste o fatiga de algún tipo, siempre y cuando, esto implique un peligro o gasto considerable en caso de falla.

Los métodos de pruebas no destructivas han pasado de ser una simple curiosidad de laboratorio, a ser una herramienta indispensable en la industria, siendo el medio primordial para determinar el nivel de la calidad alcanzado en sus productos; ya que estos métodos permiten la inspección del 100% de la producción y la obtención de datos de todo el volumen de un producto o pieza contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme en el producto y la producción.

Como su nombre lo indica las P.N.D. son exámenes o ensayos que nos permiten estudiar un material, sin maltratarlo, ni destruirlo por lo cual lo podemos emplear posteriormente.

Actualmente las técnicas de mayor aplicación son: radiografía, ultrasonido, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, los cuales se describirán en el presente trabajo, otra técnica importante e íntimamente ligada a cada una de las anteriores es el examen visual.

Por otra parte, las P.N.D. aplicadas en las operaciones de mantenimiento y de vigilancia de los sistemas y/o componentes a lo largo del servicio u operación, contribuyen a asegurar su calidad funcional y colaboran a prevenir accidentes. Este es el caso de su empleo en centrales termoeléctricas, nucleoelectricas, hidroeléctricas, etc.

CAPITULO 1

ETAPAS BASICAS DE LA INSPECCION

1. ETAPAS BASICAS DE LA INSPECCION.

Para tener éxito en la aplicación de un ensayo o prueba no destructivos es necesario cumplir fundamentalmente con:

- que la inspección pueda realizarse al ritmo de producción.
- que teniendo en cuenta los factores económicos, el examen sea programado bajo el criterio de rendimiento y beneficio económico máximos.

Las etapas básicas de la inspección mediante P.N.D. se pueden resumir en las cuatro siguientes:

- 1.- Elección del método y técnicas operatorias idóneas.
- 2.- Realización del ensayo y obtención de una indicación propia.
- 3.- Interpretación de la indicación.
- 4.- Evaluación de la indicación.

1.1. ELECCION DEL METODO Y TECNICAS OPERATIVAS IDONEAS.

En la elección racional del método y técnicas operatorias adecuados de inspección, hay que tener presente la naturaleza del material, su estado estructura, es decir, procesos de elaboración a que ha sido sometido, el tamaño y forma del producto, así como tener conocimiento del tipo de heterogeneidades que se pretenden detectar o de la característica del material a determinar o de la dimensión a medir; ya que todos los métodos presentan limitaciones de interpretación, limitaciones debidas a la geometría y a la naturaleza del material, así como limitaciones en el campo de observación y en la velocidad de aplicación que permite la prueba.

Por otra parte, cada método posee una sensibilidad limitada, la cual podrá ser adecuada para el examen de un tipo de material con una condición de empleo o de servicio teniendo en cuenta que el aumento de sensibilidad trae consigo, entre otros inconvenientes, el aumento en el costo de la prueba, es preciso, para especificar los límites de sensibilidad y tolerancias requeridos en el ensayo, que previamente esté claramente definido el nivel de calidad o nivel de aceptación requerido en el producto.

1.2. REALIZACION DEL ENSAYO Y OBTENCION DE UNA INDICACION PROPIA.

En la detección de heterogeneidades mediante P.N.D., las limitaciones en la obtención de una indicación propia vienen supeditadas a su naturaleza (discontinuidades e impurezas), a su morfología (esférica o puntual, cilíndrica y plana o laminar), a su situación (superficial, subsuperficial e interna), a su orientación y a su tamaño. Así por ejemplo, para la obtención de una indicación propia de una grieta (discontinuidad laminar o plana), las circunstancias óptimas se presentarán cuando sea paralela al haz de radiación X o gamma, perpendicular al haz de ondas ultrasónicas, perpendicular a las líneas de campo magnético y a la superficie de observación y próxima a ella, en el examen de partículas magnéticas o que aflore a la superficie, en el caso del examen por líquidos penetrantes.

Entonces para producir una indicación propia de por ejemplo una heterogeneidad presente en el material, es preciso tener conocimiento sobre las características de las probables heterogeneidades que se pueden presentar y sobre los tipos de heterogeneidades que se pueden detectar mediante las diferentes técnicas operativas que permita cada método.

1.3. INTERPRETACION DE LA INDICACION.

Producida la indicación es preciso interpretarla. La interpretación consiste en hallar la correlación entre la indicación observada - con por ejemplo, la propia naturaleza del material, morfología, situación, orientación y tamaño de la discontinuidad; es decir, la interpretación es el dictamen sobre qué es lo que da motivo a una indicación.

La interpretación, es de gran importancia en el método de inspección y su responsabilidad recae de lleno en el operador experto en los métodos de P.N.D.

1.4. EVALUACION DE LA INDICACION.

Finalmente, después de obtenida e interpretada una indicación, debe evaluarse. La evaluación consiste en hallar la correlación entre la

heterogeneidad detectada con su efecto posterior en las propiedades requeridas de dicho material; esto es, la decisión sobre cuando una heterogeneidad o característica del material afecta a su empleo.

Dicha evaluación se apoya en criterios de aceptación o rechazo establecidos por normas o códigos internacionales como las normas: AISI, ASME, API, ASIM, etc.

1.5. DEFINICIONES.

Para evitar confusión, a continuación se definen algunos términos que serán utilizados frecuentemente en el presente trabajo.

INDICACION.- Toda P.N.D. nos va a dar una señal o resultado del examen; por ejemplo manchas, sombras, ecos, etc., o sea que es la manifestación de una heterogeneidad o discontinuidad.

DISCONTINUIDAD.- Se tiene una discontinuidad cuando el material examinado no es homogéneo, ya sea superficialmente o internamente. Lo cual quiere decir que cuando hablamos de una discontinuidad se está refiriendo a una heterogeneidad.

DEFECTO.- Se aplica este concepto una vez que hemos calificado una discontinuidad para ver si está dentro o fuera de ciertas normas establecidas.

CAPITULO 2
LIQUIDOS PENETRANTES

2. LIQUIDOS PENETRANTES

2.1. ANTECEDENTES

El antecedente más próximo del método actual de examen por líquidos penetrantes, era el procedimiento utilizado hace más de 60 años en algunos talleres que empleaban un aceite mineral disuelto en Keroseno por la superficie de las piezas.

Al cabo de varias horas, se limpiaba la superficie de la pieza y una vez seca se cubría con una lechada de cal. La pieza se golpeaba o se vibraba para ayudar a salir al líquido de las grietas, con lo que se obtenía una mancha oscura sobre el fondo blanco como indicación de la discontinuidad. Este método conocido entonces en el taller como método del petróleo y la cal, permitía detectar grietas grandes, pero resultaba inadecuado para pequeñas discontinuidades y sobre todo, carecía de uniformidad en los resultados.

La utilización de los líquidos penetrantes para detectar defectos superficiales en materiales fue el evento más importante en la industria, cuando en 1942 se presnetó por primera vez un sistema de inspección por líquidos penetrantes fluorescentes. Varios años antes de la segunda guerra mundial se estaba incrementando el uso de materiales no magnéticos, tales como el aluminio, magnesio y algunos aceros inoxidable, etc., y por lo tanto, se necesitaba de un método rápido, barato y confiable para detectar defectos en tales materiales, lo cual no se obtenía con la radiografía, ya que este método podía detectar defectos internos, pero difícilmente detectaría defectos superficiales y pequeños y con el ensayo de partículas magnéticas se limitaba únicamente a los materiales ferromagnéticos, de ahí la importancia de los líquidos penetrantes.

2.2. FUNDAMENTO DEL METODO

El método de líquidos penetrantes sirve para detectar discontinuidades que afloran a la superficie de materiales sólidos no porosos. Se utiliza un líquido que al aplicarlo sobre la superficie de la pieza a

examinar, penetra por capilaridad en las discontinuidades, tales como fisuras, grietas, poros, etc. Posteriormente y una vez eliminado el exceso de líquido de la superficie, el líquido penetrante que es absorbido por la discontinuidad indica la presencia y localización de tal discontinuidad.

2.3. ETAPAS BÁSICAS DEL ENSAYO

La inspección mediante líquidos penetrantes requiere esencialmente de cinco etapas que son:

- a) Limpieza y preparación previas de la superficie: Como etapa preliminar, la superficie de la muestra debe estar limpia y seca y las posibles discontinuidades deben estar libres de agua, aceite o cualquier otro agente contaminante.
- b) Penetración: Consiste en aplicar el líquido sobre la superficie de la muestra de manera que pueda alcanzar y entrar en la discontinuidad. Esto se hace por inmersión en un baño o extendiendo el líquido con una brocha o por rociado (spray). Esta operación debe durar un cierto tiempo, de manera que se permita penetrar completamente al líquido en las discontinuidades que pudieran existir.
- c) Eliminación del exceso del líquido penetrante: Tiene por objeto dejar libre la superficie del material, del líquido que no ha penetrado en las discontinuidades, de manera que en la observación final haya suficiente contraste de las posibles indicaciones sobre el fondo limpio. La eliminación se lleva a cabo de diversas formas según el carácter del líquido penetrante, pudiendo utilizarse agua o disolventes especiales. Si se utiliza agua como agente de limpieza, es preciso añadir una operación de secado de la superficie, que de lo contrario no permitiría la adecuada aplicación posterior del revelador.

Es importante también, señalar que, cuando se trabaja con penetrantes fluorescentes, conviene realizar esta etapa bajo luz negra para asegurarse de que no quedan restos de él que pudieran originar falsas indicaciones.
- d) Revelado: El revelador actúa como extracto del penetrante, acelerando su tendencia natural a salir de la discontinuidad y a extenderse ligeramente por los alrededores de los bordes de la misma. -

El revelador es un polvo muy fino, normalmente blanco o débilmente coloreado, que se aplica directamente en seco o bien por vía húmeda como suspensión en un líquido volátil.

- e) Observación: Una vez transcurrido un tiempo prudente desde la -- aplicación del revelador, el operador puede proceder a examinar la muestra ensayada para buscar las posibles indicaciones producidas. Esto se hace bajo luz natural si se trata de penetrantes coloreados o bajo la luz negra, en el caso de que se hayan empleado penetrantes fluorescentes.

Las cinco etapas se muestran gráficamente en la Fig. 1.1

2.4. APLICACIONES

La más amplia utilización de los líquidos penetrantes es en el campo de los materiales no magnéticos tales como aluminio, magnesio, acero inoxidable, cobres, bronce, latones y otras aleaciones y metales. También se aplica a la inspección de cerámicas vitrificadas, vidrio y plásticos de todos los tipos, para lo que se han desarrollado y puesto a punto penetrantes especiales. Sin embargo, no da resultados con materiales porosos.

2.5. VENTAJAS.

Posiblemente la ventaja más importante de los líquidos penetrantes es que es un método muy sencillo. Además este método no tiene limitaciones en cuanto a tamaño y forma, ni sobre la composición del material a inspeccionar, siempre y cuando la superficie de éste sea de una naturaleza no porosa.

Otra ventaja muy importante de este método es su adaptabilidad para inspeccionar piezas pequeñas (en producción).

El ensayo de partículas magnéticas requiere dos o más inspecciones (a 90°), para asegurar que se ha cubierto totalmente la zona inspeccionada, mientras que los líquidos penetrantes pueden detectar los defectos en una sola operación, cualquiera que sea la orientación de éstos.

Además de las ventajas técnicas ya mencionadas, este método es re-

lativamente barato y rápido y presenta muy pocos problemas a la hora de efectuar la evaluación.

Finalmente, se puede decir que los operadores no encuentran grandes dificultades en la aplicación del método, claro está que (como en cualquier inspección) los operadores deben tener buena vista, ser inteligentes y honestos y, sobre todo, realizar su trabajo meticulosamente.

2.6. LIMITACIONES DEL METODO

Este método sólo puede detectar defectos que estén abiertos a la superficie donde se aplica el penetrante. Este debe entrar en los defectos, para que posteriormente pueda dar indicaciones, lo que quiere decir que la superficie donde se encuentran los posibles defectos debe estar totalmente limpia, para que el líquido pueda penetrar en éstos. Si los defectos se encuentran llenos de óxido, aceite, grasa o agua, será muy difícil (casi imposible) la penetración del líquido.

Además, la superficie del material debe ser impermeable al penetrante. Si la superficie es porosa, el exceso de penetrante no se podrá eliminar totalmente y cuando se aplique el revelador no habrá suficiente contraste entre la indicación de un posible defecto y el resto de la superficie inspeccionada. Esta limitación excluye del método todos los materiales de superficies porosas. También se excluyen todos aquellos materiales que se ablanden o disuelvan cuando entren en contacto con el penetrante.

Existen circunstancias donde la temperatura de la pieza a inspeccionar puede influir en la fiabilidad de la inspección, bien sea porque la pieza esté muy caliente o muy fría.

Un factor muy importante a tener en cuenta es la limpieza de los penetrantes del material inspeccionado, ya que si en una mala limpieza se dejan restos de penetrante, éste puede perjudicar al material.

2.7. COMPARACION CON OTROS METODOS

Los líquidos penetrantes son mucho más fiables que la radiografía para detectar defectos superficiales.

En casi todos los casos, los líquidos penetrantes son más fiables y superiores a los ultrasonidos, para detectar defectos superficiales.

Los líquidos penetrantes son más confiables que las corrientes inducidas y no están limitados por la geometría de la pieza, como éstas.

Contrariamente a los otros métodos mencionados los líquidos penetrantes no pueden detectar defectos internos.

Debido a que los líquidos penetrantes superan a los otros métodos en la detección de grietas finas, cortas y poco profundas, en las superficies de las piezas, este método es el más fiable para la detección de grietas de fatiga en materiales no magnéticos. El método de partículas magnéticas es igual en este aspecto, sobre materiales magnéticos y es más fiable en la detección de grietas llenas de sustancias extrañas, ta les como óxido, aceite, agua, etc.

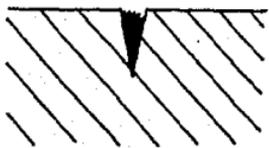
FIGURA 1.1
ETAPAS BASICAS DEL METODO DE LIQUIDOS PENETRANTES



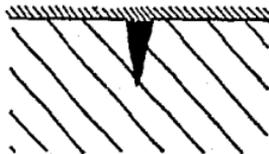
1) Limpieza de la pieza



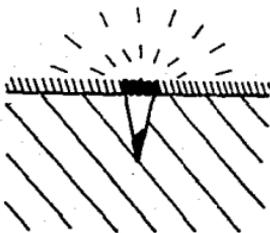
2) Aplicación del penetrante



3) Eliminación del penetrante



4) Aplicación del revelador



5) Inspección

2.8. NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LOS LIQUIDOS

Si bien la característica clave de los líquidos penetrantes es precisamente el poder penetrar en el interior de las discontinuidades, no basta este solo requisito para examinar un producto, sino que es necesario que reúna otras propiedades, tales como estabilidad frente a las temperaturas altas y bajas, no tóxico, etc. Así, por ejemplo, un penetrante ideal debería reunir las siguientes características:

- ser capaz de penetrar fácilmente en discontinuidades muy finas,
- no evaporarse o secarse demasiado rápidamente,
- poder limpiar con facilidad la superficie sobre la que se ha aplicado,
- que la operación de limpieza no elimine también el líquido retenido en las discontinuidades,
- emerger rápidamente cuando se aplica el revelador,
- tener un color o fluorescencia que contraste bien con el fondo,
- conservar la fluorescencia o el color aún después de cierto tiempo,
- ser químicamente inerte respecto al material sometido a ensayo,
- no tener olor intenso o desagradable,
- no ser infalible,
- ser estable en las condiciones de uso o almacenamiento,
- no ser tóxico,
- ser económico

Evidentemente, el conjunto de todas estas propiedades no se pueden reunir empleando una sustancia única, por lo que los líquidos penetrantes comerciales son mezcla de muy diversas sustancias que se aproximan más o menos a las propiedades mencionadas anteriormente.

2.9. CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS LIQUIDOS PENETRANTES

- Viscosidad.- Es la resistencia a fluir o ser desplazado que muestra un fluido (líquido o gas). En los líquidos penetrantes se pretende tener una viscosidad media ya que influye, tanto en la rapidez de penetración como en la capacidad de permanecer en aberturas relativamente grandes.
- Tensión superficial.- es la resistencia de un líquido a ser corta-

do o penetrado.

- Poder humectante.- es la capacidad de mojar o humedecer la superficie por donde hace contacto el líquido. Tanto esta propiedad como la tensión superficial son de gran importancia ya que si la tensión superficial es baja y el poder humectante es alto se tiene una capacidad de penetración óptima.

El poder humectante se mide por el ángulo de contacto entre la gota líquida y la superficie del material y cuanto menor es este ángulo mayor es el poder humectante.

Los buenos líquidos penetrantes se caracterizan más por un ángulo de contacto muy pequeño que por el valor de su tensión superficial.

- Volatilidad.- capacidad de una sustancia para evaporarse; se desea que nuestro líquido penetrante no sea muy volátil para que no seque rápidamente.
- Inercia química.- no debe reaccionar el penetrante con el material y no puede ser corrosivo.
- Solubilidad.- debe ser soluble el líquido penetrante para poder - eliminarlo fácilmente de la superficie examinada con la ayuda de disolventes.

2.10. TIPOS DE LIQUIDOS PENETRANTES

Se agrupan principalmente en dos familias, los penetrantes fluorescentes y los penetrantes coloreados.

1.- Penetrantes fluorescentes.- Son los que incorporan en su composición un pigmento fluorescente claramente visible en cámara oscura - bajo iluminación con la luz negra adecuada.

2.- Penetrantes fluorescentes autoemulsionables.- Son los que se eliminan directamente con agua debido a que incorporan en su composición productos emulsificadores. Son de uso muy cómodo y están bastante extendidos, a pesar de su menor sensibilidad y los riesgos de manipulación.

3.- Penetrantes fluorescentes postemulsionables.- Este tipo de penetrantes se desarrolló con el fin de conseguir un mayor nivel de sensibilidad en la detección de pequeñas discontinuidades. No llevan emulsificante incorporado y necesitan una etapa intermedia entre la penetra-

ción y el lavado con agua. El emulsificante se aplica en esta etapa y se consigue así eliminar al penetrante. En algunos casos, se recomienda un arrastre previo del líquido penetrante con agua, con el fin de no agotar demasiado pronto el emulsificador.

4.- Penetrantes fluorescentes en medio acuoso.- Se utilizan en algunas aplicaciones especiales donde es necesario evitar cualquier riesgo de incendio. Tienen propiedades de brillo y sensibilidad comparables con los penetrantes de base hidrocarbonada.

5.- Penetrantes coloreados.- Consisten en disoluciones de pigmentos fuertemente coloreados en disolventes apropiados. El color más utilizado es el rojo y la tendencia más generalizada es hacia los disolventes orgánicos no inflamables (hidrocarburos halogenados). Tienen la ventaja de que no se necesita una fuente luminosa especial para su observación, por lo que son ampliamente utilizados en inspecciones a pie de obra. Asimismo, se suelen utilizar eliminadores especiales que hacen innecesaria el agua de lavado.

2.11. NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LOS REVELADORES.

El revelador es el agente que pone de manifiesto los lugares donde ha tenido lugar una retención de líquido penetrante. Actúa de varias formas, que tienden a aumentar la visibilidad. Es un polvo muy fino que se extiende sobre la superficie a examinar después de haber eliminado el exceso de líquido penetrante. Las funciones del revelador son las siguientes:

- actúa como un papel secante, ya que extrae el líquido de la discontinuidad,
- proporciona una base sobre la que el penetrante puede extenderse, aumentando así la superficie visible,
- constituye un fondo adecuado que aumenta el contraste con respecto al que se conseguiría sobre la superficie de la muestra, cubriendo, además, posibles irregularidades que podrían originar confusión.
- los reveladores aplicados por vía húmeda (dispersos en un disolvente) tiene la ventaja adicional de que el disolvente contribuye a aumentar la cantidad de penetrante extraída,

- acorta el tiempo necesario para que la indicación resulte visible al inspector.

2.12. PROPIEDADES DE LOS REVELADORES

Para cumplir de la forma más perfecta posible la función encomendada, el revelador debe reunir, en mayor o menor grado, las siguientes características:

- debe ser absorbente para asegurarse un máximo en el poder "secante",
- debe estar finamente dividido para conseguir una buena definición - del contorno de las discontinuidades,
- debe tener el suficiente poder cubriente para enmascarar los colores de fondo de la muestra que pudieran interferir,
- debe ser fácilmente aplicable dando una capa continua de espesor uniforme,
- debe ser fácilmente eliminable después de la inspección y no debe contener productos nocivos o tóxicos para el operador.

2.13. TIPOS DE REVELADORES

Hay cuatro tipos de reveladores:

- polvo seco,
- suspensiones de polvo en agua,
- disoluciones acuosas,
- suspensiones de polvo en disolventes.

Los más utilizados son el revelador en polvo seco o bien suspensiones de polvo en medios líquidos, como el agua o el alcohol etílico.

Reveladores en forma de polvo seco.- El yeso o talco finamente pulverizado se utilizaron al principio con excelentes resultados. Aún - ahora se emplean frecuentemente, si bien se han descubierto sustancias tales como los polvos de sílice amorfo, que son más ligeros y proporcionan mejores resultados en muchos casos.

Idealmente deben ser ligeros y esponjosos y deben adherirse fácilmente a las superficies metálicas formando una capa continua. Sin embargo, esta tendencia a pegarse a la superficie no debe dar lugar a la -

formación de capas muy gruesas, ya que enmascararían las tenues indicaciones obtenidas en discontinuidades muy pequeñas. También es importante que el revelador no tenga tendencia a flotar en el aire formando nubes de polvo, pero esto se contrapone con otras propiedades fundamentales, lo que hace inevitable la contaminación de la zona de trabajo. Este aspecto debe tenerse muy en cuenta a la hora de pensar en la seguridad del personal. Es interesante, también, desde el punto de vista de almacenamiento y manejo, que no sean higroscópicos, con el fin de que no se aglomeren.

Aplicación de los reveladores secos.- Se puede hacer inmersión de las piezas en el depósito que contiene el polvo, ya que hay reveladores de este tipo tan ligeros y esponjosos que se comportan prácticamente como un líquido.

Si el revelador es más compacto, puede extenderse sobre la superficie con ayuda de un pulverizador, una brocha muy suave o simplemente espolvoreándolo con la mano, cuidando de eliminar los excesos sacudiendo o golpeando la pieza.

También se emplean pistolas aerográficas de baja presión, pero el riesgo de contaminar el ambiente es mayor en este caso si se hace en depósitos abiertos.

Existen también cámaras automáticas cerradas que dan óptimos resultados sin la contrapartida de formación de nubes de polvo.

Además de la contaminación del ambiente por el revelador, reviste también importancia el problema inverso. En efecto, las gotas de penetrante que puedan alcanzar el revelador, pueden dar lugar a falsas indicaciones cuando se utiliza dicho revelador. Por esta causa se recomienda examinar periódicamente el revelador bajo luz negra (en el caso de trabajar con penetrantes fluorescentes) para descubrir esta posible contaminación y, en caso de resultados positivos, rechazar el revelador. También el agua, como ya hemos apuntado anteriormente, puede interferir la acción del revelador formando grupos que impedirán una correcta aplicación del mismo. Las briznas de tejido deben eliminarse por tamizado, ya que, si se impregnan de penetrante, pueden llegar a confundirse con grietas.

Reveladores húmedos.- Presentan la ventaja de no dar lugar a la formación de nubes de polvo y son de fácil aplicación cubriendo con facilidad superficies difícilmente accesibles al polvo seco. Pero se reconoce que, en general, son ligeramente menos sensibles que el polvo seco y, como dificultad adicional, existe el problema de mantener la estabilidad de la suspensión.

El problema de la sensibilidad se agudiza si se aplican capas de revelador excesivamente gruesas, por lo que es de primordial importancia mantener a un nivel adecuado la concentración del baño.

El uso de los reveladores húmedos también está limitado por la temperatura que, si es alta, puede dar lugar a aumentos de concentración por excesiva evaporación, y por otra parte se inutiliza el revelador si la temperatura cae por debajo del punto de congelación. Esto último influye más en los que utilizan agua como agente dispersante, si bien los aditivos disueltos (inhibidores, estabilizadores, etc.) bajan el punto de congelación, de manera que aún puede trabajarse en condiciones que rara vez se dan en la práctica.

Otro inconveniente es que se necesita un cierto tiempo para que se evapore el agua de la capa de revelador, puesto que, mientras esto no ocurra, no actuará como tal lo que en definitiva redundará en una mayor duración del ensayo. Este problema es menos acusado cuando como agente dispersante se emplea el alcohol etílico.

El problema de la eliminación del revelador después de la inspección parece que es más difícil en el caso de los reveladores húmedos, siendo necesario utilizar chorros de agua a presión sobre todo en superficies de cierta rugosidad.

Aplicación de los reveladores húmedos.- Su ventaja más importante es la facilidad con que se aplican, compensando así las dificultades adicionales que se encuentran.

Se aplican por inmersión, rociado con pistola o spray o con brocha y se presentan muy bien a automatizar la instalación. Sin embargo, necesitan de un sistema especial de bombeo que mantenga el baño en constante agitación, para evitar la sedimentación de sólidos.

2.14. TIEMPO DE PENETRACION, DE ELIMINACION Y DE REVELADO

Tiempo de penetración.- En todos los procesos, sea cual sea el líquido empleado, el tiempo necesario para una correcta penetración depende del tipo de material, y más aún del tipo de discontinuidad y de la temperatura de la pieza y del líquido.

A título indicativo, se da en la Tabla 1 una serie de tiempos de penetración en función del tipo de penetrante y del tipo de discontinuidad.

Estos tipos de penetración se entienden con la pieza y el líquido a temperatura ambiente, recurriéndose a veces a calentar las piezas a 60-80°C para acelerar el proceso por aumento de la movilidad de las moléculas del líquido en contacto con la pieza y por efecto de la dilatación de las discontinuidades. Sin embargo, éste es una práctica que no está muy extendida, ya que se invierte un cierto tiempo en calentar las piezas (función del tamaño y de la eficacia del sistema calefactor) y además se gasta una energía que encarece el proceso.

Tiempo de eliminación.- Es evidentemente que sólo se toma en cuenta en los penetrantes postemulsificables, variando mucho según que el estado de la superficie sea liso o rugoso.

No puede darse una norma general, ya que, en principio, el tiempo depende de la composición del eliminador y del penetrante, siendo por tanto un dato a suministrar por el fabricante de los productos. En caso de no disponer de este dato, sólo la experiencia podrá arrojar luz que permita determinar el tiempo óptimo que, además, será variable según el tipo de discontinuidades que se presenten o se busquen. Así, para discontinuidades poco profundas o muy abiertas, será necesario ir a tiempos de emulsificación cortos para no arrastrar en el lavado el penetrante de estas zonas defectuosas.

En general, los tiempos de emulsificación varían entre 10 segundos, o incluso menos, hasta 5 minutos, pero sólo se puede hacer una mayor aproximación a la vista del problema concreto y de los medios disponibles.

Tiempo de revelado.- Dadas las buenas características que presentan

TABLA I
 TIEMPOS DE PENETRACION
 (Líquido penetrante coloreado)

| Naturaleza del Material | ESTADO o PROCESO | TIPO DE DISCONTINUIDAD | TIEMPO DE PENETRACION EN MINUTOS Penetrante coloreado postemulsionable |
|---|-------------------|--|--|
| Aluminio | Moldeado | Porosidad | 3-5 |
| | | Fragilidad en frío | 3-5 |
| | Forjado | Pliegues | 8-10 |
| | Soldadura | Falta de fusión | 3-5 |
| | Todos los estados | Porosidad | 3-5 |
| Grietas | | 8-10 | |
| Magnesio | Moldeado | Porosidad | 3-5 |
| | | Fragilidad en frío | 3-5 |
| | Forjado | Pliegues | 8-10 |
| | Soldadura | Falta de fusión | 8-10 |
| | Todos los estados | Porosidad | 8-10 |
| Grietas | | 8-10 | |
| Acero | Moldeado | Porosidad | 8-10 |
| | | Fragilidad en frío | 8-10 |
| | Forjado | Pliegues | 8-10 |
| | Soldadura | Falta de fusión | 18-20 |
| | Todos los estados | Porosidad | 18-20 |
| Grietas | | 18-20 | |
| Bronces Latones | Moldeado | Porosidad | 3-5 |
| | | Fragilidad en frío | 3-5 |
| | Forjado | Pliegues | 8-10 |
| | Soldadura | Falta de fusión | 8-10 |
| | Todos los estados | Porosidad | 8-10 |
| Grietas | | 8-10 | |
| Plásticos | Todos los estados | Grietas | 3-5 |
| Vidrios | Todos los estados | Grietas | 3-5 |
| Herramientas de corte | | Falta de fusión | 3-5 |
| | | Porosidad | 3-5 |
| | | Grietas | 18-20 |
| Titanio y aleaciones resistentes a la temperatura | Todos los estados | Cualquiera | 18-20 |
| Metales en general | Todos los estados | Corrosión bajo tensiones o intergranular | 230 |

la mayoría de los reveladores comerciales, el tiempo de revelado suele ser corto (del orden de 30 segundos a 1 minuto), sobre todo cuando se trata de reveladores aplicados en forma de polvo seco o en suspensión en líquidos volátiles (alcohol etílico), aunque en este último caso influyen en cierta medida las condiciones atmosféricas del ambiente. En el caso de reveladores dispersos en agua, el tiempo puede alargarse - tanto más cuanto más próximo a saturación se halle el ambiente.

En el caso particular de ensayos de fugas en los que se aplica - el revelador por un lado y el penetrante por otro, el tiempo se alarga en función del tamaño de las discontinuidades que atraviesan el espe- sor del material. Así, para grietas muy finas o similares, serán necesarias varias horas.

2.15. FUENTES DE LUZ NEGRA

Los materiales fluorescentes empleados en el ensayo por líquidos pe- netrantes suelen responder bien a la energía radiante cuya longitud de onda sea del orden de 3650 A, que viene a ser el límite inferior de vi- sibilidad de la zona del violeta. Sin embargo, no se considera como ge- nuinamente ultravioleta debido a su falta de actividad bioquímica, de ahí su elección para evitar posibles daños fisiológicos al operador.

Hay cuatro fuentes posibles de luz negra:

- Lámparas incandescentes
- lámparas de arco metálico o de carbón,
- tubos fluorescentes,
- lámparas de arco en vapor de mercurio

Los dos primeros tipos se utilizan poco debido a la baja intensi- dad y a su inestabilidad, por lo que para efectos prácticos, sólo se utilizan los dos últimos tipos, estando reservadas las grandes intensida- des de luz a las lámparas de arco en vapor de mercurio, siendo ampliamente utilizadas en grandes instalaciones de inspección. Sin embargo, se debe destacar la comodidad del uso de las lámparas tubulares fluorescentes, sobre todo cuando se trata de equipos portátiles. En efecto, su cebado es instantáneo, mientras que las de arco en vapor de mercurio --

tardan 5-6 minutos desde que se conectan a la red hasta que proporcionan la intensidad luminosa de régimen. Por otra parte son ligeras y no requieren transformadores o reactancias que contribuyen a aumentar el peso, siendo además, fácilmente adaptables a sistemas de lentes que permiten observar a 3 o 4 aumentos indicaciones que a simple vista pudieran parecer dudosas.

Tanto las lámparas tubulares como las de arco en vapor de mercurio, producen toda una gama de longitudes de onda, gran parte en el espectro visible, por lo que se recurre a filtrar mediante un cristal rojo púrpura (vidrio Kopp 41), que absorbe la casi totalidad de la radiación visible y permite el paso de las radiaciones de longitud de onda entre 3200 y 4000 Å (con un máximo a 3650 Å) que es la zona del aspecto aprovechable a los efectos de la inspección por líquidos penetrantes fluorescentes.

Efectos fisiológicos de la luz negra.- Parece demostrado de manera concluyente que las radiaciones utilizadas en la inspección por líquidos penetrantes fluorescentes no causan ningún daño permanente en las personas expuestas a ellas.

Las longitudes de onda de alrededor de 3650 Å están lejos de la zona del espectro con actividad fisiológica, ya que los efectos tales como daños al ojo, quemaduras cutáneas o destrucción de tejidos, sólo se ponen en evidencia cuando la longitud de onda se reduce a las proximidades de los 3200 Å, siendo muy pequeña la intensidad de las lámparas usuales en esta zona del espectro.

La intolerancia que muchas personas sienten hacia la incidencia directa de la luz negra en los ojos, se debe a que algunas de las sustancias contenidas en el globo ocular fluorescen bajo la acción de la luz, con lo cual, el individuo siente una extraña sensación, como de nublado que le impide una correcta visión y le molesta enormemente, impdiéndole realizar en absoluto el trabajo de inspección. Sin embargo, esto no pasa de ser una incomodidad que no tiene más efecto fisiológico, pero que conviene tener en cuenta a la hora de proyectar instalaciones en las que se fija la situación de las fuentes de luz negra.

2.16. INTERPRETACION DE LAS INDICACIONES

Mecanismo de formación de las indicaciones.- Cualquier indicación de líquido penetrante es consecuencia de una discontinuidad que aflora a la superficie del objeto y señala fielmente su situación. Por lo tanto debe existir una abertura. Así, cualquier discontinuidad pasará desapercibida en un ensayo por líquidos penetrantes a menos que aflore a la superficie. Como contrapartida, los líquidos penetrantes operan igualmente - bien en cualquier material no poroso. Incluso en materiales ferromagnéticos, que son inspeccionados normalmente por partículas magnéticas, se aplican, a veces, los líquidos penetrantes para detectar grietas en casos tales como tornillos o piezas con entallas agudas en donde se puedan formar indicaciones falsas por partículas magnéticas.

Un caso particular en el examen por líquidos penetrantes es la detección de fugas en tuvos, bridas, soldaduras y otros elementos de recipientes a presión donde la estanquidad es problema fundamental. En estos casos, el líquido penetrante se aplica por uno de los lados y el revelador por el otro, y la aparición de indicaciones pone en evidencia - discontinuidades que atraviesan el material, demostrando, sin lugar a dudas que el recipiente no podrá ser empleado sin reparaciones en trabajos a presión.

Factores a tener en cuenta en la interpretación.- A la vista de una indicación se plantean inmediatamente tres interrogantes:
 ¿qué tipo de discontinuidad ha dado origen a la indicación?
 ¿cuál es su extensión o tamaño?
 ¿qué efecto tendrá en el comportamiento de la pieza?

De la correcta contestación a estas tres cuestiones depende la - aceptación o el rechazo de la pieza que, según se dijo, es la última etapa básica de la inspección. Las dos primeras cuestiones suponen la interpretación propiamente dicha y la última entra en el terreno de la evaluación.

Por la naturaleza del ensayo por líquidos penetrantes, no puede extraerse de sus resultados una información rigurosamente cuantitativa -- acerca del tipo y tamaño de las discontinuidades; pero esos resultados, junto con la experiencia del operador, pueden ayudar a resolver de mane-

no totalmente satisfactoria el problema de la interpretación.

En este caso, como en todos los problemas de inspección de productos metálicos, la formación metalúrgica del operario y sus conocimientos sobre procesos y tratamientos son de primordial importancia a la hora de interpretar los resultados del ensayo. Asimismo, será muy conveniente disponer en cada caso particular del historial metalúrgico de la pieza en cuestión, con datos sobre su naturaleza, condición y estado de tratamiento, así como esfuerzos a que haya estado sometida y condiciones ambientales de trabajo si éste es el caso.

2.17. ASPECTO DE LAS INDICACIONES

a) Indicaciones lineales continuas:

Son las indicaciones típicas procedentes de grietas (tales como grietas de fatiga, grietas de contracción en piezas moldeadas o en uniones soldadas, grietas de temple, grietas de corrosión bajo tensiones, etc.), cierres fríos en piezas moldeadas, pliegues de forja, faltas de pegado en uniones soldadas, etcétera. Naturalmente, pueden presentar ramificaciones.

b) Indicaciones lineales intermitentes:

Suelen presentarse en pliegues de forma parcialmente soldados, en faltas de pegado en uniones soldadas.

Algunos tipos de grietas, tales como las de contracción y las de corrosión bajo tensiones, suelen también dar origen a indicaciones de este tipo.

c) Indicaciones redondeadas:

Suelen aparecer en productos moldeados como consecuencia de rechupes o sopladuras intrínsecas o menos grandes que afloran a la superficie a través de pequeñas aberturas. El ensayo por líquidos penetrantes puede sustituir ventajosamente el ensayo radiográfico. También pueden dar origen a este tipo de indicaciones los cráteres profundos que se forman en los extremos de algunas uniones soldadas.

d) Indicaciones puntiformes agrupadas o dispersas:

Suelen corresponder a porosidad del material o, también a zonas con microrrechupes o pequeñas cavidades de construcción en piezas moldeadas. Si en estos productos estas indicaciones aparecen homogéneamente distribuidas y puestas de manifiesto especialmente en las zonas mecanizadas, ello revela generalmente un estado de porosidad interna en todo el material. En este orden de ideas, se puede llegar a establecer, en muchos casos prácticos, una correlación entre las indicaciones del ensayo por líquido penetrante y las de la imagen radiográfica, en cuyo caso, el ensayo por líquidos penetrantes puede también llegar a sustituir ventajosamente al ensayo radiográfico. Las indicaciones de microrrechupes suelen ser del tipo dispersas, y se presentan, preferentemente, en zonas de acuerdos o en cambios de sección de la pieza moldeada.

e) Indicaciones difusas:

Se presentan como un fondo casi continuo y homogéneo que, bajo la lupa, puede aparecer como formado por muchas indicaciones puntiformes muy próximas. Pueden corresponder a microporosidad difusa o a microrrechupes y, en zonas anodizadas en las aleaciones ligeras, a falta de un proceso correcto de sellado de este recubrimiento protector. No obstante, es aconsejable cerciorarse previamente, de que las indicaciones no son consecuencia del estado de rugosidad superficial, en cuyo caso las indicaciones observadas bajo la lupa no son realmente puntiformes, sino más bien difusas, no apreciándose en el centro de los puntos zonas de más alta intensidad de fluorescencia o color. En caso de duda, conviene limpiar de nuevo la pieza, cuidadosamente, y volver a aplicar el revelador.

f) Aspecto de los bordes de la indicación:

Quando la definición de los bordes de la indicación es muy nítida, puede asegurarse, en general, que corresponde a una discontinuidad estrecha que retiene poco volumen de líquido penetrante. Tal es el caso de grietas de fatiga pequeñas y muy cerradas. No obstante, en esta interpretación, se tendrá presente que las propiedades del revelador son decisivas en la definición de una indicación.

Otros elementos de juicio para interpretar una indicación:

a) Brillo y extensión de la indicación:

La intensidad de la fluorescencia o del color de una indicación es tán en relación directa con el volumen de la discontinuidad. Lo mismo puede decirse de la extensión de la indicación.

El ojo humano es capaz de distinguir diferencias de brillo o color del orden del 10%, lo que no es excesivo, pero sí suficiente en muchos casos.

b) Tiempo necesario para que aparezca la indicación:

Es inversamente proporcional al volumen de la discontinuidad. Así las discontinuidades grandes aparecen rápidamente, mientras que habrá que dejar actuar el revelador un cierto tiempo para que vayan apareciendo las más pequeñas. En este caso también influyen muchas condiciones ajenas a la discontinuidad en sí, tales como características del proceso, temperatura, etc.

c) Persistencia de la indicación:

Es un buen indicio para estimar el tamaño de una discontinuidad. - Si la indicación reaparece después de eliminar el revelador y volver a aplicarlo, es evidente que existía una reserva de líquido penetrante. - La intensidad y extensión de esta nueva indicación pueden dar la medida del volumen de la discontinuidad.

2.18. REGISTRO DE LAS INDICACIONES.

El procedimiento idóneo es la fotografía en blanco y negro o en color. Las indicaciones de líquido penetrante coloreado no presentan ninguna dificultad, pero cuando se trabaja con líquidos penetrantes fluorescentes es necesario tomar ciertas precauciones para conseguir fotos en las que se distinga claramente la indicación. Así, por ejemplo, se ná necesario colocar en el objetivo un filtro ligeramente amarillo que absorba la radiación ultravioleta y sólo deje pasar la radiación visible; de lo contrario no se conseguirá suficiente contraste entre la indicación y el fondo. Por otra parte, la baja luminosidad del sistema obligará a exposiciones largas, aunque se utilicen películas rápidas. - En general, no pueden darse normas estrictas sobre las condiciones para obtener fotografías adecuadas, siendo necesario en cada caso particular realizar las oportunas pruebas. A veces, para conseguir que aparez

ca el contorno de la pieza, se recurre a superponer una exposición corta con luz blanca.

En las páginas 29,30 y 31 se muestra el aspecto que presentan algunas discontinuidades mediante su registro por medio de la fotografía.

2.19. INDICACIONES FALSAS

Son aquellas indicaciones que no responden a discontinuidades reales de la pieza. La aparición puede estar originada por tres causas diferentes:

- lavado defectuoso de las piezas,
- manipulación poco cuidadosa,
- geometría y construcción de la pieza.

Lavado defectuoso:

Es la causa más frecuente de que aparezcan indicaciones falsas. Si en la operación de lavado no se elimina totalmente el penetrante que moja la superficie de la pieza, al realizar el examen se harán visibles estas zonas, pudiendo dar origen a confusiones, interpretándolas como discontinuidades reales. Sin embargo, es poco probable que esto le ocurra a un observador experimentado.

Para evitar esto, lo mejor es realizar el lavado bajo luz negra o bien examinar la pieza antes de aplicar el revelador.

Manipulación poco cuidadosa:

Puede dar origen a indicaciones falsas el manipular las piezas con las manos o útiles contaminados con líquidos penetrantes, por lo que se recomienda una extremada limpieza, sobre todo entre las operaciones de lavado y revelado.

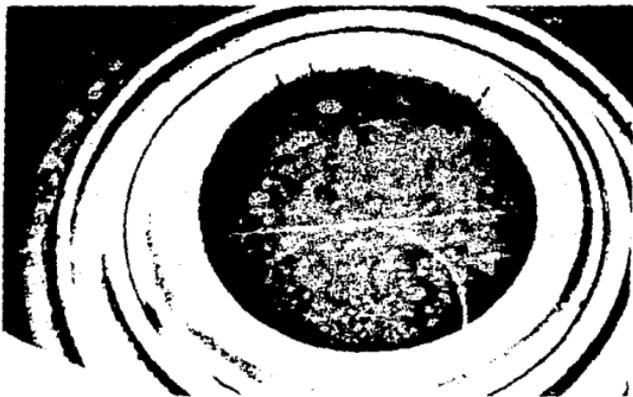
También es causa de indicaciones falsas el trabajar con reveladores contaminados por gotas de líquido penetrante. Esto puede originar indicaciones difíciles de identificar como falsas, por lo que es muy conveniente el examen periódico del revelador bajo luz negra para cerciorarse de su limpieza. La presencia de briznas de tejido o papel en el revelador, puede dar lugar a indicaciones similares a grietas si llegan a impregnarse de líquido penetrante.

Geometría y construcción de la pieza:

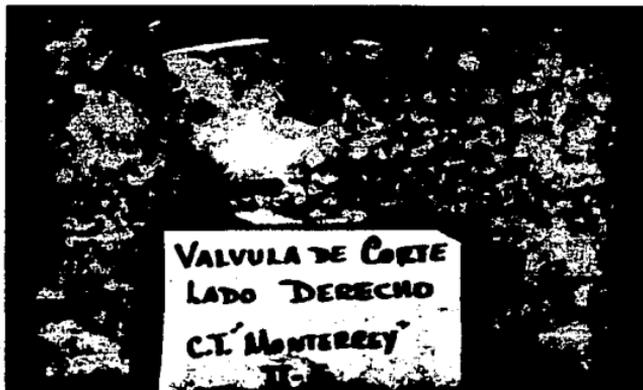
Esto es raru vez motivo de confusión para el observador que debe conocer perfectamente como está realizada la pieza. Las indicaciones de este tipo se producen en zonas ajustadas o piezas montadas a presión (álabes de turbina, por ejemplo) y tienen una forma muy regular y geométrica, por lo que no suelen causar problemas. Sin embargo el líquido emanado de estas zonas puede enmascarar discontinuidades próximas.



EN LA FOTOGRAFIA SE OBSERVAN INDICACIONES DE LIQUIDO PENETRANTE DEL TIPO GRIETA Y/O FISURA SOBRE UNA SECCION DE LOS ALABES PIJOS DE UN TURBOCOMPRESOR.



FOTOGRAFIA DE LA ZONA DE SELLO DE UNA VALVULA, LA CUAL PRESENTA INDICACIONES LINEALES, OBTENIDAS MEDIANTE - TECNICA DE LIQUIDOS PENETRANTES.



EN AMBAS FOTOGRAFÍAS SE MUESTRAN INDICACIONES DE LIQUIDO FENETRANTE, PROVENIENTES DE GRIETAS Y/C FISURAS EN CORDONES DE SOLDADURA.





EN LA FOTOGRAFIA SE OBSERVAN INDICACIONES, TANTO LINEALES COMO REDONDEADAS LAS CUALES PROVIENEN PROBABLEMENTE DE FISURAS Y POROSIDADES RESPECTIVAMENTE EN EL CUERPO DE ESTA TUERCA INSPECCIONADA.

CAPITULO 3
PARTICULAS MAGNETICAS

3. PARTICULAS MAGNETICAS

3.1 FUNDAMENTOS DEL METODO

El ensayo por partículas magnéticas permite detectar discontinuidades e impurezas superficiales, tales como fisuras, inclusiones no metálicas, esto en materiales ferromagnéticos; también es posible con ciertas limitaciones la detección de discontinuidades e inclusiones no metálicas, que se encuentran ligeramente por debajo de la superficie del material.

El fenómeno físico en el que se basa esta prueba es el siguiente:-- supongamos que una pieza de acero al carbono, tal como se presenta en la figura 3.1(a), la cual se somete a la acción de un campo magnético cuyas líneas de flujo o de fuerza están orientadas según indica la flecha. Si existe una discontinuidad en la superficie del material cuyo plano sea perpendicular a las líneas de flujo (ver fig. 3.1 (b)), las líneas de flujo tenderán a evitarla como un obstáculo ya que en general, tendrá una permeabilidad magnética menor que el acero. Esto se traduce en una distorsión de las líneas de flujo tal como se indica en la fig. 3.1(b), en la que vemos como las líneas que están más próximas a la superficie se ven obligadas a salir al exterior formando lo que llamaremos fugas de campo o de flujo magnético. Si ahora esparcimos sobre la superficie de la pieza partículas finas de un material ferromagnético, tenderán a acumularse en las fugas de campo (ver fig. 3.1(c)). Esto resulta siempre y cuando la falla no sea paralela a las líneas de flujo del campo magnético. Ver fig. 3.1(d).

El ensayo consta básicamente de tres etapas:

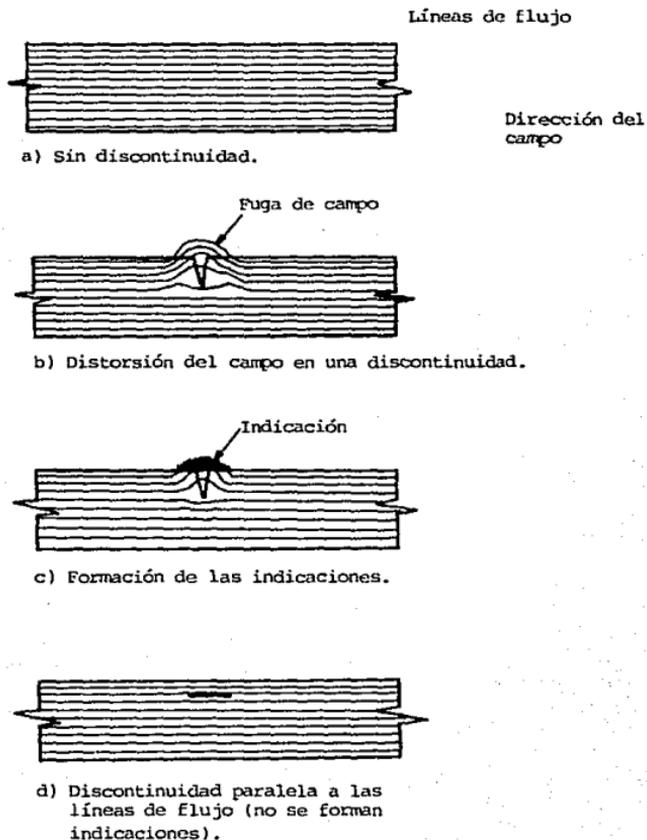
- 1.- magnetización de la pieza,
- 2.- aplicación de las partículas magnéticas,
- 3.- observación y anotación de la presencia de indicaciones.

Entre los factores que afectan a la formación de las indicaciones - cabe destacar:

- dirección e intensidad del campo magnético,
- forma y tamaño de la discontinuidad y orientación de la misma respecto a las líneas de flujo del campo magnético,
- características de las partículas magnéticas y modo de aplicarlas,
- características magnéticas de la pieza a examinar,

- forma y dimensiones de la pieza, que afectaran a la distribución del campo magnético,
- estado de la superficie de la pieza, que afectara a la nitidez de las indicaciones.

Figura 3.1



3.2 ESTABLECIMIENTO DE UN CAMPO MAGNETICO

Un campo magnético se establece al circular una corriente eléctrica a través de cualquier material conductor de electricidad. Las líneas de fuerza magnéticas o flujo forman siempre ángulos rectos, con respecto a la dirección del flujo de la corriente eléctrica. Considere un alambre de cobre o aluminio a través del cual fluye corriente eléctrica, en este caso se creara un campo magnético alrededor de él tal como se muestra en la figura 3.2

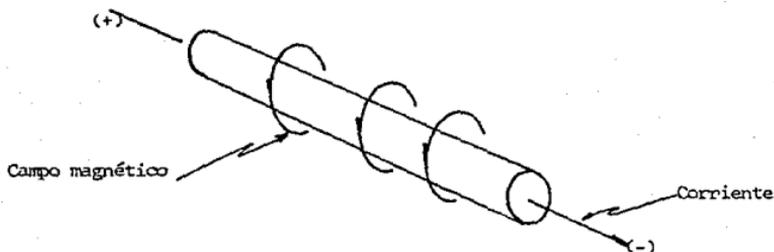


Figura 3.2

La figura muestra que las líneas de fuerza o flujo rotan en sentido contrario a las manecillas del reloj alrededor del alambre.

La manera más sencilla para determinar la dirección de las líneas de fuerza, sabiendo el sentido del flujo de corriente, es la regla de la mano derecha. Dicha regla nos dice que si se empuña con la mano derecha una barra y el dedo pulgar está apuntando en la dirección del flujo de la corriente eléctrica, los dedos restantes están indicando la dirección en la que fluyen las líneas de fuerza.

3.2.1 Campo magnético circular.

La magnetización circular utiliza los principios del establecimiento de un campo magnético, como el observado anteriormente. Debido a que el cobre y el aluminio son materiales no magnéticos, las líneas de fuerza no permanecerán en el material. En su lugar, el campo magnético se -

establece alrededor del material, ver fig. 3.3

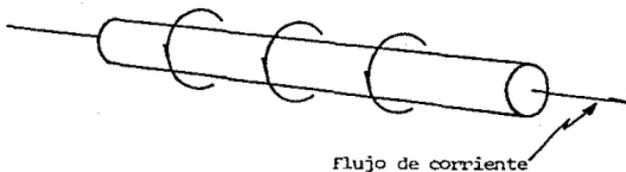


Figura 3.3

Quando fluye una corriente eléctrica a través de un material ferro magnético, el campo magnético se establece dentro del material. Las líneas de fuerza permanecen dentro de él porque es permeable y conduce fácilmente las líneas de fuerza. También en este caso el campo magnético se encuentra a 90° con respecto a la dirección del flujo de corriente.

Como puede verse, la regla de la mano derecha funciona idénticamente para materiales magnéticos y no magnéticos. La única diferencia entre los dos, es que el campo magnético se forma alrededor del material no magnético, mientras que en el material magnético el campo generado permanece en el interior del material.

Si consideramos una barra de acero cuadrada, cuando circula una corriente eléctrica a través de ella se establecerá un campo magnético circular dentro de ésta, tal y como se muestra en la fig. 3.4

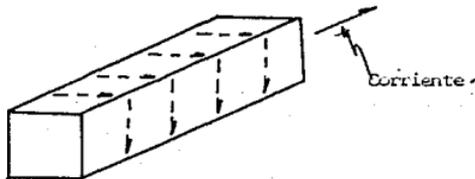
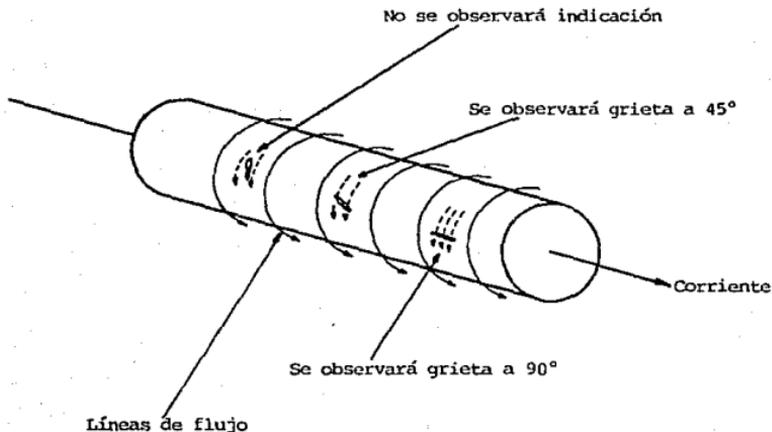


Figura 3.4

Si la barra cuadrada tuviese una grieta en la superficie a 90° con respecto a la dirección de las líneas de flujo, dentro de la barra las partículas serán atraídas hacia el defecto. La grieta en la barra ha creado un polo norte y un polo sur; algunas de las líneas de flujo han sido forzadas hacia la superficie, creando fugas de campo, estas atraen a las partículas magnéticas.

La magnetización circular detectará discontinuidades que estén entre 45° y 90° con respecto a las líneas de fuerza. Ver figura 3.5



CAMPO MAGNETICO CIRCULAR

Figura 3.5

Las grietas que se presentan paralelas a las líneas de fuerza (tal y como se muestra en la figura anterior) no se detectarán, aunque el área de la grieta rompa las líneas de fuerza, pues no causará fugas de flujo. Las líneas de fuerza tienden a permanecer dentro del material y se abren paso alrededor de la grieta.

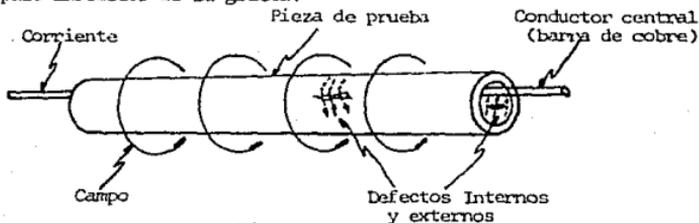


Figura 3.6

En la práctica la magnetización circular se realiza en dos formas.

La primera es pasando una corriente eléctrica a través de un conductor central, como se indica en la figura 3.6 y la segunda es pasando una corriente eléctrica a través de la barra misma, como se indica a continuación. (Ver fig.3.7)

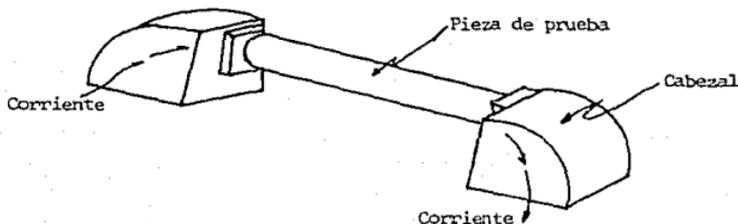


Figura 3.7

Magnetización entre cabezales

Cuando una barra es magnetizada entre cabezales, el campo magnético es más fuerte cerca de la superficie de la barra, este se incrementa desde cero en el centro de la barra hacia un máximo en la superficie. La distribución del campo magnético dentro de una barra de acero que se esta magnetizando entre cabezales, se ilustra graficamente en la figura 3.8

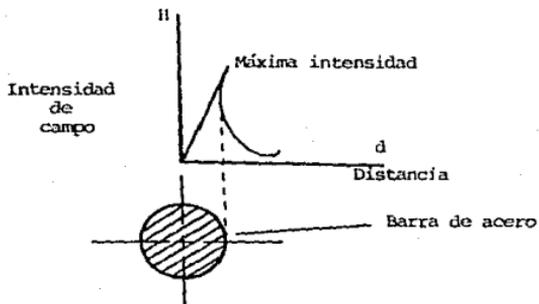


Figura 3.8

De la grafica se puede observar que la intensidad del campo es cero en el centro de la barra. La densidad del flujo se incrementa -- gradualmente, hasta que alcanza la máxima intensidad en la superficie de la barra. También se puede ver que, inmediatamente fuera de la superficie de la barra la densidad de flujo decrece rápidamente. La mayor parte de esta pérdida es inmediata y el remanente es imperceptible.

Cuando se magnetiza entre cabezales, una barra hueca de acero, también se encontrará la mayor densidad de flujo cerca de la superficie externa de la pieza, tal y como se muestra en la fig. 3.9 .Como regla general, se puede decir que la magnetización circular entre cabezales ocasiona que la densidad de flujo sea mayor en la superficie de la pieza.

Si se amplía la idea de magnetización circular, la técnica más adecuada para magnetizar una pieza cilíndrica hueca que presente discontinuidades en su superficie interna, es la de pasar corriente continua a través de un conductor concéntrico en el interior de la pieza tal y como se ve en la figura 3.10.

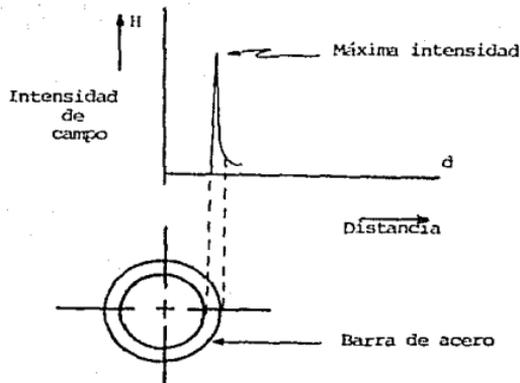


Figura 3.9

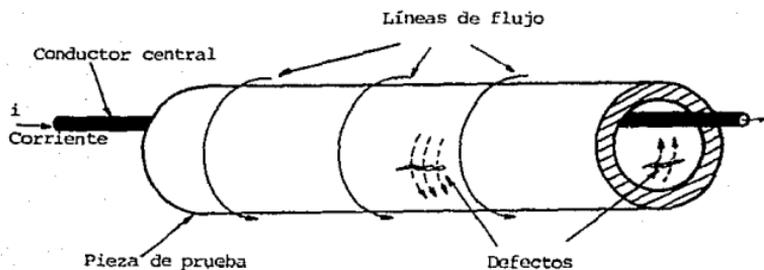


Figura 3.10
Magnetización mediante conductor central

El campo magnético alrededor del conductor central a su vez crea o induce un campo magnético circular dentro de la pieza. Debido a que la densidad de flujo es máxima en la superficie del conductor central, el campo inducido en la pieza será el máximo. Utilizando este método se establecerá el flujo magnético en las superficies interna y externa de la pieza. La densidad de flujo será mayor en la superficie interna y, dependiendo del espesor de la pared, algo menor en la superficie externa.

3.2.2 Campo magnético longitudinal.

En un campo magnético longitudinal la pieza se magnetiza en su longitud. El imán de barra es un ejemplo de este tipo de campo, ver fig.3.11

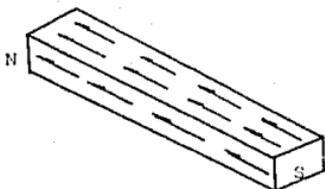


Figura 3.11

Las líneas de flujo magnético rotan a través de la barra, de sur a norte. Cualquier defecto que forme un ángulo comprendido entre 45° y 90° , con respecto a las líneas de flujo, provocará fugas de flujo y dichas fugas son las que atraen las partículas magnéticas.

La magnetización longitudinal también se basa en el principio de que la corriente eléctrica que pasa a través de un conductor de cobre forma un campo magnético alrededor de él.

Quando se fabrica una bobina con el conductor de cobre, las líneas de flujo alrededor de cada vuelta del enbobinado se combinan con aquellas de las otras vueltas del mismo. Esto incrementa la densidad de flujo y da una fuerza total, en una dirección longitudinal, lo cual se muestra en la fig. 3.12

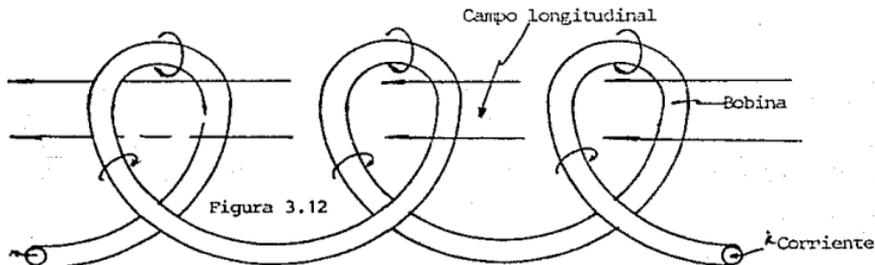


Figura 3.12

La densidad de flujo o intensidad del campo magnético es mayor en la superficie del conductor de cobre, por lo que, la densidad de flujo del campo magnético longitudinal total será mayor en la superficie interna de la bobina.

Si se coloca una pieza en el interior de una bobina, a través de -

la cual está pasando corriente eléctrica se establece un campo magnético longitudinal, en la pieza (ver la figura 3.13)

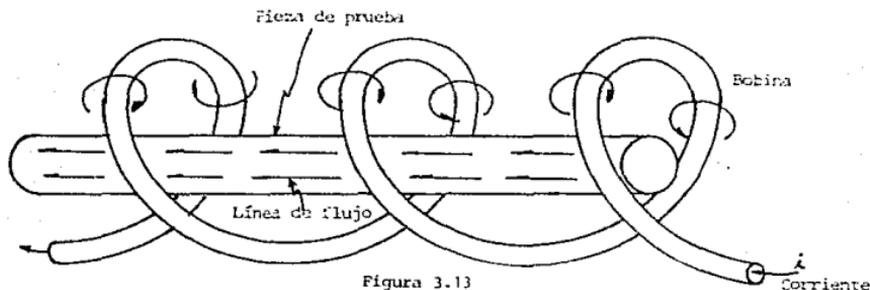


Figura 3.13

El campo magnético longitudinal provocará fugas de flujo en los defectos que formen ángulos de 45° a 90° , con respecto a las líneas de flujo.

En la práctica, se utiliza un embobinado similar al que se que se uso en el ejemplo de la fig.3.13 para producir un campo magnético longitudinal, pero los embobinados se juntan y se colocan en el interior de una envoltura.

El campo magnético será mayor cerca de la superficie interna de la bobina, donde la densidad de flujo es mayor. La densidad de flujo decrece hasta el centro de la bobina donde es cero.

La longitud efectiva del campo magnético en una pieza magnetizada mediante una bobina, es de 6 a 9 pulgadas hacia ambos lados de la bobina. La regla de 6 a 9 pulgadas es un resultado variable, originado por las diferencias en permeabilidad de varios materiales ferromagnéticos.

Por ejemplo, la longitud efectiva del campo para hierro suave, el cual es altamente permeable, será de 9 pulgadas. La longitud efectiva para acero duro, el cual tiene baja permeabilidad, es de 6 pulgadas.

Cualquier defecto dentro del rango de 6 a 9 pulgadas hacia ambos

lados de la bobina, desarrollará suficientes fugas de flujo que atraerán partículas magnéticas, ver la figura 3.14

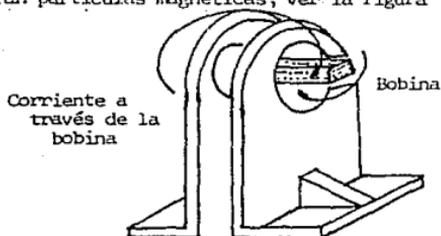


Figura 3.14

Los defectos que no estén dentro del rango de 6 a 9 pulgadas no tendrán suficientes fugas de flujo. En otras palabras, una pieza mayor de 12 a 18 pulgadas necesitará dos magnetizaciones. Para atraer partículas magnéticas hacia el defecto de la derecha, la pieza deberá desplazarse hacia la izquierda, de tal forma que el defecto quede entre 6 y 9 pulgadas, a partir del extremo de la bobina.

La regla de las 6 a 9 pulgadas se basa en la cantidad de corriente utilizada y en la permeabilidad del material que se está magnetizando. El uso efectivo de la regla deberá basarse en la experiencia obtenida de estas aplicaciones.

3.2.3 Magnetización por cable

En algunas ocasiones, las piezas de prueba son demasiado grandes para ser fijadas en el interior de una bobina normal. Cuando este caso se presenta, se emplea un cable de cobre para magnetizar la pieza longitudinalmente. Cuando el cable está enrollado alrededor del objeto a magnetizar, se hace pasar corriente eléctrica a través del cable, -- creando un campo magnético longitudinal.

La distancia efectiva del campo magnético longitudinal (creado por cable) es la misma que la distancia efectiva de la bobina estacionaria.

3.2.4 Uso de puntas (electrodos)

Las puntas son conductores de corriente (barras redondas de cobre), las cuales se usan para magnetizar áreas localizadas.

Cuando se utilizan las puntas debe tenerse mucha precaución debido a la posibilidad de quemar en los puntos de contacto las piezas a examinar. Las puntas se conectan a la fuente de corriente mediante cables, cuando fluye corriente eléctrica a través de las puntas, se crea en la pieza un campo magnético circular tal y como se muestra en la figura 3.15.

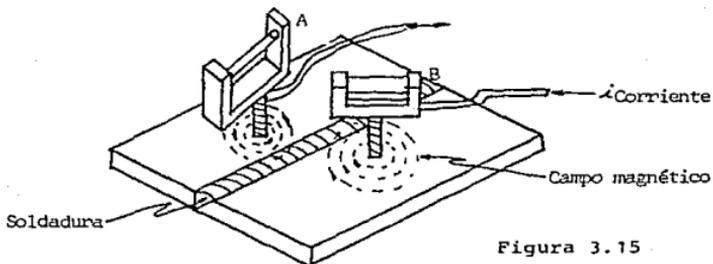


Figura 3.15

La corriente eléctrica entra por B y sale por A, siendo la dirección de las líneas de flujo, alrededor de la punta A, la contraria a la de las manecillas del reloj.

La magnetización por puntas es más efectiva cuando las puntas están separadas de 6 a 8 pulgadas. Pero está permitido utilizar una separación de 3 a 8 pulgadas.

3.2.5 Uso del yugo

Un yugo es un equipo especial en forma de U con una bobina para suministrar la corriente de magnetización. Cuando se energiza la bobina y se coloca una pieza entre los polos del yugo, se establece un campo magnético longitudinal en la pieza de prueba, ver fig.3.16

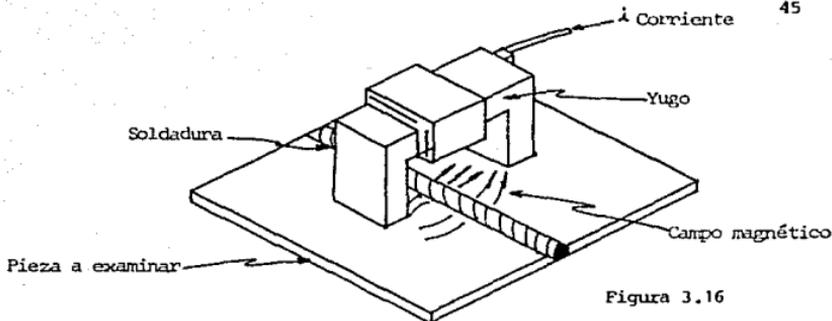


Figura 3.16

Los yugos magnéticos son equipos manuales de diseño especial, tal como el indicado en la fig.3.17 empleados con mucha frecuencia en la detección de discontinuidades, en la superficie de materiales magnéticos.

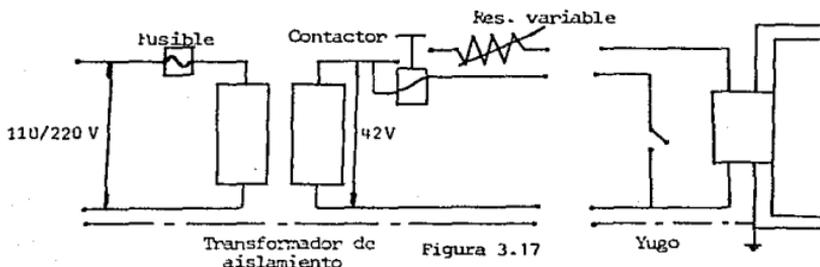


Figura 3.17

Son los más indicados para la inspección de piezas de gran acabado superficial, en las que debe evitarse la formación de arcos eléctricos que produzcan quemaduras.

Debido a su posibilidad de generar campos magnéticos alternos o continuos (media onda corregida), pueden estudiarse las indicaciones -- procedentes de discontinuidades superficiales (grietas) o las subsuperficiales (grietas o inclusiones).

Se puede emplear en ensayos por vía seca o húmeda y tienen la posibilidad de desmagnetizar las piezas examinadas.

Hay tipos con brazos fijos y otros con brazos articulados, que pueden adaptarse a la geometría de las piezas, éste último tipo se muestra en las fotografías de la página 46.



En ambas fotografías se muestra el empleo del yugo magnético, en la inspección del cuerpo de una chumacera radial. Obsérvese el uso del indicador de campo.



3.3 TIPOS DE PARTICULAS MAGNETICAS

Las partículas utilizadas en esta prueba están fabricadas de materiales ferromagnéticos de tamaño, forma y permeabilidad magnética apropiados, dichas partículas no retendrán prácticamente ningún magnetismo residual, -siendo mucho más pequeñas que las limaduras de hierro (de 40 a 60 micras) por lo que cuando están secas parecen polvo.

Las partículas están clasificadas de acuerdo con el método que sea -utilizado en húmedas o secas.

Cuando se utiliza el método húmedo, las partículas están en suspensión en un baño de agua o keroseno, son normalmente de color negro, rojo y fluorescentes. Las de color negro y rojo proporcionan el contraste con la pieza que va a ser inspeccionada. Las partículas serán atraídas hacia las fugas de flujo pero, cuando no existan fugas, las partículas saldrán de la pieza junto con el líquido. Una acumulación de partículas daría una indicación.

Cuando se utilizan partículas fluorescentes en el método húmedo, el examen se realiza bajo lámparas de luz negra. La ventaja principal de estas es que el contraste con la pieza es mucho mayor que utilizando partículas rojas o negras.

Las partículas deben de ser de alta permeabilidad, para que sean --atraídas y retenidas por fugas de campo débiles. En general se requiere: -que tengan baja retentividad por lo que no se quedarán sobre la pieza si no son retenidas por una fuga de campo. Las partículas utilizadas en el -método húmedo se seleccionan de acuerdo a su tamaño, forma, color y propiedades magnéticas. Se preparan en forma de pasta o polvo que se mezcla fácilmente con agua o keroseno. La elección del color de la pasta o polvo para mezclar en el baño, depende únicamente de cuál da mejor contraste --con el color de la pieza a examinar. En general, las negras dan un contraste mejor en piezas nuevas o mecanizadas, mientras que las rojas dan un me- jor contraste en piezas oscuras o que han estado en servicio. Las partícu- las fluorescentes dan el máximo contraste y máxima sensibilidad.

El número de partículas magnéticas en el baño se conoce como la concentración del baño, si ésta no tiene el nivel apropiado la prueba no puede ser realizada. Si hay muy pocas partículas no se obtendrán indicaciones si existen demasiadas las indicaciones serán erróneas. Debido a la importancia de la concentración a continuación se mencionan los pasos a seguir para preparar la suspensión, de acuerdo a la norma E-709-80(1985) del ASTM.

- 1.- Pesar la pasta o polvo, dentro de un recipiente limpio. La cantidad de pasta usada varía de acuerdo con la tabla No. 1 según sea fluorescente o coloreada, agua o keroseno.
- 2.- Mezclar y agitar la suspensión, para asegurar que hay una distribución uniforme de las partículas.
- 3.- Tomar una muestra de 100ml. en un tubo centrífugo con graduación.

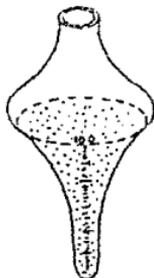


Figura 3.11

- 4.- Dejar reposar las partículas durante 30 minutos en un lugar libre de vibraciones.
- 5.- Después de 30 minutos medir el volumen de partículas en el tubo centrífugo. Esto está contemplado en el apartado 6.4.4.3 de la norma E-709-80(1985) del código ASTM.

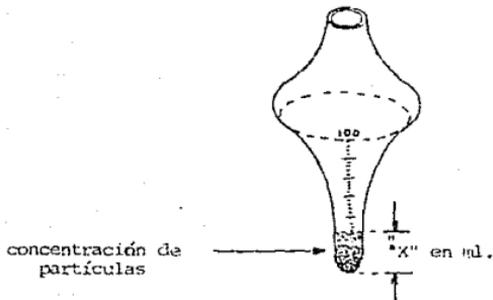


Figura 3.12

TABLA N° 1

| Tipo y color | Polvo fluorescente | Polvo fluorescente | Polvo negro | Polvo rojo | Polvo negro | Polvo rojo |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------|------------|
| Aceite transportador (baño) | Aceite ligero | Agua | Aceite ligero | Aceite ligero | Agua | Agua |
| Peso (oz) de polvo por galón de baño | 1/5 | 1 1/3 | 1 1/4 | 1 1/4 | 2 1/3 | 2 1/3 |
| Residuos en ml. | 0.42-0.52 | 0.18-0.22 | 1.1-1.2 | 1.3-1.4 | 1.0-1.1 | 1.5-1.7 |

6.- Si la lectura es mayor de la indicada en la tabla #1 o en las recomendaciones del fabricante, agregar agua o aceite, dependiendo del baño que se tenga. Si la lectura es menor de la indicada, agregar partículas al baño.

Nota.- La suspensión se debe comprobar diariamente.

Las partículas empleadas en el método de prueba por partículas secas tienen características similares a aquellas del método húmedo, excepto que están secas en forma de polvo. Las partículas secas tienen colores negro, gris, rojo y fluorescente. La elección del polvo a utilizar se determina de acuerdo con el que dé mayor contraste de color en la pieza que se va a magnetizar.

Las partículas magnéticas secas dependen de que el aire las lleve a la superficie de la pieza, por lo que se utiliza una pistola o pera - rociadora de partículas.

El método de dispersar partículas magnéticas secas en una nube ligera de polvo, mediante pistolas o peras rociadoras, da un alto grado de movilidad a las partículas.

Como las partículas flotan hacia abajo, por encima de la pieza que está siendo magnetizada, tienen la libertad de moverse en cualquier dirección, por lo que pueden ser atraídas por los campos de fugas más débiles.

Sin tener en cuenta las partículas que se van a utilizar, bien sean húmedas o secas, es primordial que las piezas que van a ser examinadas estén bien limpias y libres de tierra, grasa, aceite, polvo o incrustaciones. Si las piezas no están limpias, puede disminuir la movilidad de las partículas y provocar que éstas no sean atraídas hacia los campos de fuga.

Si la pieza no está limpia, un baño húmedo puede dar una superficie grasosa o aceitosa. La tierra, grasa, aceite, polvo e incrustaciones pueden contaminar también el baño. Las partículas secas también se pegarán a una superficie sucia. Además, las piezas examinadas por el método seco deben estar secas también ya que las partículas se pegarán a una superficie húmeda.

3.4 ELECCION DEL TIPO DE CORRIENTE DE MAGNETIZACION Y SENSIBILIDAD.

Si las discontinuidades son superficiales, el empleo de corriente alterna presenta muchas ventajas, ya que los cambios rápidos de polaridad de la corriente someten a las partículas a una agitación intensa que facilita sus desplazamientos y en consecuencia, su atracción por las fugas de campo lo que redundará en una mayor intensidad de las indicaciones que además se formarán en tiempos más cortos. Este efecto, claramente observable en el método seco, es mucho menos intenso en el método húmedo debido a que la viscosidad del líquido amortigua en gran parte la agitación de las partículas. Otra ventaja de la corriente alterna es que el valor de la intensidad en el pico de la onda es aproximadamente un 40% más alta que la que se lee en el amperímetro, lo que hace que la fuerza magnetizadora sea mayor que la obtenida con la misma intensidad en corriente continua. De ahí que un campo magnético dado se obtenga con equipos más ligeros y baratos en C.A. que en C.C.

Por otro lado, la C.C. magnetiza las piezas de manera prácticamente uniforme en el caso de la magnetización longitudinal y con un gradiente recto, que tiene un máximo en la superficie y un valor nulo en el centro, en el caso de magnetización circular. Esto equivale a decir que podrán detectarse discontinuidades subsuperficiales si se utiliza C.C. en la magnetización. En la fig. 3.20 muestra el diferente comportamiento de los distintos tipos de corriente. En la figura se ve cómo una discontinuidad que esta a unos 2mm por debajo de la superficie, necesita aproximadamente de 475 Amperes en C.A., mientras que si se utiliza en corriente directa - rectificada de media onda (C.D.R.M.O), es suficiente con 175 Amperes. Sin embargo se debe aclarar que se trata de intensidades umbrales, es decir la mínima a la que comienza a aparecer la indicación de la discontinuidad, estos ensayos se han llevado a cabo con una pieza cilíndrica de acero de 0.4% de C con taladros de 1.8 mm de diámetro paralelos a las generatrices del cilindro y a diferentes distancias de la superficie (figura 3.21).

3.4.1 Comparación de sensibilidad entre su aplicación por vía seca y por vía húmeda

El método seco da mejores resultados cuando las discontinuidades son subsuperficiales, debido a la alta permeabilidad y favorable forma alargada de las partículas. En la fig. 3.22 se muestra la comparación

de los métodos seco y húmedo en cuanto a su capacidad para detectar discontinuidades subsuperficiales. Sin embargo cuando se trata de - discontinuidades superficiales muy finas, es mejor el método húmedo, la selección del color de las partículas depende en ambos métodos - exclusivamente del color y del acabado de la superficie a inspeccionar

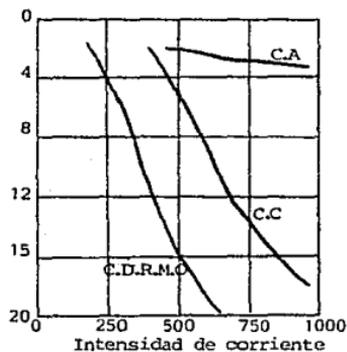


Figura 3.20

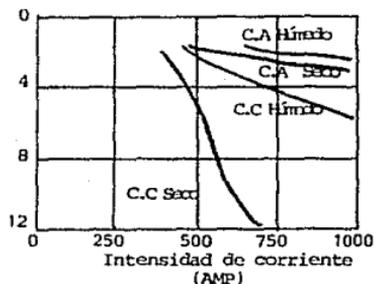
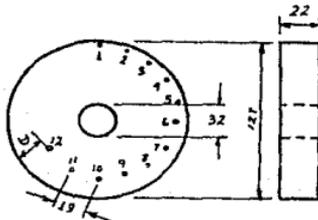


Figura 3.22

Figura 3.21



| Taladro no. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Diámetro (mm) | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 |
| "D" (mm) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |



En la fotografía se presenta la aplicación de partículas magnéticas del tipo fluorescentes vía húmeda, las cuales ponen de manifiesto la existencia de unas grietas y/o fisuras en la pieza inspeccionada.



Detalle de un pliegue detectado mediante partículas magnéticas en un tramo de tubería. Se utilizaron -- partículas rojas secas.

3.5 INDICACIONES POR PARTICULAS MAGNETICAS.

La acumulación de partículas magnéticas en las fugas de flujo da una indicación de discontinuidad. Se puede decir que lo que se ve es una acumulación de partículas y no el defecto en sí (a no ser que aflore a la superficie y se inspeccione por líquidos penetrantes). Por esta razón, a la acumulación de partículas se le llama indicación.

Las indicaciones se dividen en dos grupos:

- Indicaciones relevantes (indicaciones de defecto).
- Indicaciones no relevantes (no indican defecto).

3.5.1 Indicaciones relevantes

Sería inútil tratar de describir como son las indicaciones de defectos obtenidas en la práctica, mediante fotos, diagramas, etc., ya que la única manera de poder distinguir entre defectos relevantes y no relevantes es a base de muchas horas de trabajo y supervisión de obra. Lo que se va a describir a continuación son los tipos de defectos que se pueden detectar mediante el uso de partículas magnéticas, para diferentes procesos de fabricación y/o montaje.

- a) Defectos de soldadura.
 - Grietas superficiales
 - Falta de fusión
 - Escorias alineadas
 - Falta de penetración
 - Porosidad lineal
 - Quemadura pasante
- b) Defectos de fundición
 - Grietas por concentración
 - Inclusiones de arena en la superficie
 - Porosidad bastante cerca de la superficie
 - Contracción cerca de la superficie
- c) Defectos en laminación
 - Costuras

- Laminaciones
- Grietas
- Roturas superficiales
- Cascarilla incorporada
- Roturas internas

d) Defectos de forja.

- Pliegues
- Capas
- Roturas superficiales
- Escamas
- Reventones
- Sopladuras

e) Defectos de acabado, como mecanizado, rectificado o tratamiento.

- Fisuras por temple
- Grietas
- Grietas de rectificado
- Grietas de plaqueado
- Grietas por baño ácido

Como puede verse, por la cantidad de defectos que pueden surgir en los diferentes procesos de fabricación, es obvio que la única forma de poder detectarlos e interpretarlos correctamente es habiendo realizado muchos ensayos en obra, bajo una adecuada supervisión.

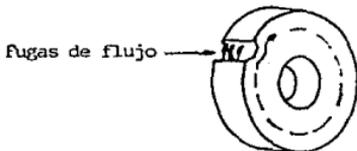
3.5.2 Indicaciones no relevantes

En el punto anterior se mencionaron los tipos de defectos (indicaciones relevantes) que pueden surgir en diferentes procesos de fabricación. Las indicaciones no relevantes se definen como las indicaciones obtenidas cuando las partículas magnéticas son atraídas hacia las fugas de flujo provocadas por otros motivos que no sean discontinuidades.

Es muy importante entender e interpretar correctamente las indicaciones por partículas magnéticas para poder reconocer las indicaciones no relevantes.

Las indicaciones no relevantes pueden provocarse por el uso de una corriente de magnetización excesiva, el diseño estructural de la pieza, variación de permeabilidad dentro de la misma pieza o escritura magnética.

Una de las indicaciones no relevantes más común es provocada por una constricción (diseño estructural de la pieza) en la trayectoria del material, a través del cual deben pasar las líneas de flujo. Dicha constricción se presenta en una pieza con cuñero, tal y como se muestra a continuación.



Las líneas de flujo tienden a permanecer dentro del metal y tratan de circular por la parte inferior del cuñero. Como las líneas de flujo se amontonan, algunas se ven forzadas a salir del material provocando fugas de flujo. Como consecuencia, si se espolvorean partículas magnéticas, éstas serán atraídas hacia las fugas de flujo dando una indicación no relevante, la indicación será borrosa y poco definida.

Una causa común que produce indicaciones no relevantes es el uso excesivo de corrientes de magnetización. Cada tipo de material puede aguantar un número límite de líneas de flujo. Cuando se excede este límite las líneas de flujo en exceso son forzadas a salir del material, provocando fugas de flujo. Estos campos de fugas se presentan primero en las orillas o en los cambios bruscos de espesor en la pieza.

Quando se magnetiza circularmente una pieza entre cabezales, la densidad de flujo es mayor en la superficie de la pieza, si se utiliza una corriente excesiva, la densidad de flujo se incrementa tanto, que las líneas de flujo son forzadas a salir de la pieza por las orillas. Si se espolvorean partículas magnéticas, estas serán atraídas hacia las fugas de flujo, dando indicaciones no relevantes. Ver fig. 3.23 .

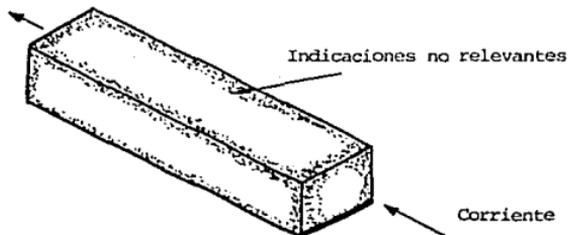


Figura 3.23

Este tipo de indicaciones no relevantes puede eliminarse reduciendo la corriente de magnetización de tal manera, que sea ligeramente menor que la requerida por el espesor de la pieza.

Las diferencias de permeabilidad en una pieza provocan indicaciones no relevantes. El trabajo en frío del metal puede cambiar la permeabilidad; por ejemplo, al doblar un clavo es trabajado en frío, por lo que el área del doblado ha sido endurecida. Si el clavo se magnetiza el área del doblado provocará fugas de campo, dando lugar a indicaciones no relevantes.

Por lo anteriormente descrito se puede deducir que el área del clavo que ha sido trabajada en frío tiene una permeabilidad más baja que el resto del clavo.

Muchas herramientas son fabricadas con áreas duras y suaves. Un cortafío tiene un punto endurecido, para cortar mejor y conservar su filo. La parte superior es más suave que el filo de corte para que no se fracture cuando se golpea con un martillo.

Si se magnetizara el cortafrío, se formaría una fuga de campo, en la zona de transición de duro-suave, por lo que se daría lugar a la formación de indicaciones no relevantes.

La escritura magnética es quizá la indicación no relevante más fácil de crear y de interpretar, basta con que se toque una pieza magnetizada con otra pieza de acero sin magnetizar o magnetizada en un grado diferente, para que en el punto de contacto entre las piezas se distorsione el campo magnético de la pieza magnetizada, provocando la formación de polos.

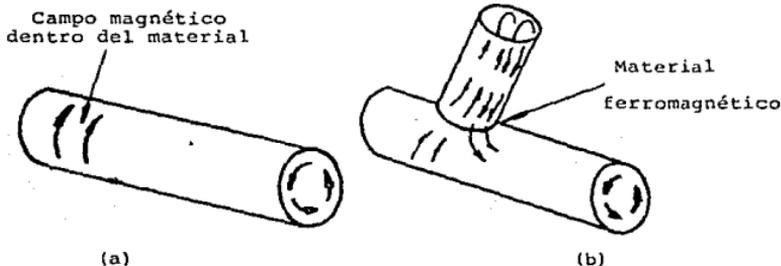


Figura 3.24

La fig. 3.24(a) indica la dirección del campo magnético, dentro de la pieza, la fig. 3.24(b) indica cómo el campo magnético es atraído hacia la pieza más pequeña en el punto de contacto. Este contacto distorsiona el campo magnético; como no existe una fuerza que cambie la distorsión, la fuga de flujo continuará después de que la pieza más pequeña haya sido separada. Ver fig. 3.25 .

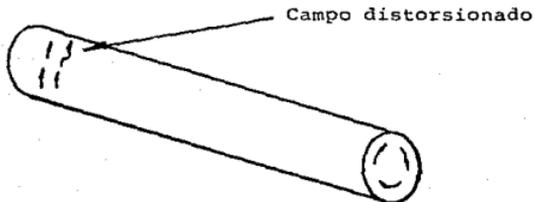


Figura 3.25

En el punto de distorsión se forman polos magnéticos lo que dará lugar a indicaciones no relevantes si se espolvorean partículas magnéticas.

La escritura magnética raramente se parece a un modelo de defecto, las indicaciones pueden ser en cualquier dirección. Si se desmagnetiza la pieza y vuelve a magnetizarse, las indicaciones provocadas por la escritura magnética desaparecerán.

3.5.3 Eliminación de indicaciones no relevantes

Las indicaciones no relevantes tienen unas características que las hacen fáciles de identificar:

- Las indicaciones son normalmente borrosas.
- Pueden asociarse normalmente con la geometría de la pieza.
- Son normalmente uniformes, en dirección y tamaño.

Aunque las indicaciones no relevantes son relativamente fáciles de identificar en la mayoría de los casos, es posible que enmascaren indicaciones relevantes. Por esta razón, es muy importante eliminar todas las indicaciones no relevantes antes de realizar la prueba.

La mayoría de las indicaciones no relevantes son producidas al utilizar una corriente de magnetización excesiva, por lo tanto, la pieza debe ser desmagnetizada y vuelta a magnetizar, pero utilizando la segunda vez una corriente de magnetización inferior. En algunos casos, tendrá que repetirse esta secuencia varias veces, para que desaparezcan completamente las indicaciones no relevantes.

3.5.4 Indicaciones falsas

Las indicaciones falsas se presentan cuando se acumulan partículas magnéticas y permanecen, mecánicamente o por gravedad, en superficies irregulares.

Las indicaciones falsas son normalmente producidas por:

- Superficies irregulares, debido a escamas de laminación o inclusiones.
- Contornos superficiales abruptos y no sujetos al campo magnético, tales como la raíz de una rosca, etc.
- Contornos que formen líneas de drenaje, en el método húmedo.
- Grasa o aceite en la superficie de la pieza, debido a una lim pieza inapropiada.

Como las indicaciones falsas no permanecen en la pieza por una fuerza magnética, éstas se pueden eliminar fácilmente utilizando una ligera presión de aire o enjuagando con un disolvente limpiador.

3.6 DESMAGNETIZACION

Todos los materiales ferromagnéticos sometidos a un campo magnético conservan, después de cesar la acción del campo, un cierto magnetismo, llamado magnetismo residual cuya intensidad dependen de la retentividad del material. Sin embargo, una alta retentividad no significa necesariamente una mayor dificultad en la desmagnetización, ya que esto depende esencialmente de la fuerza coercitiva. A veces resulta más difícil desmagnetizar la pieza que magnetizarla.

No siempre es necesario desmagnetizar las piezas después de una inspección ya que el proceso es costoso y consume tiempo, no hay necesidad de realizarlo, al no haber alguna buena razón para hacerlo.

Quando se iniciaron los ensayos por partículas magnéticas, la desmagnetización se realizaba como una operación de rutina, bien fuese necesaria o no. Sin embargo, en muchos casos la desmagnetización es esencial por lo que el operador debe comprender el porqué se hace junto con los problemas involucrados y las formas de resolverlos.

Veamos unas cuantas razones por lo que es preciso desmagnetizar una pieza.

- a) Pueda interferir con subsecuentes operaciones de mecanizado, haciendo que la viruta se adhiera a la pieza o a la cuchilla, con lo que resultará afectado el acabado de aquella o la vida de ésta.
- b) Puede interferir con procesos de soldadura por proceso de arco, ya que (si el campo es suficientemente intenso) producirá sensibles desviaciones del arco.
- c) Pueda afectar la correcta operación de instrumentos sensibles a los campos magnéticos, tales como brújulas, etc. o pueda interferir de alguna forma en el funcionamiento de equipos o aparatos incorporados en la estructura donde va instalada la pieza.
- d) Pueda afectar el funcionamiento de la propia pieza (cuchillas o sierras de corte trabajaran mal e incluso llegarán a romperse, si se adhieren virutas a su superficie).

e) Pueda causar daños en partes móviles por captura de partículas de metal o incluso partículas magnéticas, Este es el caso de las bolas de - rodillos, de los rodamientos o los dientes de engranajes.

f) Pueda impedir la correcta limpieza de las piezas (después del ensayo), por retención magnética de las partículas en la superficie haciendo así difíciles otras operaciones posteriores.

La desmagnetización no es necesaria cuando:

a) Las piezas son de un material de baja retentividad (aceros blandos de bajo contenido de carbono). En este caso, el campo remanente desaparece prácticamente al dejar de actuar la fuerza magnetizadora.

b) La pieza forma parte de una estructura soldada o de una vasija o caldera. En este caso, aunque el material presenta alta retentividad, no es probable que el campo residual afecte al funcionamiento del conjunto.

c) La pieza sufrirá, posteriormente, un tratamiento térmico por encima del punto de Curie (770°C). Por encima esta temperatura, el acero resulta magnético y (en el enfriamiento) queda totalmente desmagnetizado.

d) La pieza vaya a ser desmagnetizada en procesos posteriores. por ejemplo, al sujetarla en un plato magnético.

3.6.1 Sistemas de desmagnetización

Existen varios sistemas (más o menos eficaces) para llevar a cabo la desmagnetización, cuyo fundamento puede explicarse mediante el ciclo de histéresis. Todos los sistemas operan sometiendo la pieza a un campo magnético alterno, cuya intensidad va gradualmente decreciendo hasta anularse. En la figura 3.26 se muestra la variación del ciclo de histéresis y su descomposición en las variaciones del campo (abajo) y de la inducción en la pieza (derecha). Se ve claramente que a medida que el campo va disminuyendo en cada ciclo, también disminuye la inducción en la pieza tendiendo ambos a anularse simultáneamente.

Para que esto ocurra así, es necesario asegurarse primero de que el campo inicial sea suficientemente fuerte para vencer la fuerza coercitiva y conseguir así la inversión del campo residual inicial de la pieza y, segundo, que la disminución entre las sucesivas reducciones de corriente sea tan pequeña como sea posible, para que la fuerza magnética inver-

sa (generada en cada ciclo) pueda invertir el campo magnético remanente de la pieza desde la última inversión.

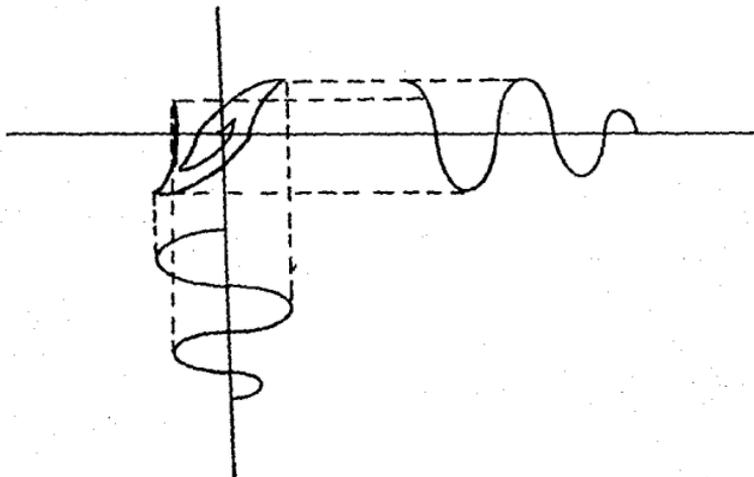


Figura 3.26

La alternancia del campo es un factor importante en cuanto afecta a la penetración del campo magnético de la pieza. Así, será preferible trabajar a bajo número de ciclos para conseguir la desmagnetización de toda la masa, ya que el poder de penetración disminuye incrementando la frecuencia. Sin embargo en la práctica, se utiliza la corriente normal de 50 ó 60 ciclos por segundo y se obtienen resultados totalmente aceptables.

De los diversos métodos que se utilizan en la práctica, el más importante (por su extensa utilización) es el que emplea corriente alterna, bien la normal de 50 ó 60 Hz o bien de frecuencia reducida a - 10 Hz (más eficaz por su mayor penetración).

Las piezas a desmagnetizar se hacen pasar a través de una bobina, por la que circula la corriente alterna, con lo que son sometidas a un campo magnético alterno, pero de intensidad máxima constante. - Hay dos métodos para hacer que el campo vaya disminuyendo progresivamente: el primero es mover la pieza desde el núcleo de la bobina, hacia el exterior, con lo que el campo a que está sometida la pieza irá siendo cada vez menor, a medida que se aleje de la bobina y, a una distancia relativamente pequeña (1-1.5m), el campo se habrá anulado, a - efectos prácticos. El segundo método es el de mantener fija la pieza dentro de la bobina y disponer de un dispositivo que permite reducir progresivamente la intensidad de la corriente.

El primer método es más cómodo y económico, por lo que es el más utilizado. Hay que tener en cuenta que :

- a) Conviene pasar las piezas cerca de la pared de la bobina, ya que en la proximidad de las espiras el campo magnético es más intenso.
- b) Si se tratara de piezas pequeñas, no pasarlas en paquetes o bolsas, sino de una en una o bien en soportes amagnetizados, que permitan mantenerlas fijas y sin contactos mutuos.
- c) Normalmente da buenos resultados hacer girar la pieza a la vez que se desplaza a través de la bobina.
- d) Si la pieza es alargada, conviene que su eje longitudinal sea paralelo al de la bobina.
- e) Si la pieza no tiene ninguna dimensión preferente ($L/D = 1$) es conveniente, a veces, colocarla entre dos trozos de acero suave, - de manera que se constituya un conjunto en forma de barra.
- f) Para desmagnetizar piezas en forma de anillo, el mejor método es hacer pasar a través de ellas un conductor con C. A. y, mediante algún dispositivo, ir disminuyendo la intensidad de la corriente.

La desmagnetización con C.C. requiere un instrumental más complicado, ya que es necesario disponer (además de reóstato, para disminución de la corriente) de un dispositivo que permita invertir el paso de corriente cada cierto período de tiempo. Tiene la ventaja de que este tiempo puede aumentarse (1/2 - 1 segundo), con lo que la desmagnetización se lleva a cabo en toda la masa de la pieza.

3.6.2 Medida del campo magnético residual

Para controlar la eficacia de los métodos de desmagnetización, es necesario medir de alguna forma el campo magnético que aún conserva la pieza. Cuando no se requiere un control cuantitativo del magnetismo residual, da buenos resultados emplear una simple cadena fabricada con clips, que será atraída por la pieza al acercarla a ella, si la desmagnetización no ha sido efectuada correctamente. Este método es suficientemente bueno cuando la pieza va a trabajar en un sistema al que no afectará el posible magnetismo de aquélla. Sin embargo, en sistemas de gran responsabilidad, es preciso controlar con precisión el magnetismo remanente de sus componentes. Para este fin, se utilizan equipos especialmente diseñados para dar una medida cuantitativa.

Estos equipos utilizan sondas Foerster o sondas Hall como elementos detectores. En particular, para el control de la desmagnetización suele utilizarse la sonda Hall que es menos sensible que la Foerster, pero sirve perfectamente para estos propósitos, ya que hemos visto que la desmagnetización está limitada por el valor del campo magnético terrestre (unos 0.5 Ce).

3.7 INTERPRETACION Y REGISTRO DE LAS INDICACIONES

Debe recordarse que para interpretar una indicación es aconsejable:

- a) Conocer la naturaleza del material de la muestra de ensayo.
- b) Conocer el historial de fabricación de la muestra (forjada, estampada, moldeada o mecanizada), así como los tratamientos térmicos sufridos y tipo de heterogeneidades específicas que pueden producirse en cada etapa de la fabricación.
- c) Deser posible, tener experiencia con piezas similares.
- d) Realizar, si se juzga necesario, ensayos complementarios, in cluso destructivos, para poder identificar una indicación desconocida.

3.7.1 Interpretación de las indicaciones

En términos generales, podemos afirmar que las indicaciones de partículas magnéticas presentan sus bordes con una definición muy nítida - cuando proceden de discontinuidades, tales como grietas superficiales cuyo plano sea perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético. - Si dichas discontinuidades son subsuperficiales, las indicaciones correspondientes aparecen con sus bordes algo más difusos, al igual que ocurre con heterogeneidades de morfología cilíndrica. Las discontinuidades de morfología esférica tales como cavidades, poros y macroinclusiones globylares son poco detectables por partículas magnéticas dando en todo caso lugar a indicaciones poco definidas.

3.7.2 Registro de las indicaciones

Para el registro de las indicaciones obtenidas por partículas magnéticas se puede recurrir a la fotografía directa, sea en blanco y negro o en color aunque también pueden usarse otros procedimientos más económicos tales como:

- a) Recubrir la pieza con una laca transparente que proteja la indicación contra rozos o deterioros.

b) Pasar la indicación (con partículas secas) a un papel adhesivo transparente "diurex" y pegarlo en una hoja blanca. A esto se le llama magnetograma.



Magnetograma de la indicación relevante obtenida en la pieza que muestra la fotografía.



La fotografía muestra la pieza inspeccionada mediante partículas magnéticas, en la cual se observó una indicación relevante tal vez de un pliegue originado en la fabricación de la pieza.

CAPITULO 4

ULTRASONIDOS

4. ULTRASONIDOS

4.1 Antecedentes

El empleo de ondas acústicas para la detección de defectos en materiales es conocido desde hace mucho tiempo. Todos sabemos que la sonoridad de una campana, una copa de cristal, depende grandemente de su calidad y que la presencia de defectos altera el sonido emitido de forma que puede detectarse esta variación con el oído humano. Muy familiar es la presencia del empleado de ferrocarril golpeando las ruedas de los vagones con un ligero martillo, con el fin de encontrar importantes defectos en las mismas.

Sin embargo los ensayos de sonoridad son muy simples y poco sensibles para detectar defectos. Esto es consecuencia de la baja frecuencia utilizada y de la poca sensibilidad del oído. La utilización de ondas acústicas de alta frecuencia (ultrasonido), permite aumentar grandemente la sensibilidad de detección, a la vez que utilizar sus características direccionales para una utilización más localizada y racional. Téngase presente que la capacidad de las ondas acústicas para detectar defectos se encuentra primeramente relacionada con la relación existente entre la longitud de onda y el tamaño de los mismos. Cuanto menor sea con respecto a las dimensiones de la discontinuidad, mayor sensibilidad de detección se obtendrá. Esto puede expresarse diciendo que a mayor frecuencia, mayor sensibilidad.

La aplicación de ondas ultrasónicas como medio de ensayo de materiales utilizando técnicas y equipos similares a los actuales, se remonta a los años cuarenta, cuando Sproule y Firestone desarrollaron independientemente equipos ultrasónicos a impulsos que pronto demostraron las grandes posibilidades de ésta técnica de ultrasonidos. A lo largo de los últimos años el ensayo de materiales por medio de ultrasonidos ha cobrado una gran importancia dentro del marco general de ensayos no destructivos, compartiendo con la radiografía un papel esencial en el examen volumétrico de materiales y soldaduras.

4.2 DESCRIPCION DEL EXAMEN

Antes de entrar en la física y aplicaciones de los ultrasonidos resulta conveniente dar una visión general de los fundamentos básicos de ésta técnica. Para ello se analizará en un ejemplo concreto de examen en el que entran en juego todos los elementos fundamentales del mismo.

La figura 1 representa un diagrama general del ensayo de una pieza de acero (chapa) por medio de ultrasonido. Como se verá los principios de funcionamiento de ésta técnica son similares a los del sonar y radar.

Los elementos esenciales del examen reflejados en la figura 1 son los siguientes:

- Equipo electrónico de ultrasonidos
- Palpador
- Pieza a examinar

Los dos primeros constituyen los medios de examen, mientras que el tercero constituye el objeto del examen.

El equipo de ultrasonido cuyas características se estudiarán más tarde, genera impulsos eléctricos muy breves (del orden de microsegundos) de amplitud o voltaje del orden de 50-100 V. y con una frecuencia de repetición establecida previamente y que suele estar comprendida entre 500 - 5000 impulsos por segundo.

Los impulsos generados por el equipo son aplicados al palpador el cual, por medio de un cristal piezoeléctricos que constituye su elemento esencial, los transforma en impulsos mecánicos de duración muy breve y frecuencia del orden de 1 - 6 Mhz. Estos impulsos mecánicos (impulsos de ondas ultrasónicas) son transmitidos a la pieza a examinar, donde se propagan y reflejan en la superficie opuesta o en defectos si los hubiera en su trayectoria. Los impulsos reflejados son de nuevo recogidos por el palpador y, por el efecto piezoeléctrico directo, -- transformados en impulsos eléctricos de la misma frecuencia; no confundir esta frecuencia de los impulsos con la frecuencia de repetición - de los mismos o ritmo; son analizados y registrados en el equipo, en -

tiempo de recorrido en el material y amplitud, de forma que se obtiene la información necesaria para conocer las incidencias de los impulsos ultrasónicos en su recorrido a través del material.

El esquema en bloque de la derecha en la figura 4.1, detalla más explícitamente el proceso anteriormente descrito. Sobre la pantalla - osciloscopio en el cual se visualiza en tiempo real el impulso inicial, el impulso de reflexión de la superficie opuesta (eco de fondo) y los posibles ecos o reflexiones en discontinuidades o defectos, los cuales aparecerán entre el impulso inicial y el eco de fondo en un punto de la pantalla geoméricamente equivalente al de la localización del defecto con respecto a las superficies de entrada y opuestas o de fondo.

4.2.1 Generación de ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas corresponden al margen superior de frecuencias del espectro de ondas acústicas (infrasonidos, sonidos y ultrasonidos) cuyo límite inferior se encuentra en el entorno de los 16000 ciclos por segundo (Hertz) valor que representa la máxima frecuencia audible del oído humano medio. Las frecuencias usuales de las ondas ultrasónicas utilizadas en ensayo de materiales se encuentran comprendidas dentro del margen de 0.5 - 20 Mhz.

Las ondas acústicas, y por tanto las ultrasónicas, son vibraciones mecánicas de las partículas del medio en que se propagan. Los tipos de onda y modos de propagación serán estudiados más adelante. En el apartado anterior se vió como el palpador transmite ondas, en forma de - impulsos al material a examinar. Esta transmisión se lleva a cabo como consecuencia de la vibración del cristal piezoeléctrico, en contacto, con la superficie de la pieza. (Debido al impulso aplicado a las caras del cristal) vibración que se transmite a las partículas de la pieza a - examinar.

4.2.2 Efecto piezoeléctrico

La generación de ondas ultrasónicas puede realizarse por diversos - medios o fenómenos físicos. Sin embargo, solo consideraremos el efecto - piezoeléctrico por ser éste el utilizado para el ensayo de materiales.

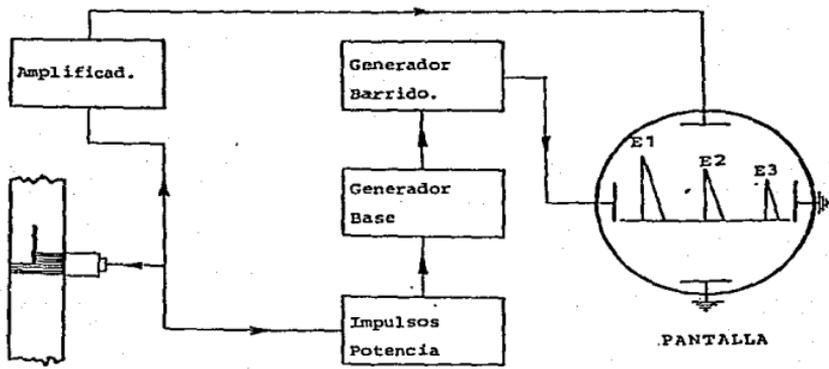
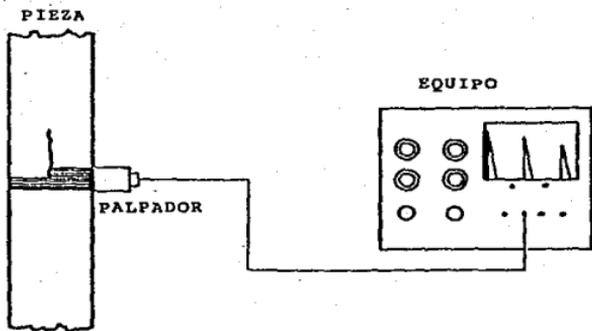


FIGURA 4.1

Determinados cristales naturales (cuarzo, tourmalina) poseen la propiedad de crear cargas eléctricas cuando se ejerce una presión sobre sus caras (efecto piezoeléctrico directo). El mismo fenómeno pero a la inversa ocurre con estos cristales. Cuando se le aplica una carga eléctrica o tensión en sus caras se deforman proporcionalmente al valor de la carga o tensión (efecto piezoeléctrico inverso). Este mismo fenómeno ocurre con determinadas cerámicas fabricadas por sinterización tales como el titanato de bario, titanato circonato de plomo, etc., las cuales son usualmente utilizadas para la fabricación de palpadores.

La generación de ondas ultrasónicas según el anterior fenómeno es bien simple: un cristal o cerámica de superficie dada y espesor "e" es excitado con un impulso eléctrico muy breve, previo depósito metálico (plata) en sus caras. El impulso eléctrico hará vibrar el cristal a una frecuencia que viene determinada por $f = \frac{v}{2e}$, en donde v es la velocidad de propagación de las ondas en el cristal. El efecto inverso, transformación de impulsos ultrasónicos en eléctricos, completa el ciclo completo de generación y detección de ondas ultrasónicas por medio del efecto piezoeléctrico.

4.2.3 Palpadores

El cristal o cerámica generador-detector de ondas se encuentra montado dentro de un conjunto electro-mecánico que es el palpador, el cual juega un papel fundamental en un ensayo de materiales por ultrasonidos. De su correcta aplicación y selección dependerá, en gran parte, la validez de los resultados obtenidos. Del palpador depende la frecuencia de las ondas, anchura del impulso (resolución), geometría del haz a impulso emitido y energía transferida al cuerpo a ensayar. Las anteriores variables o parámetros se ven también influenciadas por el equipo electrónico generador-detector de impulsos, pero no de una forma tan fundamental como las condiciona el palpador.

En su concepción más sencilla un palpador consta de las siguientes partes: cristal piezoeléctrico, amortiguador, carcasa, zapata y conector. Del tipo de cristal seleccionado y de la forma de realizar el mon-

taje de los anteriores elementos dependerán las características del palpador resultante.

En la mayoría de los casos el palpador está acoplado eléctricamente al equipo por medio de un pequeño transformador que a veces está alojado dentro de la carcasa del mismo y otras en el conector del cable de conexión al equipo electrónico. Su función primordial es la adaptación de impedancias y, por lo tanto, aumentar el rendimiento de la transformación energía eléctrica-energía mecánica.

El amortiguador que se pega fijamente al cristal por la cara opuesta a la de contacto con la pieza a ensayar, desempeña dos funciones claramente definidas. La primera de ellas es la de amortiguar las oscilaciones del cristal, de forma que cuando éste sea excitado por el impulso eléctrico no vibre libremente, con el fin de obtener impulsos ultrasónicos que den buena resolución para detectar defectos próximos. La segunda función es la de absorber las ondas emitidas por la cara opuesta a la de contacto para no tener interferencias y ecos parásitos que podrían dificultar la interpretación de resultados. Los amortiguadores suelen hacerse con mezclas de resinas polimerizantes y polvo de material de alta densidad, wolframio por ejemplo.

La zapata es una lámina ligera de material plástico o similar que se adhiere por la cara útil de emisión con el fin de proteger al mismo del roce con el material a ensayar. Otros elementos que componen el palpador son la carcasa, hilos de conexión y el conector.

Atendiéndonos a su utilización los palpadores pueden clasificarse en cinco grandes grupos:

- a) Normales (fig. 4.2a)
- b) Angulares (fig. 4.2 b)
- c) Inmersión
- d) Emisión-recepción independiente (fig. 4.2 c)
- e) Especiales

4.3 Transmisión de ondas : leyes fundamentales

4.3.1 Parámetros básicos.- Las ondas ultrasónicas, al igual que cualquier otro movimiento ondulatorio, se encuentran definidas unívocamente por los

ESQUEMA DE PALPADOR

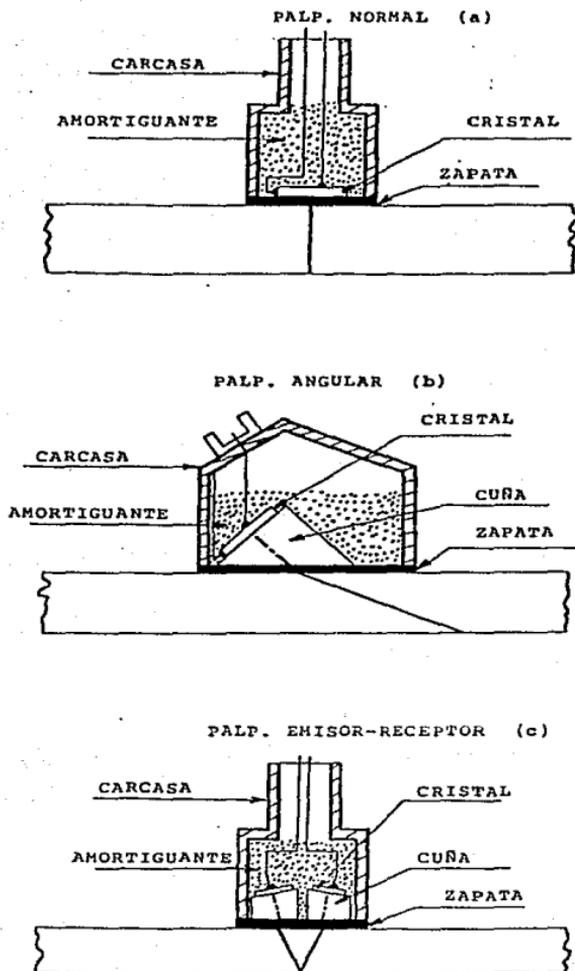


FIG. 4.2

siguientes parámetros:

- Frecuencia: número de vibraciones completas por segundo (ciclos por segundo o hertz)
- Longitud de onda (λ): distancia mínima entre dos puntos en el mismo estado de vibración. (en metros)
- Velocidad: distancia recorrida por las ondas en el medio por unidad de tiempo. (m/seg)
- Amplitud: máximo desplazamiento de una partícula de la posición de reposo. (mts.)

Los tres primeros parámetros están relacionados entre sí por la - la fórmula :

$$\lambda = v/f$$

De acuerdo a la fórmula, la velocidad es un parámetro característico del medio en que se desplace el sonido, la frecuencia del cristal (palpador) utilizado y la longitud de onda de ambas características.

4.3.2 Tipos de ondas

Los desplazamientos que experimentan las partículas de un medio en el que se propaga una onda ultrasónica pueden ser de varias clases, lo que da lugar a diferentes tipos de ondas. Desde el punto de vista de los ensayos no destructivos los tipos de ondas más interesantes son: longitudinales o de compresión, transversales o de cizallamiento, superficiales o de Rayleigh y por último, de Lamb, (fig.4.3)

4.3.2.1 Ondas longitudinales

Este tipo de ondas se caracteriza porque los desplazamientos de las partículas son en dirección paralela a la de propagación. Las ondas longitudinales crean en el cuerpo en el que se propagan zonas de sobrecompresión y refracción, separadas entre sí por la distancia $\lambda/2$. Estas ondas pueden propagarse a través de sólidos, líquidos y gases y supone el tipo de onda más sencillo y extendido dentro de la tecnología ultrasónica. Prácticamente todos los palpadores de ultrasonidos emiten ondas longitudinales, a partir de las cuales se generan los restantes tipos, por los mo--

dos de conversión de los que se hablará más adelante o por influencia de la geometría del medio.

4.3.2.2 Ondas transversales

En las ondas transversales las partículas se desplazan en dirección perpendicular a la de propagación. Sólo los cuerpos que tienen elasticidad de cizalladura, o sea los sólidos, pueden propagar este tipo de ondas. Su propagación produce distorsión en el cuerpo en que se propagan, pero no producen cambios de volumen como sucede en las ondas longitudinales. Evidentemente que estos cambios son tan pequeños que no pueden, en general, ser percibidos por los sentidos humanos. Las ondas transversales son muy utilizadas en el ensayo de soldaduras.

4.3.2.3 Ondas superficiales

Las ondas ultrasónicas pueden propagarse a lo largo de la superficie de un sólido describiendo sus partículas trayectorias elípticas. En este tipo de ondas las vibraciones son exponencialmente atenuadas en dirección normal a la superficie, de forma que la perturbación sólo existe, en una capa superficial de pocas longitudes de onda, atenuándose en gran cantidad, cuando existe un segundo medio, líquido o sólido, en contacto con la superficie, lo que permite detectar su trayectoria utilizando solo un dedo de la mano. Son muy sensibles y adecuadas para detectar defectos en superficies de poca rugosidad.

4.3.2.4 Ondas de Lamb

En tubos o láminas delgadas pueden crearse un cuarto tipo de ondas, de mayor complejidad que las anteriores, denominadas de Lamb en honor a su descubridor. Las ondas Lamb se clasifican en dos grandes grupos: simétricas y asimétricas. A su vez cada uno de estos grupos se desglosan en modos, de forma que existe un gran número de ondas Lamb con características de atenuación, velocidad y ángulos de generación distintos.

4.3.3 Velocidad de las ondas en sólidos

La velocidad de propagación de las ondas en sólidos depende de las

constantes elásticas de los mismos, de aquí que pueda obtenerse información sobre estas últimas a partir de la medida de velocidad de propagación.

En el caso de ondas longitudinales que se propagan en un medio de dimensiones mayores que la longitud de onda, la velocidad viene dada por la expresión:

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-r)}{\rho(1-r)(1-2r)}}$$

en donde E es el módulo de Young, ρ la densidad y r el coeficiente de Poisson.

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

en donde G es el módulo de rigidez. Las velocidades de las ondas transversales son considerablemente inferiores a las ondas longitudinales. Por ejemplo en el caso del acero, la velocidad de las ondas transversales es de 3.2×10^3 m/s.

La velocidad de las ondas superficiales es algo inferior a la de las transversales en el mismo medio, $v_s = 0.93 v_t$, y la velocidad de las ondas Lamb es variable según los diferentes modos.

4.3.4 Impedancia acústica

Cuando la onda longitudinal se propaga a través de un medio, la relación entre la amplitud A y la sobrepresión P que se crea en el medio viene dada por la expresión:

$$P = \rho v \omega A$$

en donde: ρ es la densidad (Kg/m³), v= vel. de propagación y la frecuencia angular $\omega = 2\pi \cdot f$ (ciclos/s). Al producto $\rho v = Z$ se le llama impedancia acústica y juega un papel primordial en los fenómenos de reflexión y refracción en la superficie de separación de los medios.

La intensidad ultrasónica, energía que pasa por unidad de superficie y tiempo, viene ligada a los anteriores parámetros por la expresión:

$$I = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho V} = \frac{1}{2} \rho V \omega^2 A^2$$

de donde conviene recordar que las intensidades son proporcionales al cuadrado de las sobrepresiones y amplitudes y recíprocamente.

4.3.5 Reflexión y refracción

Los fenómenos de reflexión y refracción de ondas ultrasónicas en una separación de dos medios cumplen la conocida Ley de Snell de la óptica. En el caso de incidencia normal de un haz ultrasónico (longitudinal o transversal) se produce un haz reflejado y otro refractado de la misma naturaleza cuya distribución de energía depende de las impedancias acústicas de ambos medios.

En el caso de incidencia oblicua de un haz de ondas longitudinales, fig. 4.4 con un ángulo α este haz se descompone en general en cuatro haces:

- L_1 = haz longitudinal reflejado.
- T_1 = haz transversal reflejado.
- L_2 = haz longitudinal refractado.
- T_2 = haz transversal refractado.

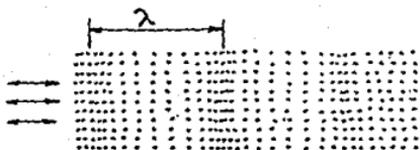
La relación entre los ángulos y velocidades de cada tipo de onda y en cada medio vienen dadas por:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{V_{L_1}} = \frac{\text{Sen } \alpha}{V_{T_1}} = \frac{\text{Sen } \alpha}{V_{T_2}} = \frac{\text{Sen } \alpha}{V_{L_2}}$$

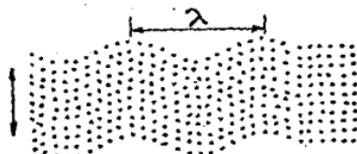
La ley de Snell permite observar que cuando $\text{sen } \alpha = V_{L_1} / V_{L_2}$ resulta que $\alpha = 2L - 90^\circ$ Y, por tanto, sólo existe una onda refractada

(transversal). Cuando $\alpha = 1$ cumple la anterior condición se denomina ángulo límite para las ondas longitudinales. De acuerdo a pruebas en laboratorio se ha establecido que para la superficie perspex-acero éste

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**



a) Ondas longitudinales
(medio ilimitado).



b) Ondas transversales
(medio limitado)



c) Onda de superficie de Rayleigh.

FIGURA 4.3

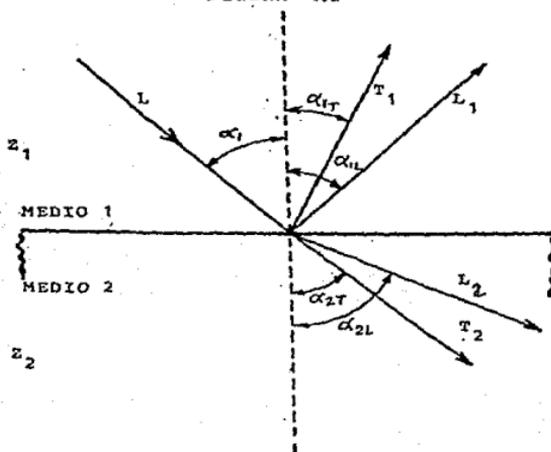


Fig. 4.4

ángulo α , tiene un valor de aproximadamente 27.6° .

La transformación de un tipo de ondas en otro en el proceso de reflexión y refracción se denomina modos de conversión. Esta circunstancia permite que con un palpador normal y por medio de una cuña de perspex con un ángulo adecuado (superior a 27.6°) pueda obtenerse un haz oblicuo de ondas transversales.

4.3.6 Interferencia de las ondas con materiales : atenuación

La atenuación experimentada por las ondas como consecuencia de su interacción con el medio en que se propagan se debe, fundamentalmente, a dos causas que se superponen simultáneamente : absorción y dispersión. Las pérdidas de intensidad de una haz ultrasonoro en un recorrido a través de un medio se deben pues a éstas dos causas más el efecto de divergencia, de forma que:

Pérdidas por interferencia = Absorción + Dispersión + Divergencia

La absorción de las ondas ultrasónicas es una conversión de la energía mecánica de las mismas en calor. Las causas que dan origen a este fenómeno son diversas y en él influyen el medio y la frecuencia de las ondas. En el margen de frecuencia utilizadas en ensayos no destructivos, la absorción es directamente proporcional a la frecuencia y su contribución a la atenuación total en metales es, en general, considerablemente menor que la producida por dispersión.

Los orígenes de la dispersión se deben a que en la práctica los materiales presentan discontinuidades locales de impedancia acústica del orden de la longitud de onda, es decir, los materiales no son homogéneos desde el punto de vista ultrasónico. Esto es consecuencia de la presencia de pequeños defectos (poros, segregaciones, inclusiones, etc.) que actúan como focos dispersantes de las ondas. En los metales, por su naturaleza policristalina, los granos actúan como focos de dispersión por la distinta impedancia acústica que presentan según su orientación (anisotropía elástica).

La dispersión producida por la estructura policristalina de los metales es de gran importancia en los ensayos ultrasónicos. Los factores

que más influyen en esta dispersión son el tamaño del grano, la naturaleza del metal que determina su anisotropía elástica y la frecuencia de las ondas. La dispersión aumenta grandemente con el tamaño del grano y con la frecuencia, de aquí que el ensayo de estructuras groseras, fundiciones por ejemplo, requieren bajas frecuencias del orden de -- 2 Mhz. o 1 Mhz. A igualdad de grano y frecuencia la anisotropía elástica determina la mayor o menor dispersión. Desde este punto de vista el cobre es, entre los metales más usuales, el más anisótropo (más dispersante) y el aluminio el que menos, encontrándose el acero en un valor intermedio.

Las pérdidas por atenuación se expresan en decibeles. Se llama coeficiente de atenuación al número de decibeles por milímetro que se atenúa un haz en un medio dado. Si I es la incidencia inicial e I_1 la intensidad después de un recorrido X , se tiene que la atenuación en decibeles, es por definición:

$$\alpha \cdot X = 10 \log \frac{I_1}{I_0} \text{ db}$$

en donde α es el coeficiente de atenuación. Si tenemos en cuenta que las intensidades son proporcionales a los cuadrados de las presiones acústicas o voltajes generados, se tiene que:

$$\alpha \cdot X = 20 \log \frac{P_1}{P_0} = 20 \log \frac{V_1}{V_0} \text{ db}$$

El amplificador de la mayoría de los equipos comerciales de ultrasonidos se encuentra calibrado en decibeles, de forma que permite determinar, aproximadamente, atenuaciones globales en los casos más sencillos.

4.4 APLICACIONES Y LIMITACIONES DEL EXAMEN ULTRASONICO

Se usa principalmente el examen ultrasónico para la detección de discontinuidades internas y superficiales en la mayoría de los metales y aleaciones industriales. Pueden examinarse uniones realizadas por soldadura, soldadura fuerte y blanda con adhesivo. Se han desarrollado técnicas industriales para:

- a) Controlar y clasificar los materiales como aceptables a reparar y a rechazar.
- b) Para controlar el proceso de fabricación.

Existen aparatos, tanto de batería como estacionarios, lo que permite la inspección en taller, laboratorio, almacén o en el campo.

La inspección ultrasónica en el control de calidad e inspección de materiales, manufacturas de componentes eléctricos y electrónicos, la producción de acero y aluminio y en fabricación de estructuras, recipientes a presión, barcos, puentes, automotores y maquinaria. Se usa también la inspección de grietas y vigilancia de su desarrollo en ejes de mancuernas de ferrocarriles, columnas de prensas, equipo pesado de construcción, rodillos de laminado, equipo de minas y otras máquinas y componentes.

Algunos de los tipos principales de equipos que se examinan ultrasónicamente para la verificación de la presencia de discontinuidades son:

- 1) Componentes del tren de laminados: rodillos, flechas, engranes, columna de prensa, etc.
- 2) Equipo de generación de potencia, forja para turbina, rotores de generadores, ductos de presión, soldadura, recipientes a presión, elementos combustibles para calderas nucleoelectricas y otros componentes del reactor.
- 3) Partes de motor de aviación, las piezas forjadas de turbina y de compresor y engranes.
- 4) Componentes de aviones, biler, secciones de armadura y paneles estructurales.
- 5) Materiales de maquinaria, bloques de troquelado y formado -

aceros de herramienta y tubo de perforación.

- 6) Partes de ferrocarriles: ejes, ruedas, rieles y soldaduras de rieles.
- 7) Partes automotrices: forjado, hierro dúctil y componentes soldados.

Las discontinuidades a detectar incluyen los rechupes y tubos, grietas, inclusiones, sopladuras, laminaciones, reventadas, etc. que pueden resultar del proceso de fabricación y tratamiento térmico o aparecen en servicio como grieta de fatiga, corrosión bajo esfuerzo, grietas térmicas u otras causas.

Se usa también el principio de los métodos ultrasónicos para la medición de espesores para controlar molinos, los espesores de piezas forjadas o fundidas, cascos de barco o recipientes a presión. Se adapta particularmente bien para la verificación del estado de corrosión de equipos de procesado químico y se puede realizar sin parar la planta.

Se han desarrollado técnicas especiales, así como equipo para medición de velocidad de crecimiento grietas por fatiga, detección de excentricidad de perforaciones, medición de los módulos de elasticidad estudios de montaje de fuerza, grafito en hierro nodular y en metalurgia para la investigación de la estructura del endurecimiento y del conteo de inclusiones en varios metales.

Organismos normalizadores han emitido procedimientos inspección estándares de aceptabilidad y otros documentos relacionados. Estos regulan la detección de discontinuidades de algunos productos manufacturados específicos, pero pueden servir de base para caracterización de discontinuidades en muchas otras aplicaciones. Dichos organismos son por ejemplo A.S.M.E., A.S.T.M., A.S.N.T., A.P.I., etc.

Las condiciones del éxito del examen ultrasónico dependen de la adecuación del sistema del sistema utilizado al tipo de inspección a realizar y del adiestramiento y experiencia del operador. Si cualquiera de estos requisitos no se cumple, existe una alta probabilidad de obtener importantes errores al realizar una inspección, por ejemplo se pueden catalogar discontinuidades como perjudiciales mientras no afectan el producto o viceversa, subestimar o no detectar discontinuidades importantes.

4.4.1 Detección de discontinuidades en materiales y soldaduras.

El ensayo de materiales por ultrasónidos tiene su aplicación fundamental en la detección de discontinuidades o anomalías (defectos) en materiales y soldaduras tales como:

- Defectos de laminación (hoja).
- Rechupes y escorias en lingotes.
- Defectos en tubos, pormos, etc.
- Grietas y otros defectos de forja.
- Defectos típicos de soldadura: grietas, faltas de fusión y penetración, escoria, etc.

Esta aplicación se realiza de acuerdo con los principios descritos en el apartado anterior y según las técnicas que se describen someramente en el siguiente apartado de este tema.

4.4.2 Medida de espesores y estructuras metalúrgicas.

La determinación de espesores con ultrasonido presenta numerosas ventajas entre las que destacan fundamentalmente, el que la medida se realice por una sola superficie y su rapidez.

Existen aparatos muy ligeros y sencillos diseñados exclusivamente para este tipo de medidas, algunos del tamaño de una cajetilla de tabaco, que conectados a un palpador emisor receptor, alcanzan una apreciable sensibilidad (± 0.05 mm).

El principio sobre el que se basa la medida de espesores por ultrasonidos radica en medir de forma electrónica el tiempo de tránsito del impulso ultrasónico a lo largo de la sección y de la velocidad de las ondas en el material. Con una sencilla calibración, el equipo se encuentra listo para medir espesores dentro del margen preestablecido.

Dentro del código A.S.T.M. existe la norma E 797-87 la cual habla específicamente de la medición de espesores mediante ultrasonido.

Este tipo de medidas son muy utilizadas en plantas industriales

para controlar los efectos de la corrosión sobre los materiales o cuquier otra cosa que pueda suponer reducciones de espesor en componentes tales como calderas, tubería, etc.

Otra de las aplicaciones, aunque no tan generalizada como las anteriores, que presentan los ultrasonidos es la determinación o estimación de la estructura de materiales policristalinos (tamaño de grano fundamentalmente) por medio de medida de la atenuación de las ondas en los mismos. En efecto, tal como se ha expuesto en el capítulo anterior, el tamaño de grano de un metal o aleación afecta en gran manera a la atenuación de las ondas por el efecto de dispersión. Midiendo esta atenuación (dB) de forma que se mantengan constantes otras variables (recorrido, acoplamiento) puede disponerse de valiosa información relativa a la estructura y como consecuencia a tratamientos térmicos y estado de procesado de un material (fundición, forja, laminado, etc.)

4.4.3 Limitaciones y problemas de los ultrasonidos.

Dentro del campo de los ensayos no destructivos, los ultrasonidos ocupan un lugar preferente, diríamos el primero, en cuanto a posibilidades y técnicas de aplicación. Esto sin embargo, tiene la contrapartida de presentar de un lado una mayor complejidad y de otro limitaciones inherentes a sus principios físicos.

Los siguientes inconvenientes o problemas se presentan en la aplicación de este tipo de ensayo :

- Dificultad de interpretación de resultados. El operador debe confiar más en su experiencia y las características del material que examina que en las indicaciones obtenidas.
- En ensayos manuales no automáticos, no existe adecuado registro objetivo de resultados.
- El personal que realiza el ensayo debe ser experto y responsable. La validez de los resultados se encuentra fuertemente condicionada a la calificación del operador.
- El dimensionado de defectos, muy particularmente de aquellos con dimensiones del mismo orden que las del haz ultrasónico, es tan solo aproximado y difícil de efectuar.

Evidentemente que los anteriores problemas cobran mayor o menor énfasis según las diferentes aplicaciones del ensayo. Por ejemplo el examen por ultrasonidos de chapas de acero es muy sencillo y no presenta problemas mayores. Por el contrario, el examen de una soldadura a tope por ejemplo: 15mm. de espesor con pletina de respaldo y corona (sobreespesor) tiene serios problemas de interpretación y dimensionado de defectos.

En cuanto a limitaciones que este tipo de ensayo presenta, se puede establecer que todas ellas se derivan de aspectos geométricos y de estructura del metal o aleación que se ensaya. Piezas de geometría complicada en las que resulta difícil obtener ecos de fondo o acoplar el palpador (problemas de curvaturas) resultan prácticamente inaccesibles al ensayo. Materiales o soldaduras con estructuras metalúrgicas groseras grandes tamaños de grano, presentan dificultades de ensayo por la dispersión de las ondas que se produce en los mismos.

Esto es particularmente importante en estructuras de gran anisotropía, tales como el cobre y el acero inoxidable (austenita).

4.4.4 Estudio comparativo con la radiografía y otras técnicas.

Dentro del conjunto de técnicas de ensayo no destructivos, los ultrasonidos y radiografía pertenecen al grupo de ensayos volumétricos en los que se controla el volumen total de la zona sometida a ensayo. Por el contrario, los líquidos penetrantes y partículas magnéticas corresponden al grupo de ensayos superficiales, en donde la zona controlada por el ensayo corresponde a una capa superficial de la pieza o componente.

En la actualidad existe una nueva polémica sobre las ventajas e inconvenientes que la Radiografía y Ultrasonidos presentan para el ensayo de soldaduras. Es un hecho evidente que la Radiografía es una técnica más arraigada y de más fácil comprensión que los Ultrasonidos. Si unimos a esto el que sus resultados quedan patentes en un registro permanente (película radiográfica) que puede ser consultado

cuando se desee, a la vez que permite enjuiciar la calidad de la técnica utilizada, es fácil comprender el que tenga aceptación y que para la mayoría de los códigos sea el ensayo fundamental de soldaduras.

La utilización de ultrasonidos al ensayo de soldaduras es más reciente que la de radiografía. Por otra parte es una técnica más compleja, subjetiva y sin un registro de resultados tan patente y claro como en el caso de la radiografía. Sin embargo, como veremos después presenta una serie de ventajas, tales como su mayor capacidad de detección de defectos importantes (grietas y faltas de fusión), que hacen que el ensayo ultrasónico sea cada vez más utilizado en soldaduras, particularmente en las de mayor espesor

A la hora de hacer un estudio comparativo de estas dos técnicas volumétricas, es preciso analizar una serie de aspectos que podemos agrupar de la siguiente forma:

- 1.- Influencia del operador (objetividad).
- 2.- Capacidad de manejo y maniobra.
- 3.- Espesor de la pieza o componente.
- 4.- Naturaleza y geometría.
- 5.- Estado superficial.
- 6.- Capacidad de detección de defectos.
- 7.- Registro e interpretación de resultados.

Lógicamente no se abordan los aspectos económicos, ya que resulta muy difícil evaluar el costo global de unos ensayos sin prefiar previamente el tipo de componente, accesibilidad, etc.

Como resumen de un análisis de los anteriores aspectos, se presenta a continuación una evaluación global de las ventajas y desventajas de cada una de estas dos técnicas si bien es necesario decir que estas consideraciones deben ser tomadas como ideas orientativas y que en cada caso particular habrá que tener en cuenta otras circunstancias específicas del mismo.

Ventajas

- Registro permanente de resultados.
- Gran aptitud para la detección de defectos tridimensionales.

- Objetividad de resultados y sencilla aplicación del ensayo.

Desventajas

- Detección de defectos bidimensionales dependientes de su orientación con respecto al haz.
- Limitaciones en espesor.
- Necesidad de medidas de seguridad y protección.

Ultrasonidos.

Ventajas

- Gran sensibilidad a la detección de grietas y faltas de fusión (defectos bidimensionales).
- Buena capacidad de manejo y maniobra.
- No existen limitaciones prácticas en espesor.

Desventajas

- No existe un registro permanente como en el caso de radiografía, - salvo en el caso de ensayos automáticos.
- La interpretación de resultados requiere un operador de gran experiencia y responsabilidad.

4.5 TECNICAS DE EXAMEN

4.5.1 Métodos de reflexión y transmisión.

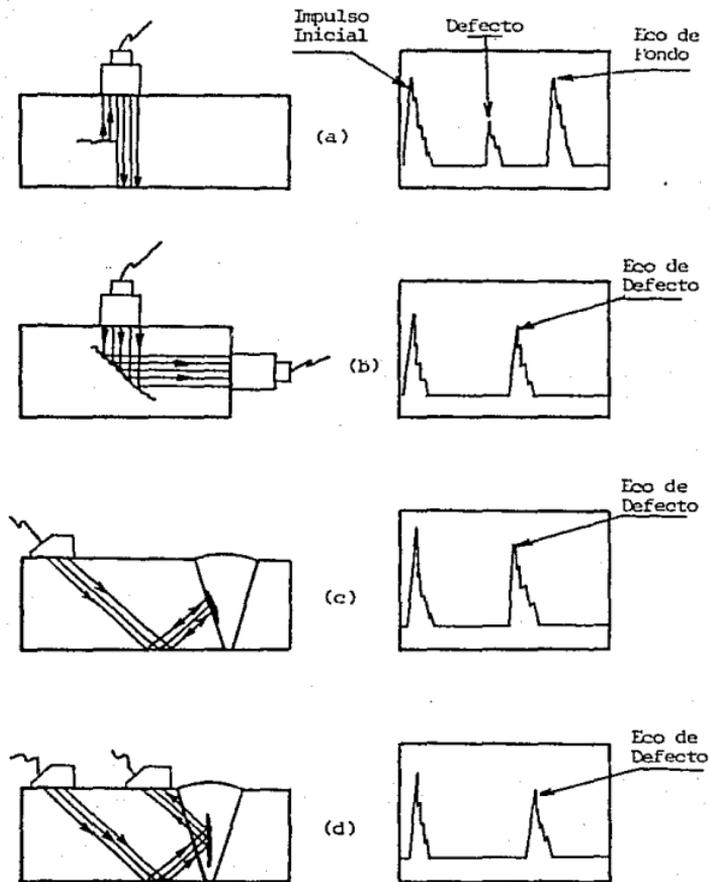
La aplicación de ondas ultrasónicas para ensayo de materiales pue de hacerse según diferentes métodos o técnicas que se explicarán en el presente apartado. La elección de uno u otro método dependerá de las características geométricas y estructurales, de los defectos más probables, de la accesibilidad, etc. En general y de acuerdo con el grado de responsabilidad del componente, se adoptará la solución más adecuada en función de todas las circunstancias concurrentes. Las prin cipales técnicas o métodos, que a su vez pueden adoptar diferentes var iantes, son:

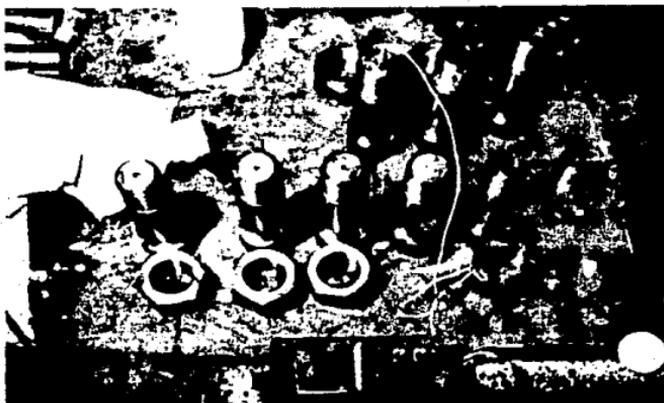
- a) Método por reflexión o eco.
- b) Método por transmisión.

El método de reflexión es el más utilizado en la práctica por su utilidad y sencillez de aplicación e interpretación. En general suele utilizarse un solo palpador que emite y recibe las ondas, aunque a veces pueden emplearse dos o más palpadores. La fig. 4.5 muestra diversas posibilidades de aplicación de este método. La principal característi ca de éste se encuentra en el hecho de ser las ondas reflejadas (eco) en defectos y contornos del material las que son detectadas y visualizadas en la pantalla del equipo. Dentro de sus considerables ventajas, presenta como mayor inconveniente su dependencia de la orientación de defectos, lo cual es más patente en componentes pesados, de aquí que la filosofía de las figuras 4.5b y 4.5d tengan más interés que el - que hasta la fecha se le viene prestando. La información a analizar en un ensayo por este método es: posición del palpador, amplitud de eco recibido recorrido de las ondas en el material y forma del impulsor.

El método por transmisión o transparencia es poco utilizado manualmente, aunque presenta interés en sistemas automáticos para detectar defectos y controlar el acoplo acústico y transmisividad de las - ondas. En la fig. 4.6 se presenta gráficamente las características - del método.

FIGURA 4.5





La presente fotografía muestra la aplicación del método por reflexión o eco durante la inspección ultrasónica de pernos.

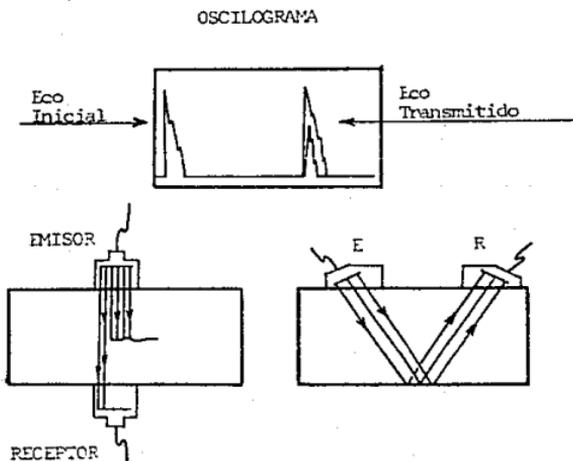


Figura 4.6

Este método se fundamenta en las variaciones que se producen en la transmisión de energía ultrasonora como consecuencia de la presencia de defectos, variaciones que quedan registradas por la indicación o impulsor de pantalla. Los principales inconvenientes del método - son:

- Los defectos no pueden ser localizados en profundidad ya que sólo se registra el impulso transmitido cuya posición sólo depende del espesor de la pieza.
- La necesidad de mantener el palpador emisor y el palpador receptor perfectamente alineados, hace que este procedimiento sea lento y - tedioso en ensayos manuales.

Los ensayos manuales son del tipo de contacto y generalmente, - utilizan la técnica de reflexión o eco. El operador traslada al palpador sobre la pieza por deslizamiento o contactos sucesivos. Ante una indicación de defecto u otras causas, el operador puede detenerse y explorar más detenidamente la zona sospechosa, registrando toda la información (amplitud, forma de eco, posición, etc.) en un cuaderno o formato especial.

En lo anteriormente expuesto radica la mayor ventaja de este tipo de ensayo. Otro aspecto positivo es la rápida puesta en marcha y sencillez de equipo: aparato de ultrasonidos, palpador acoplante y pieza patrón. Como principales desventajas presenta lentitud de operación, variaciones en el acoplante, y necesidad de un operador responsable y experimentado. Sin embargo, los ensayos manuales son los únicos posibles en muchos ensayos en obra.

Los ensayos automáticos suponen la utilización de un dispositivo mecánico o electromecánico que mueve el palpador según trayectorias y velocidad controladas. Otras veces el palpador se encuentra fijo y es la pieza la que se mueve, lo cual presenta ya una ventaja con respecto a los ensayos manuales. Este tipo de ensayo puede ser - por contacto o en inmersión, siendo en esta segunda técnica, inmersión, donde alcanzan sus máximas posibilidades y donde son más utilizados. La automatización de ensayos es muy adecuada para controlar componentes de geometría sencilla (tubos, palanquilla, chapas, etc.) producidos en grandes series. Como mayores ventajas presenta las siguientes:

- Rapidez de ensayo.
- Acoplo palpador-pieza uniforme.
- Registro automático de datos.
- Clasificación automática de componentes.
- Objetividad de resultados.
- Empleo simultáneo de varios palpadores.

Estos ensayos requieren dispositivos electromecánicos, máquinas de barrido, que en la mayoría de los casos son costosos.

4.5.2 Examen de materiales.

La aplicación de los ultrasonidos al ensayo de materiales se encuentra ampliamente extendida y contemplada en la mayoría de los Códigos o Normas (ASME, ASTM, API, BS, DIN, etc.).

En el ensayo de chapas, los ultrasonidos permiten detectar defectos típicos de productos laminados, como laminaciones o segregaciones - bastas. El ensayo se realiza por medio de un barrido total o por cuadrícula de la chapa a examinar, barrido (scanning) realizado desde una cara o superficie de la chapa. Las dimensiones y frecuencia del palpador de ondas longitudinales normalmente utilizado son: 20-25mm. \emptyset y - 2-4 Mhz. La fig. 4.7 presenta un caso típico de ensayo de chapas.

El examen de productos forjados, barras, anillos, etc., se utiliza para la detección de defectos típicos del proceso de forma como son: grietas, inclusiones no metálicas, copos, rechupes y cuerpos extraños. El examen se realiza con haz normal de ondas longitudinales de frecuencia 1 y 2 Mhz., según dimensiones y estructura. En el caso de anillos o barras perforadas, se utiliza, además del ensayo con ondas longitudinales normales, el ensayo con haz angular. El examen de barras forjadas para ejes se realiza con haz normal a lo largo de dos generatrices a 90° y desde las testas o cabezas de los mismo. La fig. 4.8 muestra un ejemplo gráfico de este tipo de examen.

La detección de defectos en tubos por ultrasonido es un exponente claro de las posibilidades de esta técnica. En la mayoría de los casos

este examen suele realizarse por medios automáticos de gran rapidez de ensayo. Para tubos de diámetros superiores a 100 mm. el acoplamiento palpador-tubo suele hacerse por contacto. Diámetros más pequeños requieren la utilización de métodos por inmersión. La fig. 4.9 muestra un ejemplo de examen de ambos casos.

El ensayo ultrasónico de productos moldeados, tuercas, tornillos, etc. requiere en cada caso estudiar la estructura y geometría de los componentes a examinar. Así en el caso de productos moldeados, cuerpos y tapas de bombas y válvulas por ejemplo, es conveniente realizar el examen después del tratamiento térmico, ya que este tipo de productos presenta generalmente, una estructura gruesa que produce una gran atenuación (dispersión) de las ondas.

4.5.3 Examen de soldaduras.

El examen ultrasónico de soldadura requiere, la utilización de palpadores angulares para poder incidir adecuadamente a la zona de unión por soldadura. La fig. 4.10 muestra el examen ultrasónico de una soldadura a tope y en prolongación. Mediante un desplazamiento del palpador entre las posiciones extremas reflejadas en la figura, el haz ultrasónico puede barrer toda la zona de soldadura en secciones. Este movimiento perpendicular al cordón es acompañado de un movimiento lateral, a lo largo del cordón a la vez que un pequeño balanceo del palpador. De esta forma el haz incide sobre toda la zona de soldadura según el ángulo del mismo y según diferentes orientaciones.

Los ángulos en acero usualmente utilizados son los de 70°, 60° y 45°. Su elección depende de la configuración de la soldadura y del espesor de la misma. Normalmente se utilizan ángulos de 70° para espesores inferiores a 30-40 mm. y ángulos de 45° y 60° para espesores superiores. Las frecuencias empleadas se encuentran en el margen de 2-4 MHz. Otras configuraciones, fig. 4.10b y 4.10c, requieren el uso combinado de palpadores normales y angulares, con ángulos determinados por la geometría de la unión.

Con el examen ultrasónico de soldaduras se pretende detectar, localizar y dimensionar defectos de este proceso tales como: grietas, faltas de penetración y fusión, escoria y porosidad. La interpreta-

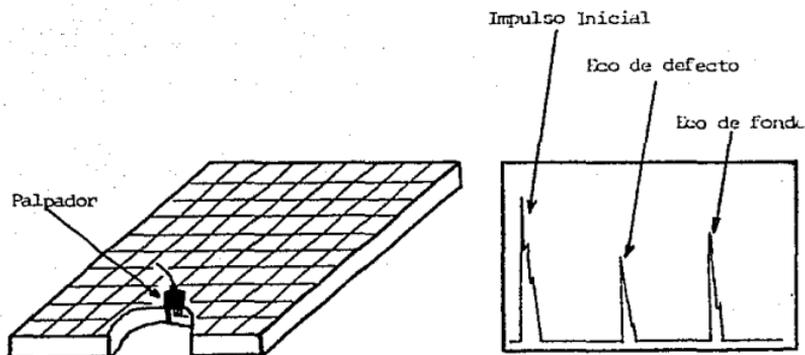


Figura 4.7

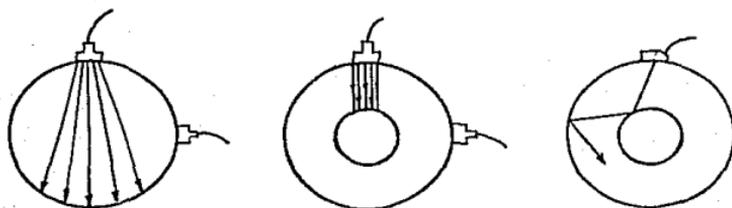


Figura 4.8

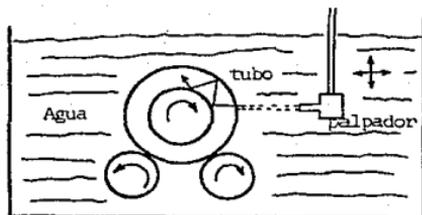
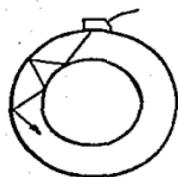
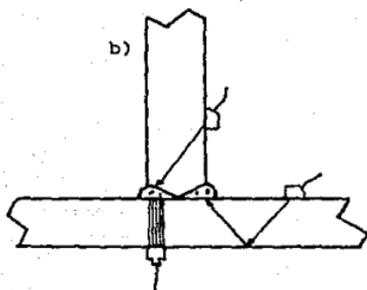
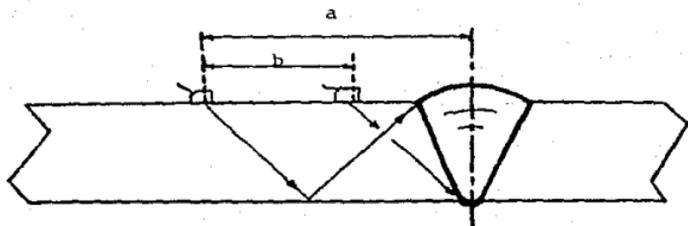
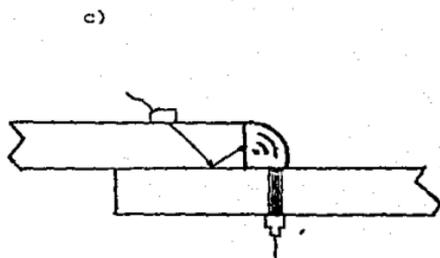


Figura 4.9

a) Soldadura a tope



SOLDADURA EN RINCON



SOLDADURA A SOLAPE

Figura 4.10

ción de las indicaciones ultrasónicas para dilucidar qué tipo de defectos las produce, no es tarea fácil en la mayoría de los casos y requiere un operador experto en esta técnica. Esta interpretación se ve complicada por la aparición de indicaciones de carácter geométrico producidas por el sobreespesor y descuelgos del cordón de raíz. De aquí - que las soldaduras de gran responsabilidad en donde se realiza un amoldado de ambas superficies permitan un ensayo más confiable.

Las soldaduras de fuerte espesor, como son las realizadas en componentes nucleares pesados, tienen menos dificultades de examen, aunque este sea más lento, que las realizadas en espesores pequeños.

Por las propias características de este tipo de ensayo, son más fáciles de detectar defectos bidimensionales que tridimensionales, todo lo contrario de lo que sucede con la radiografía. De aquí, que los defectos más probables de detección son las grietas y faltas de fusión y penetración, mientras que la escoria y la porosidad, particularmente ésta última, presenta dificultades de detección. La especificación E 164-87 del A.S.T.M. trata de este tipo de inspecciones.

4.5.4 Examen de soldaduras de aceros inoxidables.

Un ejemplo típico de dificultades de examen ultrasónico por efectos de la microestructura del material o soldadura examinados es el caso de las uniones de aceros inoxidables austeníticos. El examen de soldaduras de aceros al carbono y aleados no presente mayores problemas técnicos, supuesto un procedimiento de examen adecuado y un operador experto. Por el contrario el examen de soldaduras de acero inoxidable austenítico, tan frecuentes en la tecnología nuclear, tiene serios problemas como consecuencia de la importante dispersión ultrasónica producida en la zona de soldadura.

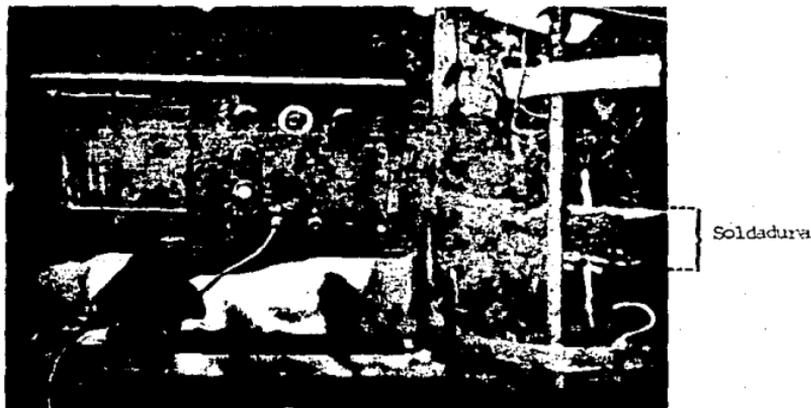
Esta dispersión ultrasónica es consecuencia de los siguientes fenómenos:

- La anisotropía acústica de la austenita es más alta que la de la ferrita. Esto significa que las variaciones de impedancia acústica de un grano de austenita (monocristal) según la dirección cristalográfica del mismo son más altas que las correspondientes a los gra-

nos de ferrita.

- El tamaño de grano y la configuración del mismo son distintos en ambos casos.

Las anteriores causas unidas a otras posibles todavía no bien conocidas hacen que el examen ultrasónico de estas soldaduras requiera el empleo de palpadores especiales que mejoran las condiciones de examen (disminuyen la dispersión) pero en cualquier caso las posibilidades y sensibilidad del mismo son inferiores a las correspondientes en aceros al carbono.



La fotografía anterior muestra la aplicación de la técnica de ultrasonido en la inspección de uniones soldadas.

4.6 MÉTODOS E INSTRUMENTOS

4.6.1 Palpadores.

El palpador juega un papel fundamental en un ensayo de materiales por ultrasonidos. De su correcta selección y aplicación depende en gran parte la validez de los resultados obtenidos. Del palpador depende la frecuencia de las ondas, anchura del impulso (resolución), geometría del haz y energía transferida al cuerpo a ensayar. Las anteriores variables o parámetros se ven también influenciadas por el equipo electrónico generador-detector de impulsos, pero no de una forma tan esencial como las condiciona el palpador.

En su concepción más sencilla un palpador consta de las siguientes partes: cristal piezoeléctrico, amortiguador, carcasa, zapata y conector ver fig. 4.11. Del tipo de cristal seleccionado y de la forma de realizar el montaje de las anteriores partes, dependerán las características del palpador resultante.

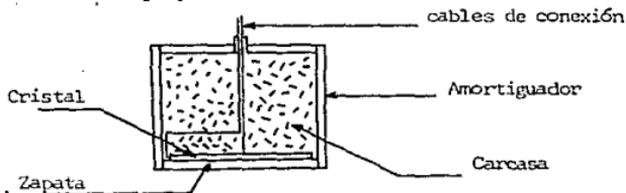


Figura 4.11

En la mayoría de los casos el palpador está acoplado eléctricamente al equipo por medio de un pequeño transformador, que a veces está alojado dentro de la carcasa del mismo y otras en el conector del cable de conexión al equipo electrónico.

El amortiguador que se pega fijamente al cristal por la cara opuesta a la del contacto con la pieza a ensayar, desempeña dos funciones claramente definidas. La primera de ellas es la de amortiguar las oscilaciones del cristal, de forma que cuando este sea excitado por el impulso eléctrico no vibre libremente, con el fin de obtener impulsos -

ultrasonicos que den buena resolución para detectar defectos próximos; La segunda función es la de absorber las ondas emitidas por la cara opuesta a la de contacto para no tener interferencias y ecos parásitos que podrían dificultar la interpretación de los resultados.

Los amortiguadores suelen hacerse con mezclas de resinas polimerizantes y polvo de material de alta densidad, tungsteno por ejemplo.

La zapata es una ligera lámina de material plástico o similar que se adhiere por la cara útil de emisión con el fin de proteger el material piezo eléctrico del roce con el material a ensayar. Por último la carcasa, hilos de conexión y conector tienen claras funciones que es por demás explicar.

4.6.2 Tipos de palpadores.

Basándose en su utilización, los palpadores pueden clasificarse en cuatro grandes grupos:

- a) Normales
- b) Angulares
- c) Emisión-recepción independiente (bicristales)
- d) Especiales

A su vez cada uno de estos grupos puede subdividirse según sus características de frecuencia, tamaño, etc. , en los siguientes tipos.

4.6.2.1 Palpadores normales.

Estos palpadores, cuyo esquema se muestra en la página 100, emiten un haz de ondas longitudinales perpendicular a la superficie de contacto. El cristal suele ser un disco piezoeléctrico de diámetro comprendido entre 5 y 40 mm. Las frecuencias más utilizadas son 2MHz y 4 MHz, aunque existen palpadores normales dentro de la gama de 0.5-15 MHz. Son ampliamente utilizados en la inspección de productos colados, forjados, laminados y a veces en el ensayo de soldaduras.

4.6.2.2 Palpadores angulares.

En estos palpadores el cristal se encuentra pegado a una cuña de

acrílico (perspex) o material similar, fig. 4.12 de forma que el haz emitido incide sobre la superficie del material según un ángulo dado, en donde por efectos de los modos de conversión ya descritos, se transforma en un haz de ondas transversales de ángulo de refracción que depende del ángulo de la cuña y de los materiales de la misma y de la pieza a ensayar.

Los ángulos en acero más utilizados son 45°, 60°, 70° y 80°. Es tos palpadores son muy utilizados en el ensayo de soldaduras.

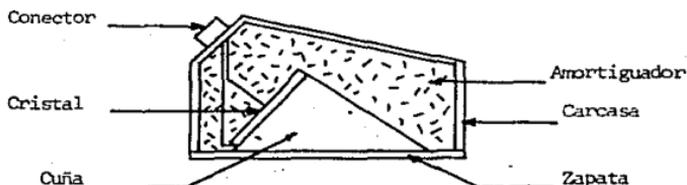


Figura 4.12

4.6.2.3 Palpadores emisor-receptor independiente.

Estos palpadores, fig. 4.13 poseen dos cristales independientes, uno emisor y otro receptor, montados generalmente sobre dos bloques de perspex separados por una pared delgada de gran absorción. Los bloques de perspex presentan un pequeño ángulo con respecto a la normal que hace que los haces emitidos, en el supuesto que ambos emitieran - presentan una convergencia dentro del material a ensayar. Se utilizan principalmente para medir espesores y detección de defectos próximos a la superficie.

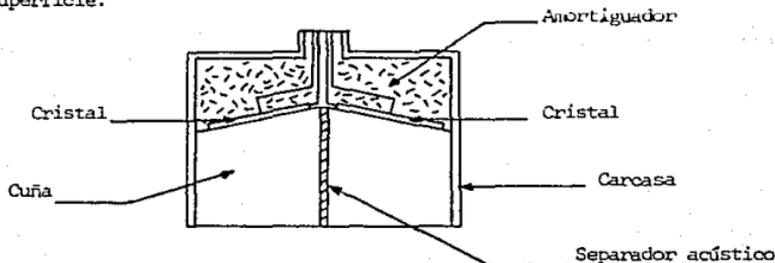


Figura 4.13

4.6.2.4 Palpadores especiales.

Determinados tipos de problemas de ensayo requieren palpadores con configuraciones especiales ya sea en su geometría o en la disposición del cristal o cristales.

4.6.3 Características de los palpadores.

Las características más importantes y que determinan la calidad y aplicación de un palpador dado son:

- a) Frecuencia
- b) Resolución
- c) Sensibilidad
- d) Angulo
- e) Campo emitido
- f) Dimensiones

A la hora de elegir un palpador determinado para un ensayo dado, deberán tenerse en cuenta estas características en función de la naturaleza, estructura y geometría del componente a ensayar.

a) Frecuencia.- La frecuencia de un palpador (frecuencia de las ondas emitidas), depende del espesor y naturaleza del cristal de cuarzo, titanato de bario, etc.). Las frecuencias más usuales son de dos y - cuatro MHz, pero suelen emplearse otras frecuencias dentro del margen 0.5-15 MHz. Se debe tener en cuenta que a mayor frecuencia del palpador, mayor sensibilidad de detección, menor divergencia y menor penetrabilidad (mayor atenuación) de las ondas.

b) Resolución.- Esta característica es la que determina el que puedan diferenciarse los ecos procedentes de defectos próximos en profundidad. La resolución de un palpador depende del amortiguador, zapa-ta, naturaleza del cristal y frecuencia. (Figura 4.14).

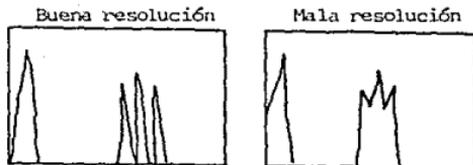


Figura 4.14

c) Sensibilidad.- La sensibilidad de un palpador determina su capacidad para transformar energía eléctrica en mecánica y viceversa. Un palpador de alta sensibilidad permite disponer de un margen de amplificación adicional en el equipo, lo que facilita los ensayos de materiales de fuerte espesor o alta atenuación. La sensibilidad de un palpador no debe de ser confundida con la sensibilidad de detección que se expresa en tamaño del defecto mínimo detectado.

4.6.4 Metodos de ensayo.

La aplicación de ondas ultrasónicas para ensayo de materiales - puede hacerse según diferentes métodos o técnicas que se explicaran mediante este apartado. La elección de uno u otro método dependerá de las características geométricas y estructurales, de los defectos más probables, de la accesibilidad, etc. En general, y de acuerdo con el grado de responsabilidad del componente, se adaptará la solución más adecuada en función de todas las circunstancias concurrentes. Las principales técnicas o métodos, que a su vez pueden adoptar diferentes variantes, son:

- a) Método por reflexión o eco.
- b) Método por transmisión.
- c) Método por resonancia.

4.6.4.1 Método por reflexión.

Esta técnica de ensayo es la más utilizada en la práctica por su

utilidad y sencillez de aplicación e interpretación. En general suele utilizarse un sólo palpador que emite y recibe las ondas, aunque a veces pueden emplearse dos o más palpadores. La fig. 4.15, muestra diversas posibilidades de aplicación de este método. El caso a) es el típico de ensayo de chapas, productos forjados, etc. En el b) tenemos el ensayo con dos palpadores independientes, para detección de grietas que forman ángulo con la dirección del haz. La configuración c) es la típica de ensayo de soldaduras con un palpador, mientras que el d) nos presenta el mismo ensayo para detección de grietas en el centro del cordón, faltas de penetración en soldaduras en X, etc. La principal característica de este método radica en el hecho de ser las ondas reflejadas (eco) en defectos y contornos del material las que son detectadas y visualizadas. Presenta como mayor inconveniente su dependencia de la orientación de defectos, lo cual es más patente en componentes pesados, de aquí que la filosofía de las disposiciones b) y c) tengan más interés que el que hasta la fecha se le viene prestando. La información a analizar en un ensayo por este método es: posición del palpador, amplitud de eco recibido, recorrido de las ondas en el material y forma del impulso.

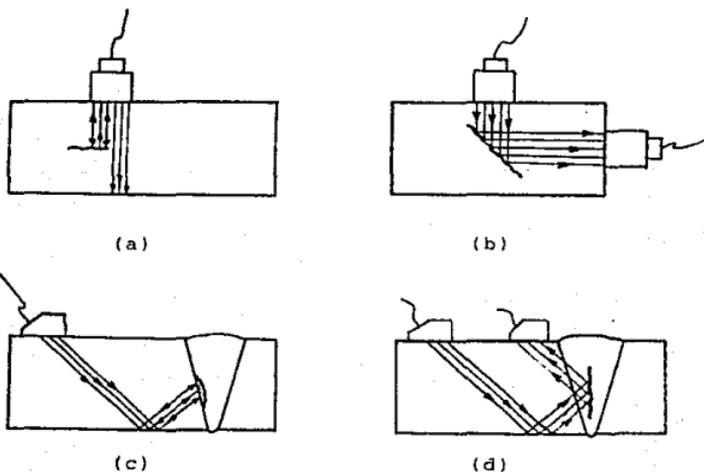


FIGURA 4.15

4.6.4.2 Método por transmisión o transparencia.

Este procedimiento es poco utilizado manualmente, aunque presenta interés en sistemas automáticos para detectar defectos y controlar el acoplo acústico y transmisividad de las ondas. En la fig.4.16 se presenta gráficamente las características del método.

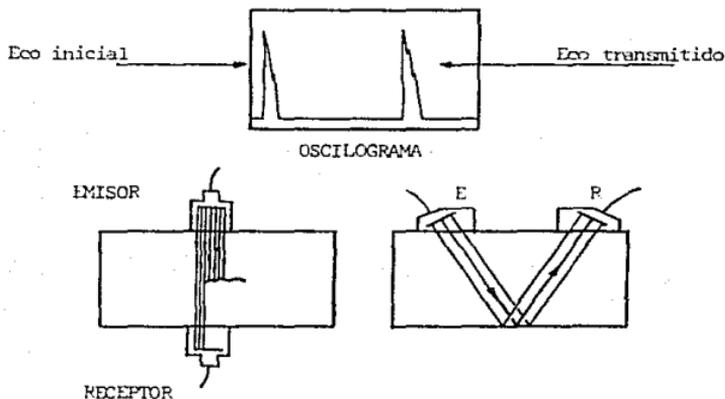


FIGURA 4.16

El método se fundamenta en las variaciones que se producen en la transmisión de energía ultrasónica como consecuencia de la presencia de defectos, variaciones que quedan registradas por la indicación o impulso de pantalla. Los principales inconvenientes del método son:

- Los defectos no pueden ser localizados en profundidad ya que sólo se registra el impulso transmitido cuya posición sólo depende del espesor de la pieza.
- La necesidad de mantener el palpador emisor y el palpador receptor perfectamente alineados, hace que este procedimiento sea lento y tedioso en ensayos manuales.

- Existe una gran influencia del acoplo palpador-pieza que a veces, puede ser confundida con la presencia de defectos.
- Accesibilidad de ambos lados de la pieza para la mayoría de los casos.
- Existe gran dificultad de interpretación del tipo de defecto.

Sin embargo, algunas de las anteriores limitaciones desaparecen en ensayos automáticos en inmersión.

4.6.4.3 Método de resonancia.

Se utiliza fundamentalmente para medida de espesores.

Se apoya en el fenómeno de resonancia que se produce en un tubo o lámina cuando el espesor es igual o múltiplo de una semilongitud de onda. En estos casos, la absorción y cesión de energía del y al palpador es superior a la normal, por lo que da lugar a una indicación que puede ser registrada en un aparato de medida de aguja o tubo de rayos catódicos. Su empleo es prácticamente muy reducido y especializado.

4.6.5 Ensayos por contacto y en inmersión.

Las anteriores técnicas o métodos de ensayo pueden clasificarse, a su vez en dos grandes grupos de acuerdo al procedimiento de establecer el acoplo acústico entre el palpador y la pieza: ensayos por contacto y ensayo en inmersión.

En los ensayos por contacto el palpador se apoya sobre la pieza a través de una delgada película de aceite, agua, glicerina u otro agente acoplante (el aire no transmite los ultrasonidos de alta frecuencia, de aquí esta necesidad).

La fig. 4.17 muestra este procedimiento. En este caso el impulso inicial y el eco de superficie se superponen. La rugosidad de la pieza, óxido, pintura, etc., dificultan muchas veces el movimiento del palpador y la existencia de una buena transmisión acústica.

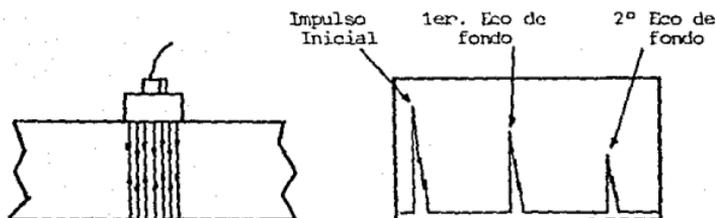


Figura 4.17

En los ensayos de inmersión el acoplo acústico entre el palpador y la pieza se realiza a través de un camino previo en agua. En estos casos el eco de superficie se encuentra separado del impulso inicial una distancia que depende de este camino previo en agua que han de recorrer los impulsos. La fig. 4.18, nos muestra esta posibilidad de ensayo. La existencia de un recorrido inicial en agua supone que el ensayo de la pieza puede hacerse utilizando una zona lejana del haz, con tal que este recorrido sea lo suficientemente grande para que sea superior a la longitud del campo próximo en agua.

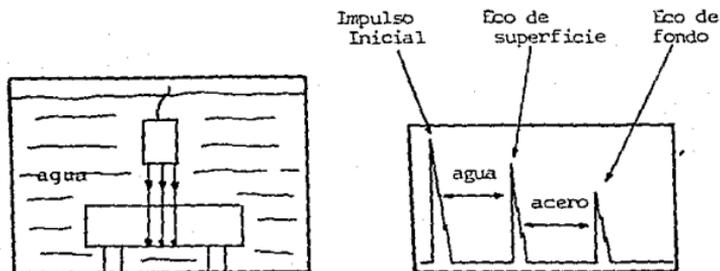


Figura 4.18

Las ventajas de los ensayos en inmersión, cuando son posibles, radican en la existencia de un acoplante unifonne, posibilidad de focalizar el haz ultrasonoro, posibilidad de automatizar fácilmente el ensayo y de registrar resultados.

Estos ensayos pueden clasificarse en dos clases: ensayos de inmersión total y ensayos de inmersión local. En los primeros la pieza se introduce en una cuba llena de agua y es explorada por el palpador, - bien por movimiento de este o de la pieza. En los segundos el acoplo acústico se hace por medio de una columna de agua, inmersión parcial, etc.

4.6.6 Ensayos manuales y automáticos.

En general el ensayo de un componente o pieza por ultrasonidos supone un movimiento palpador-pieza que permita una exploración total de la zona a controlar por el haz ultrasonoro. Este movimiento puede ser manual o automático.

Los ensayos manuales son del tipo de contacto y, generalmente, utilizan la técnica de reflexión o eco. El operador traslada el palpador sobre la pieza por deslizamiento o contactos sucesivos. Ante una indicación de defectos u otras causas, el operador puede detenerse y explorar más detenidamente la zona sospechosa, registrando toda la información (amplitud, forma del eco, posición, etc.) en un cuaderno o formato especial. En lo anteriormente expuesto radica la mayor ventaja de este tipo de ensayo. Otro aspecto positivo es la rápida puesta en marcha y sencillez de equipo: aparato de ultrasonidos, palpador, acoplante y pieza patrón. Como principales desventajas presenta: lentitud de operación, variaciones en el acoplo acústico por diferente presión de la mano o falta de acoplante, y necesidad de un operador responsable y experimentado. Sin embargo, los ensayos manuales son los únicos posibles en muchos ensayos en obra.

Los ensayos automáticos suponen la utilización de un dispositivo mecánico o electromecánico que mueve el palpador según trayectorias y - velocidad controladas. Otras veces el palpador se encuentra fijo y es

la pieza la que se mueve, lo cual presenta ya una ventaja con respecto a los ensayos manuales. Este tipo de ensayo puede ser por contacto o en inmersión, siendo en esta segunda técnica, inmersión, donde alcanza sus máximas posibilidades y donde son más utilizados. La automatización de ensayos es muy adecuada para controlar componentes de geometría sencilla (tubos, palanquilla, chapas, etc.) y producidos en grandes series. Como mayores ventajas presenta las siguientes:

- Rapidez de ensayo.
- Acoplo palpador-pieza uniforme.
- Registro automático de datos.
- Clasificación automática de componentes.
- Objetividad de resultados.
- Empleo simultáneo de varios palpadores.

Estos ensayos requieren dispositivos electromecánicos, máquinas de barrido, que en la mayoría de los casos son costosos.

CAPITULO 5

RADIOGRAFIA

5.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

5.1.1 Partículas elementales.

El electrón.- El electrón es la partícula más pequeña cargada eléctricamente. En 1750, Benjamín Franklin sugirió que la corriente eléctrica no era un proceso continuo, sino que se componía de un gran número de cargas discretas.

El electrón tiene una carga negativa de 1.6×10^{-19} culombios y una masa de 9.107×10^{-28} gramos y su radio es de 2.818×10^{-13} cm.

El protón.- El protón es la partícula más pequeña cargada eléctricamente positiva. Su carga por lo tanto es igual a la del electrón pero de signo contrario. Tiene una masa de 1.673×10^{-24} gramos y su radio es de 1.534×10^{-16} cm.

El neutrón.- El neutrón es una partícula pequeña sin carga eléctrica, cuyo peso es igual al del protón. Su radio es de 1.532×10^{-16} cm.

El positrón.- Es una partícula elemental de las mismas características que el electrón pero con carga positiva.

5.1.2 Estructura de la materia.

Se define como elemento a la sustancia que no puede ser químicamente descompuesta en otras sustancias. Hasta la fecha existen 98 - elementos básicos cuya existencia está confirmada si bien se han descubierto recientemente algunos otros.

Todos los elementos poseen una estructura general equivalente. - En efecto, cualquier elemento está formado por átomos. Cada átomo está constituido por un núcleo y una corteza. En su concepto clásico, en el átomo, los electrones a modo de pequeños planetas, orbitan alrededor del núcleo, formando una corteza electrónica cuya estructura, más o menos complicada, está compuesta por una o varias capas electrónicas.

5.1.3 Número atómico y número másico.

En el núcleo se encuentran alojados los protones y neutrones. El

elemento que posee un núcleo más pequeño es el hidrógeno compuesto - por un solo protón. El número total de protones y neutrones existentes en el núcleo de un elemento se denomina número másico y se le denomina con la letra A y es el número entero más próximo al de la masa atómica del elemento.

Los átomos de los elementos tienen en su corteza el mismo número de electrones que el de protones del núcleo. La distribución de los electrones de la corteza se realizan según las capas K L M.....Q. Los electrones de la capa K son los más próximos al núcleo y los de mayor energía. El número de electrones existentes en la corteza y que es igual al de protones del núcleo se designa con la letra Z y se denomina número atómico del elemento.

5.1.4 Isótopos

En los elementos más ligeros, el número de protones del núcleo es igual al de neutrones. Sin embargo, en los elementos más pesados, como el Uranio ${}_{92}^{232}\text{U}$ ($A = 232$; $Z = 92$) el núcleo contiene más neutrones que protones. Esta singularidad da lugar a que existan distintas variedades de un mismo elemento químico con igual número de protones pero con diferente masa y que se conocen con el nombre de isótopos.

5.1.5 Radiación electromagnética.

En 1895 el físico alemán Roentgen, durante sus experiencias de descargas eléctricas de alto voltaje en tubos gaseosos, descubrió los rayos X. Los electrones eran emitidos por un cátodo y acelerados hacia un blanco o anticátodo sobre el que incidían a gran velocidad. Durante el bombardeo del anticátodo se emitía una radiación penetrante de elevado poder de penetración.

Al poco tiempo, se empezó a utilizar esta radiación para examinar el cuerpo humano y toda clase de materiales.

Años más tarde se ha sabido que la radiación X y por tanto la electromagnética, está constituida por fotones que tienen la propiedad de su dualidad onda-corpúsculo. Planck postuló que la energía de un fotón está contenida en un cuanto o paquete de radiación y es proporcional a

su frecuencia de acuerdo con la ecuación:

$$E = \nu H$$

Siendo: E = Energía asociada al cuanto.

H = Constante de Planck.

ν = Frecuencia.

Toda energía radiante tiene características comunes y únicamente varía su frecuencia.

Los fotones pues, tienen la misma velocidad y no poseen ni momento magnético ni carga eléctrica y sus características son las siguientes:

| | |
|------------------------|---------------------|
| Velocidad | c |
| Frecuencia | $\nu = c/\lambda$ |
| Longitud de onda | $= c/\nu$ |
| Masa | $\frac{H \nu}{c^2}$ |
| Energía | νH |

Por tanto los rayos X, los rayos gamma, la radiación calorífica, la luz sensible y las ondas de radio son radiaciones electromagnéticas de la misma naturaleza cuyo cuerpo radiante se emite de forma discontinua en paquetes de "cuantos".

5.1.6 Rayos "X" y rayos Gamma.

Los rayos X se producen como consecuencia del choque de los electrones contra los átomos del elemento del ánodo o anticátodo. Las principales propiedades de los rayos X con las siguientes:

- 1) Los rayos son invisibles.
- 2) Se propagan en cuantos.
- 3) La propagación es en línea recta.

- 4) Su velocidad de propagación es igual a la de la luz.
- 5) No se desvían por lentes o prismas.
- 6) Se desvían únicamente por redes cristalinas (difracción).
- 7) Atraviesan la materia.
- 8) Son ionizantes, o sea, liberan electrones de la materia.
- 9) Ejercen efectos perjudiciales sobre los tejidos vivos.
- 10) Impresionan placas fotográficas.

Los rayos gamma son radiaciones electromagnética de naturaleza igual a la de los rayos X. Se producen durante la desintegración de los núcleos atómicos de elementos radiactivos y su intensidad no es regulable como la de los rayos X.

5.1.7 Unidades de radiación.

Roentgen.- Se denomina Roentgen a la unidad de medida de radiación X o gamma definida como la cantidad de radiación que produce una unidad electrostática de carga en 1 cm^3 de aire en condiciones normales de presión y temperatura.

Rem.- El Rem (Roentgen equivalent man) es la medida de radiación para el hombre y define los efectos biológicos de la radiación en el hombre. Representa la dosis absorbida en Rads multiplicada por el efecto biológico de la radiación absorbida.

Rad.- El RAD (Radiation absorbed dose) es la unidad de medida de la absorción de la radiación por el hombre. Representa la absorción de 100 Ergios de energía por gramo de material irradiado.

Rbe.- El valor asignado a los varios tipos de radiación, determinado por los efectos de la radiación en el cuerpo humano se llama Rbe (relative biological effectiveness).

5.2 GENERALIDADES.

La radiografía es un método que se utiliza en la inspección no destructiva de componentes y ensambles, el cual se base en la absorción diferencial de radiación penetrante por la pieza u objeto de prueba que está siendo inspeccionada. Debido a las diferencias en densidad, y variaciones de espesor de la pieza, o a diferencias en cuanto a las características de absorción originadas por variaciones en su composición, partes diferentes de una pieza absorben cantidades diferentes de radiación penetrante. La radiación no absorbida que atraviesa la pieza, se puede gravar en una película de papel fotosensitivo, visto en una pantalla fluorescente, o bien operada por varios tipos de detectores electrónicos de radiación. Cuando la inspección incluye la absorción directa de una imagen en el preciso momento de la inspección mediante una pantalla fluorescente, el proceso se denomina fluoroscopia. Cuando los instrumentos electrónicos se utilizan para medir la intensidad de la radiación, el proceso recibe el nombre de radiación de medición. Todos los términos arriba mencionados se utilizan principalmente en relación con la inspección que incluye la radiación electromagnética penetrante en forma de rayos X o bien rayos gamma. La radiografía con neutrones se refiere a la inspección radiográfica que utiliza una corriente de electrones en lugar de radiación electromagnética.

Este capítulo abarca principalmente la radiografía utilizando rayos gamma γ (Gammagrafía).

En la radiografía convencional se bombardea un objeto con haz de rayos X o gamma y la porción de la radiación que no es absorbida por la pieza, incide en una parte de la película radiográfica. La radiación no absorbida expone la emulsión de la película, de manera similar en que la luz expone la película en la fotografía. El revelado de la película produce una imagen que es una (sombra-imagen) bidimensional del objeto. Las variaciones en la densidad, espesor y composición del objeto que esta siendo inspeccionado ocasiona variaciones en la intensidad de la radiación no absorbida y aparecen como variaciones en la densidad fotográfica (sombras grisáceas) en el revelado de la película

la evaluación de la radiografía se basa en la comparación de las diferencias de densidad fotográfica, con las características conocidas del objeto en si o con patrones establecidos de las radiografías de objetos similares de calidad aceptable.

El uso de los rayos X o gamma como un método de inspección no destructivo puede resultar peligroso. Por ejemplo, tal radiación puede producir daños biológicos a los tejidos del cuerpo, las células sanguíneas, los cristalinios del ojo y ciertos órganos internos que son particularmente sensitivos a la radiación. En consecuencia es necesario un estricto control en cuanto a la exposición del cuerpo humano a las radiaciones.

5.3 USOS DE LA RADIOGRAFIA.

La radiografía se utiliza para detectar las características de un componente o ensamble que exhibe una diferencia en espesor o densidad física comparada con el material restante. Las grandes diferencias se detectan más fácilmente que las pequeñas. En general, la radiografía puede detectar solo aquellas características, que tengan una densidad perceptible en una dirección paralela al haz de radiación. Esto significa que la capacidad del proceso para detectar discontinuidades aplanadas como lo son fisuras y/o grietas, dependen de la orientación adecuada de la pieza de prueba durante la inspección. Las discontinuidades tales como porosidad e inclusiones, que tienen espesor medible en todas direcciones, se pueden detectar ya que no son demasiado pequeñas en relación al espesor. En general, las características que se pueden detectar son las que exhiben un dos por ciento o una mayor diferencia de absorción-comparada con el material restante aunque ninguna está limitada a la detección de defectos internos, la radiografía y los ultrasonidos son dos de los métodos que generalmente se usan en la inspección no destructiva y que pueden detectar satisfactoriamente defectos que son completamente internos y localizados muy abajo de la superficie. Ninguno de los dos métodos esta limitado a la detección de tipos específicos de fallas internas, pero la radiografía es más efectiva cuando dichas fallas no son planas mientras que el ultrasonido es más efectivo cuando las fallas son planas.

En comparación con otros métodos no destructivos que se utilizan (por ejemplo partículas-magnéticas y líquidos penetrantes). La radiografía tiene tres ventajas principales: la capacidad de detectar fallas internas, una capacidad de detectar variaciones significativas en composición y una grabación permanente de información.

5.4 APLICACION.

La inspección radiográfica se utiliza extensamente en fundición y en soldaduras, particularmente donde hay necesidad crítica de asegurar que no existen fallas internas. Por ejemplo, la radiografía con frecuencia se recomienda para la inspección de una pared de gran espesor fundiciones y soldaduras para equipos de vapor (componentes y ensambles de calderas y turbinas) y otros sistemas de alta presión. La radiografía también se puede usar en forjas. Ciertos dispositivos especiales se inspeccionan más satisfactoriamente por la radiografía que por otros métodos. Por ejemplo, la radiografía encaja perfectamente en la inspección de fisuras en aparatos semiconductores, cables rotos, conexiones de soldadura y de componentes mal colocados; mientras que otros métodos están limitados en su capacidad de inspeccionar aparatos semiconductores.

La sensibilidad de la radiografía de rayos X, la fluoroscopia de rayos X y la radiografía de rayos gamma para diversos tipos de fallas depende de muchos factores, incluyendo el tipo de material, tipo de falla y la forma del producto.

La radiografía se puede aplicar para inspeccionar la mayor parte de materiales sólidos, con la posible excepción de materiales de muy alta o muy baja densidad. Sin embargo en estos casos la radiografía de neutrones se aplica usualmente.

Las aleaciones ferrosas y las aleaciones no ferrosas se pueden radiografiar al igual que los materiales no metálicos y los compuestos.

Hay una amplia gama en espesores de metales que se pueden inspeccionar y en técnicas que se pueden aplicar. Numerosas técnicas y dispositivos especiales se han desarrollado para la aplicación de la radiografía, a problemas de inspección específicos incluyendo la inspección de materiales radioactivos. La mayoría de estas aplicaciones -

especializadas no se tratan en este artículo, pero varias de ellas se pueden encontrar en artículos de este volumen que trata del uso de la radiografía en inspección de formas de productos específicos.

5.5 LIMITACIONES.

Comparado con otros métodos de inspección no destructivos la radiografía es costosa. Para montar un laboratorio radiográfico se requiere de una gran inversión, un amplio espacio, un equipo intensificador de imágenes y una estación fluoroscópica. Por otro lado, cuando se utilizan fuentes de rayos X o gamma portátiles, el costo puede ser relativamente bajo, y el espacio requerido es sólo para el procesamiento y la interpretación de la película. Los costos de operación pueden ser altos, algunas veces hasta el 60% del tiempo de toda la inspección se utiliza para montar la radiografía. Con la fluoroscopia, los costos de operación son generalmente menores, ya que el montaje requiere de menos tiempo y no hay costos extra para el procesamiento y la interpretación de la película.

Una inspección de campo de secciones de gran espesor es un proceso de consumo de tiempo. Las fuentes portátiles de rayos X emiten una radiación baja de energía, hasta 300 kev y también están limitadas a la intensidad de radiación suministrada. Estas dos características de las fuentes portátiles combinadas con el límite de la radiografía de rayos X en el campo a las secciones que tienen una absorción equivalente a tres pulgadas de acero o menos. Las fuentes radioactivas también están limitadas en el espesor que puede ser inspeccionado, primeramente porque las fuentes de alta actividad requieren de protectores pesados para la seguridad del personal. Este limita el campo de aplicación a las fuentes de menor actividad que se pueden transportar en recipientes de poco peso. Debido a que las fuentes portátiles de rayos X y gamma están limitadas en cuanto a la radiación emitida efectiva, el tiempo de exposición es mayor para las secciones de mayor espesor. Algunas veces se necesitan de varias horas para una exposición, lo que significa que el personal de producción tenga que permanecer retirado de sus actividades de trabajo normales durante periodos prolongados--- mientras la radiografía esta en proceso.

Algunos tipos de fallas son difíciles de detectar con la radiografía. Así fisuras no se pueden detectar a menos que estén esencialmente paralelas al haz de radiación. Las fisuras gruesas en las secciones de gran espesor generalmente no se pueden detectar, incluyendo cuando están bien orientadas. Algunas discontinuidades tales como inclusiones en un material colado, hojuelos, microporosidades y microfisuras no se pueden detectar a menos que estén lo suficientemente segregadas para producir un efecto grueso detectable, las laminaciones son casi imposibles de detectar con la radiografía; debido a sus orientaciones desfavorables las laminaciones no producen diferencias en absorción que faciliten su detección de entre las áreas no laminadas.

Es bien sabido que las dosis diferentes de rayos X o gamma pueden dañar la piel y las células sanguíneas, pueden producir ceguera y esterilidad, y las dosis masivas pueden causar severas incapacidades e o incluso la muerte. La protección del personal, no sólo aquellos que están en constante relación con el trabajo radiográfico, sino también aquellos que se encuentran en las cercanías de la inspección radiográfica, es de vital importancia.

Los requerimientos de seguridad son establecidos por coacciones económicas y operacionales en el uso de la radiografía para inspección.

5.6 PRINCIPIOS DE RADIOGRAFIA.

Tres elementos básicos (una fuente de radiación o medida de prueba, la pieza de prueba u objeto a evaluar y un medio de grabación-- (generalmente una película) son los que se combinan para producir una radiografía. Estos elementos se muestran esquemáticamente en la figura 5.1 de la página 121.

En esta figura, el objeto de prueba es una placa de espesor variable que contiene una falla interna con características de absorción diferentes a la del material restante. La radiación emitida por la fuente es absorbida por el objeto de prueba con forme pasa a través de éste; la falla y el material restante absorben diferentes cantidades de radiación por lo tanto, la cantidad de radiación que choca en la película en el área de bajo de la falla es diferente a la de las áreas adyacentes. Esto produce una imagen latente de la falla en la película, cuando se revela ésta, se puede ver una sombra de la diferente densidad fotográfica a la de la imagen del material restante.

5.7 RADIACION

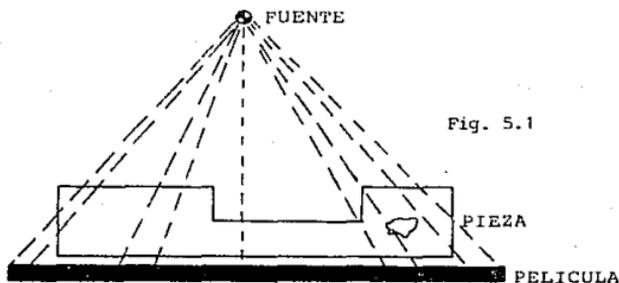
5.7.1 Penetración de la radiación y absorción diferencial.

Como ya se ha indicado una de las características de la radiación X y gamma es su capacidad de atravesar la materia.

Quando un haz de radiación atraviesa la materia parte de esta radiación es absorbida y otra parte logra atravesar el objeto. La absorción que presenta un objeto a la radiación es función:

- Del espesor a atravesar.
- De la densidad del material.

La intensidad de radiación emergente varía pues de una zona a otra del objeto. Esta variación puede detectarse y registrarse en una película fotográfica, tal y como se muestra en la figura 5.1



La técnica radiográfica se hará en la cantidad de penetración de rayos X y gamma y en la absorción diferencial que presente la materia.

El poder de penetración de los rayos X y gamma aumenta con su -- energía, la cual es inversamente proporcional a la longitud de onda de la radiación. Así, se denomina radiación "blanda" a la longitud de onda larga y dura a la longitud de onda corta.

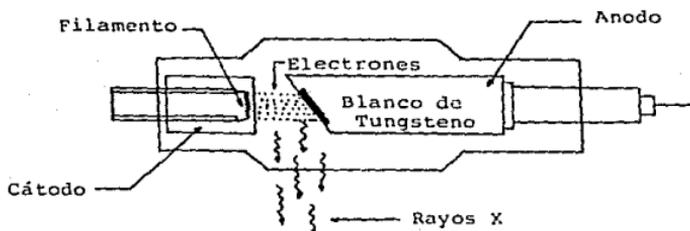
5.7.2 Fuentes de radiación.

Rayos X.- Los rayos X se generan acelerando los electrones, emitidos por efecto termiónico en el cátodo, hacia un ánodo o anticátodo

constituido por un elemento de elevado peso atómico.

La figura 5.2, representa el esquema de un tubo de rayos X.- El cátodo es un elemento o filamento que se pone incandescente durante

Figura 5.2

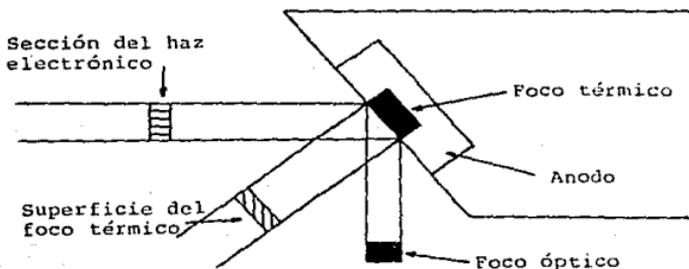


el paso de una corriente eléctrica, emitiendo una onda de electrones.- Estos electrones son acelerados hacia el anticátodo o ánodo al aplicar una diferencia de potencial entre ambos (ver la figura anterior). La corriente electrónica se concentra hacia el ánodo por medio de una cúpula de concentración.

El ánodo es una pastilla de metal de punto de fusión elevado y número atómico alto. La energía y por tanto el poder de penetración de los rayos X, es función del número atómico del ánodo. Normalmente el ánodo es de tungsteno cuyo elevado punto de fusión (3400°C .) le hace útil para el fin destinado ya que, solamente de un 0.1 a un 2% de la energía cinética de los electrones se convierte en radiación, transformándose el resto en calor.

La superficie del anticátodo en la que inciden los electrones, se llama foco térmico y debe ser lo más pequeña posible para lograr una mejor calidad de imagen, si bien los focos pequeños son difíciles de conseguir por el peligro de fusión del metal en ese punto. La proyección del foco térmico sobre un plano perpendicular al eje del haz radiante (Ver la figura 5.3) se llama foco óptico.

Figura 5.3



El calor producido durante la formación de rayos se disipa mediante la refrigeración adecuada del ánodo. La refrigeración del ánodo puede hacerse:

- Por radiación.
- Por convección.
- Por circulación forzada de líquidos.

Normalmente se utiliza el sistema de convección que consiste en que el tubo de rayos X va sumergido en aceite y el calor se disipa por convección hacia el fluido refrigerante.

5.7.3 Intensidad de la radiación.

La intensidad de la radiación es función de la corriente suministrada al filamento y se expresa en mA.

El poder de penetración o calidad de la radiación es función de la tensión entre cátodo y ánodo. El poder de penetración depende por tanto del kilovoltaje aplicado al tubo, ya que la velocidad de los electrones y por tanto su energía cinética ($E_c = \frac{1}{2} m v^2$) aumentan con la tensión del tubo.

5.8 FUENTES RADIATIVAS

5.8.1 Rayos gamma.

Los rayos gamma se producen durante la desintegración de los átomos de los isótopos radiactivos.

Con el nombre de radiactividad se conoce la propiedad de ciertos cuerpos de emitir, en forma espontánea, rayos alfa, beta y gamma. Los rayos alfa son núcleos de helio y aunque son de cuerpo elevado su poder de penetración es pequeño. Los rayos beta son electrones y su poder de penetración es igualmente pequeño.

La radiación gamma es una radiación electromagnética, de la misma naturaleza que la de los rayos X pero en general de longitud de onda más corta.

Aunque en la naturaleza existen varios elementos radiactivos, los isótopos utilizados en radiología industrial son generalmente obtenidos artificialmente.

Generalmente los isótopos radiactivos utilizados industrialmente, son obtenidos por irradiación neutrónica. Los procesos de captura de neutrones por el medio estable del elemento, se efectuará con arreglo a los siguientes procesos:

a) Iridio 191



b) Cobalto 59



5.8.2 Características de los isótopos radiactivos.

Actividad.- Se denomina actividad de un isótopo radiactivo, el número de átomos del isótopo que se desintegran por unidad de tiempo.

La actividad se mide en curies (c) o en millicuries (10^{-3} curies). - El curie se define como la cantidad de elemento radiactivo para el cual el número de desintegraciones es 3.7×10^{10} por segundo.

El curie se define también como la velocidad a la que se desinte

gra 1 gr. de radio.

Período.- Se llama período de un elemento radiactivo el tiempo - transcurrido para que la actividad se reduzca a la mitad.

| <u>Isótopo</u> | <u>Período</u> |
|----------------|----------------|
| Ir 192 | 74 días |
| Co 60 | 5.3 años |
| Cs 137 | 33 años |

Actividad específica.- La actividad de un gramo de elemento radiactivo expresado en curios/gramo se denomina actividad específica.

Grosor o espesor de semiabsorción.- La energía de una radiación se define por el espesor de semiabsorción, que es el espesor de material requerido para que la intensidad de la radiación se reduzca a la mitad.

| <u>Isótopo</u> | <u>Espesor de semiabsorción</u> (en plomo) |
|----------------|---|
| Ir 192 | 2.6 mm |
| Co 60 | 13.0 mm |
| Cs 137 | 8.0 mm |

5.8.3 Ventajas e inconvenientes de los isótopos en radiografía.

a) Ventajas:

- 1.- No necesitan corriente eléctrica ni refrigeración por lo que son fácilmente utilizables en obra.
- 2.- Se pueden utilizar a poca distancia foco-película por ser un foco de pequeñas dimensiones.
- 3.- Algunos isótopos tiene gran poder de penetración por lo que puede reducirse el tiempo de exposición.

b) Desventajas:

- 1.- La imagen obtenida con isótopos es menos contrastada que con rayos X debido a que su radiación es más dura.
- 2.- La radiación no es regulable.
- 3.- Al no poderse regular ni interrumpir la actividad de las

fuentes, se requieren grandes rendimientos en el trabajo para su amortización.

- 4.- Exigen manipulaciones cuidadosas para asegurar protecciones eficaces.
- 5.- La actividad de las fuentes más usadas disminuye en períodos de tiempo cortos, lo que se traduce en un perjuicio económico.

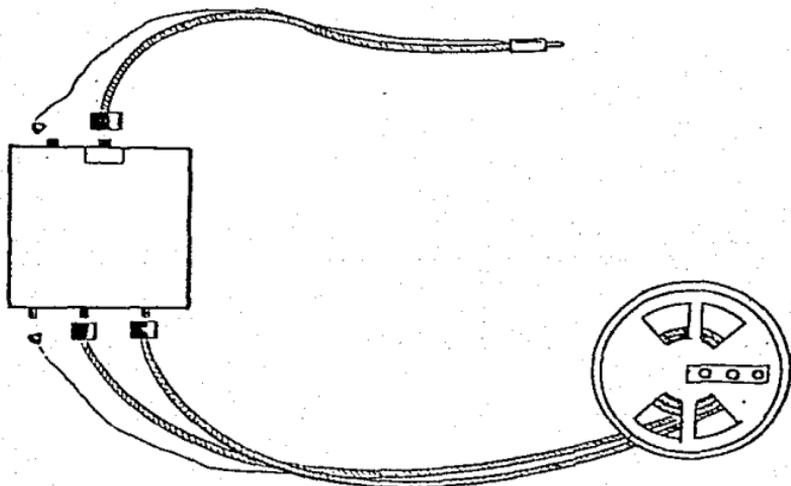
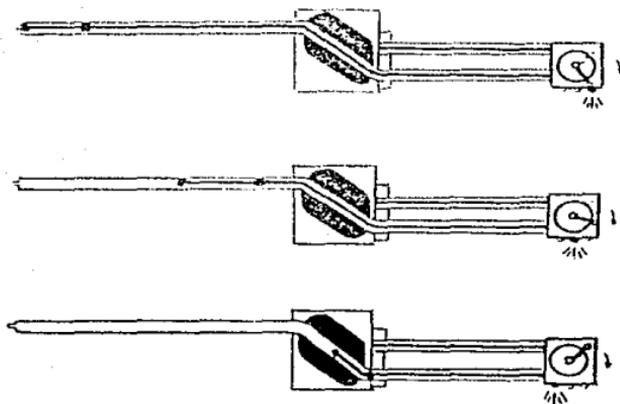
5.8.4 Equipo de gammagrafía.

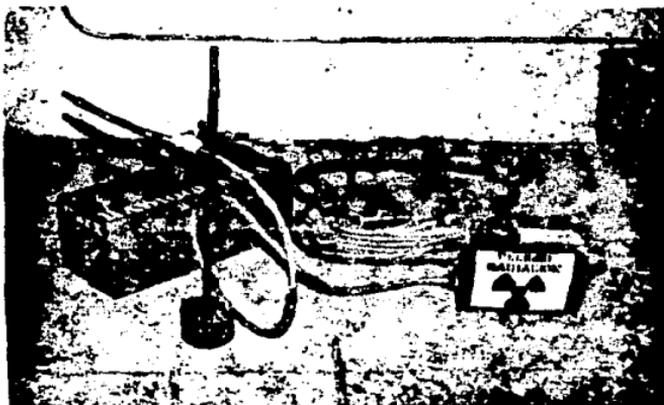
Los isótopos radiactivos deben de manejarse con cuidado, debido a los peligros de radiación. Debido a ello, los isótopos son alojados en equipos o contenedores especiales para su manejo, transporte y almacenamiento.

La figura 5.4 de la página 127 , muestra un diagrama general de un equipo de gammagrafía.

El contenedor es una caja de acero en cuyo interior hay un bloque de Uranio 238, en el que se ha practicado la cámara de alojamiento del isótopo. Mediante un enganche especial se conecta el cable que sirve para sacar y meter la fuente en su alojamiento a través de una manguera flexible. En la página 128 se muestra en fotografía el equipo de gammagrafía).

Figura 5.4
CORTE TRANSVERSAL DE UN CONTENEDOR





La fotografía muestra el equipo de radiografía necesario en una inspección empleando rayos - gamma.



En la fotografía se muestra el uso del radiómetro para medir la radiación.

5.9 IMAGENES RADIOGRAFICAS

5.9.1 Factores geométricos.

La radiografía es la sombra o imagen radiográfica proyectada sobre una película por un objeto situado entre la película y el foco radiante tal y como se muestra en la figura 5.5 .

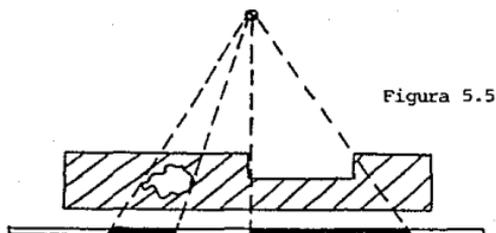


Figura 5.5

Para obtener una radiografía con suficiente nitidez deben tenerse en cuenta los factores geométricos de la formación de la sombra o imagen radiográfica figura 5.6

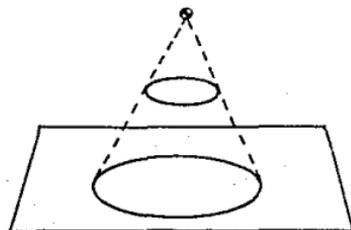
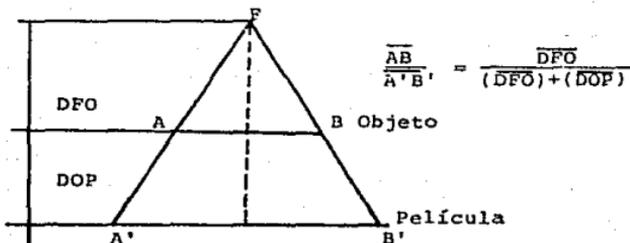


Figura 5.6

Como se ve en la figura No. 5.6 la imagen resulta aumentada con respecto al defecto. La relación entre el diámetro de la pieza y el de la imagen es igual a la relación entre la distancia fuente-objeto y -- fuente-película. En efecto de la figura 5.7 :

Figura 5.7



5.9.2 Distorsión de la imagen.

En la figura No. 5.8, se muestran las dos posibles causas de la distorsión de la imagen sobre la película. Si el plano de la pieza y el plano de la película no son paralelos la radiación no incide perpendicularmente en la película y se produce una distorsión de la imagen, lo que originará una interpretación incorrecta de la radiografía.

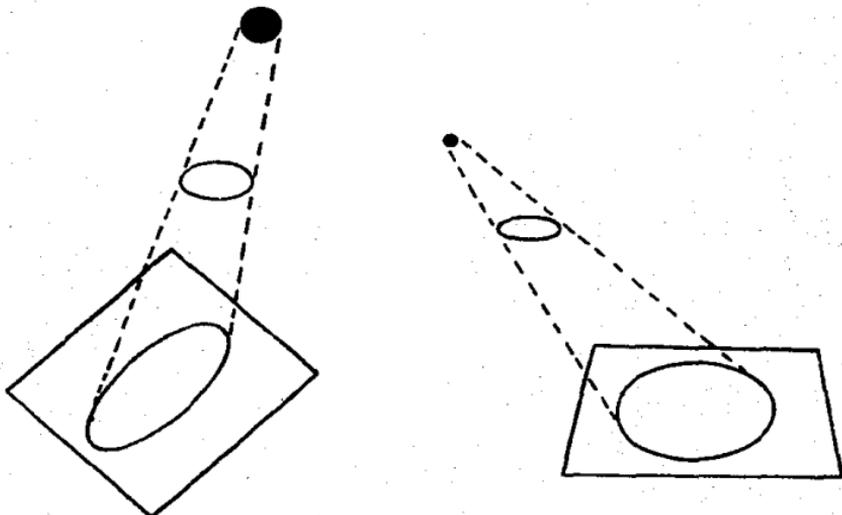
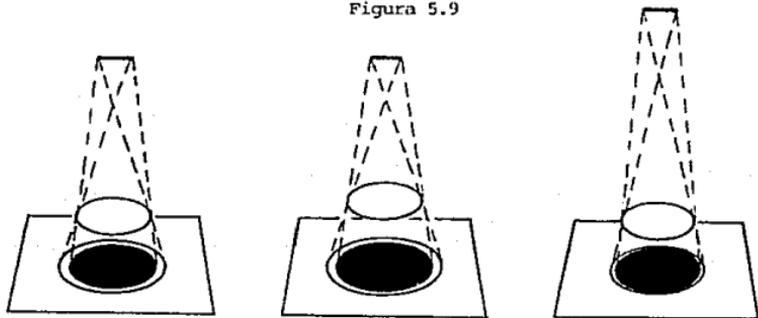


Figura 5.8

5.9.3 Sombra proyectada y penumbra.

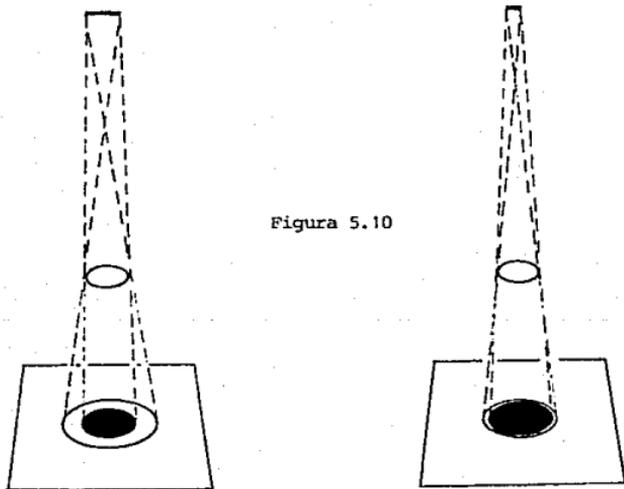
Como se ve en la figura No. 5.9 , la sombra y la penumbra proyectada por el objeto sobre la película está determinada por el tamaño de la fuente y la distancia fuente-objeto y objeto película.

Figura 5.9



La figura No. 5.10, muestra el efecto del tamaño de la fuente sobre la penumbra.

Figura 5.10



5.9.4 Penumbra geométrica.

Debido a las dimensiones finitas de cada foco o fuente de radiación cada punto de ellas se comporta como si estuviera aislado y origina una sombra en la película. La suma o superposición de ellos origina una sombra en la película. La suma o superposición de ellos origina una zona menos iluminada alrededor de la imagen que se llama penumbra geométrica.

La penumbra geométrica viene dada por la expresión:

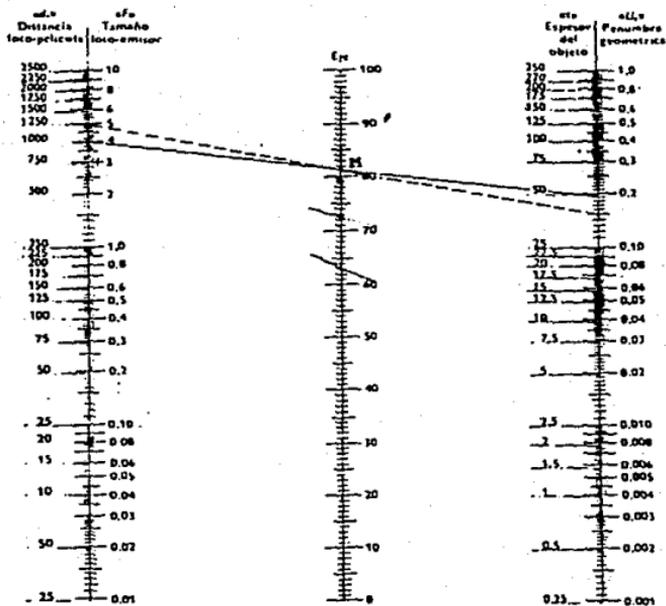
$$U_g = \frac{Ft}{d} \quad \text{donde:}$$

F = tamaño del foco.

d = distancia foco-objeto.

t = espesor del objeto.

La penumbra geométrica puede hallarse mediante el nomograma 1 sin más que unir el valor del tamaño del foco con el valor del espesor del objeto y unir el punto M, de intersección de dicha recta con el eje, con el valor que representa la distancia foco-película y prolongar hasta llegar al valor de U_g .



NOMOGRAMA NO. 1

5.9.5 Penumbra de proceso.

Es la que aparece cuando durante la exposición se mueven la fuente de radiación o el objeto radiografiado. Se designa por U_p .

5.9.6 Penumbra inherente.

Como consecuencia de la acción de los rayos X o gamma al penetrar en la emulsión fotográfica, se produce un arranque de electrones que se dirigen en todas direcciones y que al tocar a los granos de halógeno los hacen revelables. El resultado de ello, es que al revelar la película aparece una zona de sombra contorneando las zonas irradiadas que se llama penumbra inherente o interna (U_i).

En la siguiente tabla se dan unos valores de la penumbra inherente.

| Exposición a los rayos X | Energía de la radiación | Valores de U_i (mm) |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Sin pantallas | Menos de 100 KV | 0.1 |
| Con pantallas de plomo (0.02 mm) | Más de 100 KV | 0.2 |
| Exposición a los rayos | Isótopo | Valores de U_i (mm) |
| Con pantallas de plomo (0.1 mm) | Iridio - 192 | 0.2 |
| | Cobalto 60 | 0.3 |
| | Cesio 137 | 0.3 |

5.9.7 Relación entre penumbras.

La penumbra total en una radiografía viene dada por la expresión:

$$U_T = U_g^2 + U_i^2 + U_p^2$$

Si se admite que la falta de definición depende únicamente de la penumbra inherente U_i y de la geométrica U_g , la penumbra efectiva viene dada por la expresión:

$$U_e = U_g^2 + U_i^2$$

y si consideramos que la distancia foco-película (D.F.P.) es la suma de la distancia foco-objeto más el espesor del objeto:

$$\text{D.F.P.} = d + t \text{ y como } U_g = \frac{Ft}{d}$$

$$\text{resulta que: } \text{D.F.P.} = \frac{Ft}{U_g} + t$$

5.9.8 Ley del inverso de los cuadrados.

La intensidad de una radiación X o gamma varía inversamente con el cuadrado de la distancia a la fuente de radiación.

Esta relación distancia-intensidad puede expresarse:

$$\frac{I_1}{I} = \frac{D^2}{D_1^2} \quad \text{siendo:}$$

I = Intensidad a la distancia D .

I_1 = Intensidad a la distancia D_1 .

La explicación geométrica de la ley inversa de los cuadrados puede verse en la figura No. 5.11 en la página 136.

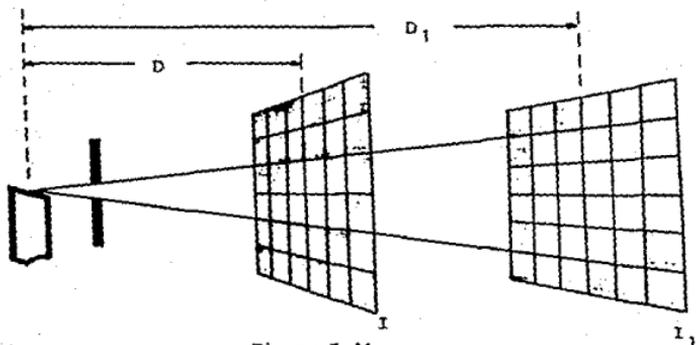


Figura 5.11

5.9.9 Radiación difusa.

Quando un haz de rayos X γ gamma atraviesa un objeto, una parte de la radiación es difundida en todos los sentidos por los átomos que constituyen el objeto. Esta radiación se denomina radiación difusa interna, la cuál se observa en la figura 5.12 :

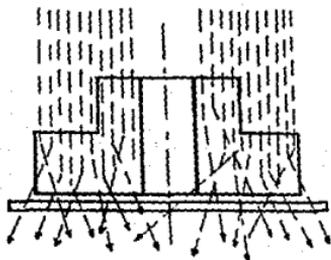


Figura 5.12

La radiación que atraviesa objeto y película puede ser reflejada por los objetos que circundan la pieza radiografiada y alcanzar nuevamente la película (radiación secundaria), tal y como se ve en la figura 5.13 :

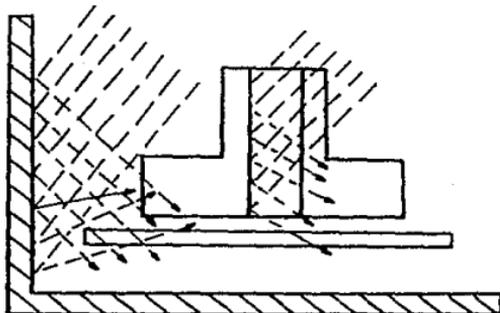


Figura 5.13

La radiación difusa es menos penetrante que la primaria de la que procede. Los rayos difusos pueden interceptarse por filtros. Los procedentes de objetos situados detrás de las películas pueden interceptarse mediante una lámina de plomo situado detrás del chasis portapelículas.

El efecto de la radiación difusa es un velo uniforme sobre la película que disminuye el contraste y la nitidez de la imagen.

5.10 PELICULA RADIOGRAFICA

La película utilizada en radiografía, es similar a la fotografica que presenta un soporte flexible y transparente llamado base y una capa sensible o emulsión, la cual en el caso de la película radiográfica está presente en ambas caras con lo que se reduce el tiempo de exposición y se obtiene una imagen con mejor contraste. El esquema de una película radiográfica es el de la figura 5.14 :

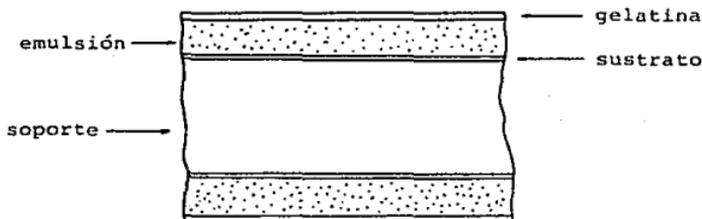


Figura 5.14

El soporte flexible es de triacetato de celulosa, mientras que la emulsión se compone de una capa de gelatina (gelt) la cual la protege, también se cuenta con una capa de sustrato el cual asegura la adherencia de la capa de emulsión al soporte. Dicha emulsión es sensible a la luz y a las radiaciones ionizantes, que actuando sobre los halogenuros originan cambios en su estructura, produciéndose imágenes latentes, las cuales mediante un revelador adecuado producen las reacciones químicas por las cuales se deposita plata en suspensión en la gelatina, distribuidas de acuerdo con la cantidad de radiación que ha actuado sobre los granos de plata en suspensión y que dará lugar a distintos ennegrecimientos o diferencias de densidad. Cuanto menor sea el tamaño de los granos de plata mejor será la definición de la imagen.

5.10.1 Términos radiográficos.

Contraste.- Se considera contraste radiográfico entre dos zonas de una película a la diferencia de las densidades entre ambas zonas (o sea una zona puede estar más oscura que otra debido a la cantidad de radiación que incidió sobre la película.

Densidad radiográfica.- Es una forma cuantitativa de establecer el grado de ennegrecimiento de las diferentes zonas de una película radiográfica.

Imagen latente.- Cuando incide una radiación sobre un objeto y se proyecta su imagen sobre una película, ésta sufre cambio en los lugares que reciben una suficiente cantidad de radiación, logrando que los cristales de halogenuros de plata sean transformados en plata metálica. Estos rastros de metal son tan pequeños que la capa fotosensible permanece prácticamente inalterada. Sin embargo, estos rastros se forman en gran número en los lugares alcanzados por mayor cantidad de radiación y son menos numerosas donde la radiación ha incidido más débilmente. De esta forma se origina una imagen completa aunque todavía invisible en la capa fotosensible durante la exposición. Esta imagen se denomina imagen latente. Mediante un proceso de revelado posterior esta imagen latente se transforma en imagen visible.

5.10.2 Tipos de película.

Las películas radiográficas industriales se clasifican de acuerdo con la norma A.S.T.M. E94.68, en cuatro grandes grupos o tipos en función de su rapidez, contraste y tamaño de grano. Ver tabla siguiente:

| <u>Tipo de película</u> | <u>Contraste</u> | <u>Rapidez</u> | <u>Tamaño de grano</u> |
|-------------------------|------------------|----------------|------------------------|
| 1 | muy alto | lenta | muy pequeño |
| 2 | alto | media | pequeño |
| 3 | medio | alta | grande |
| 4 | muy alto + | muy alta+ | (++) |

(+) Películas con pantallas fluorescentes. Con pantallas de plomo o expuestas directamente. Su rapidez, contraste y tamaño de grano son medios.

(++) El tamaño de grano depende del tipo de pantallas fluorescentes utilizadas.

Rayos

| Tipo de material | Espesor mm. | Fuente y tipo de película sugerido | |
|------------------|----------------|------------------------------------|------------|
| | | Iridio 192 | Cobalto 60 |
| ACERO | 0- 6 | D2 - D4 | |
| | 6- 12 | D4 - D7 | |
| | 12- 25 | D7 | D4 |
| | 25- 50 | D7 | D4 - D7 |
| | 50- 100 | D7 - D10 | D7 |
| | Sup- 100 | | D7 - D10 |

5.11 PROCESADO DE LAS PELICULAS

5.11.1 Cámara oscura: Se conoce como cámara oscura o cuarto de revelado el local destinado a realizar las operaciones de revelado de las películas.

La cámara oscura debe reunir los siguientes requisitos:

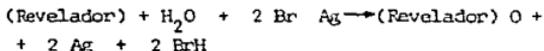
- Debe estar convenientemente preparada para que no entre luz.
- Debe estar ventilada y a temperatura adecuada.
- El local ser^a seco, limpio y de amplitud suficiente.
- Debe tener dos sistemas de iluminación independientes, uno de luz blanca y otros con filtros adecuados al tipo de película utilizado.
- Debe estar dotado de agua con caudal abundante.
- Debe tener anexos dos locales que servirán para almacén de película y material y otro para la clasificación y calificación de las radiografías obtenidas.

5.11.2 Revelado: Cuando durante la exposición radiográfica, los fotones actúan sobre los iones de bromo del bromuro de plata, se produce una acción fotoquímica por la cual, se liberan electrones que crean regiones negativas hacia las cuales son atraídos los iones de plata libre según las reacciones:



Se forma así la "imagen latente" que no es visible hasta que la película no es sometida a la acción del baño revelador.

Al introducir la película en el baño revelador, los granos de halogenuro (Bromuro de plata) no expuestos, no sufren alteración ninguna mientras que los expuestos son reducidos a plata metálica según la expresión:



Para neutralizar el ácido bromhídrico (BrH) se utiliza un agente acelerador, el carbonato sódico, que actúa según la reacción:



El baño revelador lleva también un agente conservador para que el baño no se oxide con el aire. Dicho agente suele ser el sulfito sódico $\text{SO}_3 \text{ Na}_2$.

Finalmente el agente moderador presente en el baño revelador, evita que éste último actúe sobre los granos de halogenuro no expuestos.

Un aumento en el tiempo de revelado influye en el contraste y rapidez de las películas los cuales aumentan al hacerlo el tiempo de revelado. Esto es cierto hasta un límite para el cual se produce un aumento del velo y tanto la rapidez como el contraste disminuyen.

El tiempo de revelado oscila entre 4 y 8 minutos, según la temperatura del baño revelador.

5.11.3 Aclarado o baño de parada: Antes de introducir la película en el fijador se debe escurrir ésta durante 10-15 segundos y luego se introduce en un baño ácido que neutralice el alcalí del revelador. Normalmente se utiliza ácido acético en concentración adecuada para que no se desprenda CO_2 .

El aclarado consigue una mayor duración del baño fijador.

5.11.4 Fijado: Mediante el fijado se consigue hacer desaparecer los granos de halogenuro no activados y dejar sobre la película solamente la --

plata metálica de la imagen. Al mismo tiempo endurece la gelatina.

El tiempo de fijado oscila entre 2 y 5 minutos.

- 5.11.5 Lavado: Con el fin de eliminar los componentes del baño fijador de la película, que podrían decolorar la imagen, se lavan en agua corriente y limpia.

Generalmente el tiempo de lavado oscila entre 10 y 15 minutos, siempre que la temperatura del agua sea superior a 10°, en caso contrario el tiempo aumenta.

- 5.11.6 Secado: Una vez lavada convenientemente la película, debe secarse, - bien mediante un horno secador con aire caliente filtrado o bien colgadas en un tendedero apropiado al aire ambiente.

- 5.11.7 Resultados defectuosos y sus posibles causas: Antes de atribuir una diferencia local de ennegrecimiento de la imagen radiográfica a una falta de homogeneidad del objeto examinado, se debe tener la certeza de no hallarse en presencia de un defecto producido por un error de manipulación o de tratamiento de película. Es pues importante poder identificar estos defectos en la radiografía. Es así mismo interesante poder determinar su naturaleza para poder eliminar la causa antes o durante el tratamiento de las siguientes películas.

Examinando oblicuamente, frente a la luz, la superficie de la película revelada, y comparando el aspecto de las capas de emulsión, es a veces posible descubrir los defectos debidos al tratamiento. - En efecto, la imagen radiográfica es idéntica en ambas caras de la película; los defectos de tratamiento aparecen a menudo tan solo en una de las capas de emulsión.

La siguiente lista contiene los defectos más comunes así como sus posibles causas.

Contraste insuficiente:

- a) El ennegrecimiento es normal

- 1) Radiación demasiado dura.
 - 2) Sobre-exposición compensada por un revelado más corto.
 - 3) Revelador no apropiado o mal preparado.
 - 4) Revelado demasiado largo en un revelador demasiado frío.
- b) El ennegrecimiento es insuficiente.
- 1) Revelado demasiado corto.
 - 2) Revelador agotado.
 - 3) Revelador no apropiado o mal preparado.

Contraste exagerado (ausencia de medios tonos):

- 1) Radiación poco penetrante.
- 2) Sub-exposición compensada con un revelado demasiado largo.
- 3) Revelador mal preparado o no apropiado.

Ennegrecimiento general insuficiente:

- 1) Exposición insuficiente.
- 2) Revelado demasiado corto.
- 3) Revelador agotado.
- 4) Revelador mal preparado o no apropiado.

Ennegrecimiento general excesivo:

- 1) Exposición excesiva.
- 2) Revelado demasiado largo o realizado a temperatura demasiado alta.
- 3) Revelador mal preparado o no apropiado.

Nitidez insuficiente:

- 1) Distancia foco-película demasiado corta.
- 2) La fuente de radiación o el objeto han estado desplazados durante la exposición.
- 3) Distancia película-objeto demasiado grande.

5.12 CALCULO Y CONTROL DE LA EXPOSICION

5.12.1 Variables que intervienen en la exposición.

La calidad de una radiografía es función de las siguientes variables:

- 1.- Fuente de radiación.
- 2.- Cantidad y calidad de radiación.
- 3.- Tipo de material del objeto.
- 4.- Tiempo de exposición.
- 5.- Distancia fuente-película.
- 6.- Pantallas y filtros de radiación.
- 7.- Tipo de película.
- 8.- Revelado.

1.- Fuente de radiación.- Cuando se utilizan equipos de rayos X la radiación varía de unos a otros en función del material de que esté constituida su ventana y el refrigerante.

Quando se utilizan equipos de rayos gamma la radiación varía en su longitud de onda sólo en función del tipo de isótopo.

2.- Cantidad y calidad de radiación.- La cantidad de radiación es función de:

- 1) de la distancia foco-película.
- 2) del tiempo de exposición.
- 3) de la actividad de la fuente para rayos gamma.
- 4) de la intensidad de corriente en el tubo (para rayos X).

La relación intensidad de radiación-tiempo de exposición viene dada por la expresión:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

siendo: T = tiempo de exposición.

M = curios o miliamperios.

La relación entre la intensidad y la distancia viene dada por:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{(DFP)_1^2}{(DFP)_2^2}$$

La calidad de la radiación en los equipos de rayos X es función de la tensión en el tubo; al aumentar la tensión, la radiación es de longitud de onda más corta y por tanto más penetrante.

La calidad de la radiación para las fuentes radiactivas es constante en función del tipo de isótopo. No existe la posibilidad de modificar la calidad de la radiación en ellos pues las fuentes de un determinado elemento emiten una radiación de las mismas características.

3.- Tipo de material del objeto.- La absorción de la radiación por un material es selectiva ya que el haz radiante es absorbido en cierta medida por el objeto que se va a radiografiar.

La absorción de la radiación depende y aumenta con:

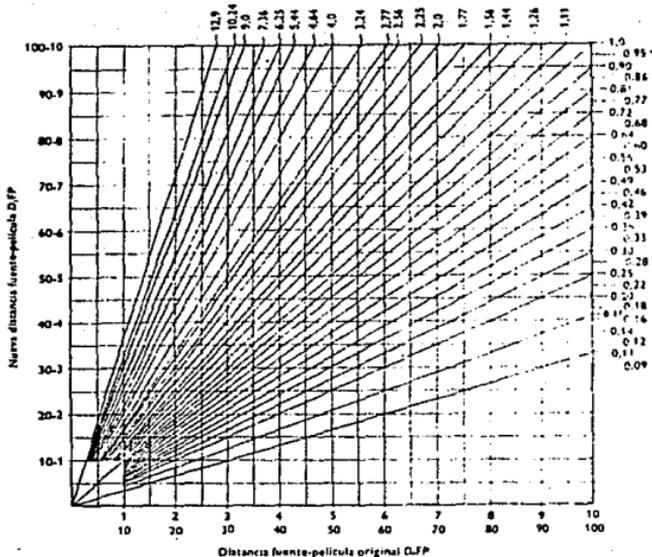
- 1) El espesor del objeto.
- 2) Densidad del material.
- 3) Número atómico del material.

4.- Tiempo de exposición.- El tiempo de exposición ha de ser lo más exacto posible a medida que aumenten las exigencias de contraste. No obstante el espesor que poseen las películas industriales, permiten variaciones en el tiempo de exposición que se sitúan entre un 5 y un 15%, según las películas. En cualquier caso, el tiempo de exposición muy corto introduce errores en su medida por el operario, con la consiguiente variación de la calidad radiográfica.

5.- Distancia fuente-película.- La intensidad de la radiación varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia foco o -- fuente-película.

Esto debe tomarse en cuenta para el cálculo del tiempo de exposición siempre que se cambie dicha distancia.

La gráfica de la siguiente página nos permite hallar el factor de corrección en tiempos para cambiar la distancia foco-película.



Ejemplo: D.F.P. = 50 cm; tiempo de exposición = 30 min; determinar el tiempo de exposición para D.F.P. = 80 cm: a) el factor de corrección se encuentra en el cruce de D.F.P. = 50 cm con D.F.P. = 80 cm. Línea 2.54; b) multiplicar el tiempo por este factor.
 $30 \times 2.54 = 76.8$ min.

Factor de corrección para cambios de distancia fuente-película.

6.- Pantallas y filtros.- Como ya hemos dicho, las pantallas - ejercen principalmente una acción reforzadora de la radiación con lo que se reduce el tiempo de exposición. Sin embargo, los filtros, que se utilizan para absorber las radiaciones más blandas, aumentan el tiempo de exposición a medida que aumentan su espesor.

7.- Tipo de película.- Las películas existentes en el mercado son muy variadas. Pueden ser muy rápidas y de tamaño de grano grande o muy lentas y tamaño de grano fino.

5.12.2 Cálculo de tiempo de exposición

El tiempo de exposición se calculará teniendo en cuenta las curvas características de los equipos utilizados y los espesores a radiografiar, película utilizada y distancia foco-película.

Para calcular teóricamente el tiempo de exposición es necesario conocer:

- 1) La curva característica de la película.
- 2) La curva de absorción del material.

$$E = E_0 \cdot e^{-\mu t}$$

Siendo: μ = Coef. absorción a la rad.
 t = Espesor

- 3) La distancia foco-película (D.F.P.)
- 4) La intensidad de la radiación (I)

Dicho tiempo se calcula por la expresión:

$$T = T_0 \cdot e^{-\mu t} \frac{(D.F.P.)^2}{I}$$

siendo T_0 el tiempo de exposición que se requiere para imprimir la película con una densidad igual a la obtenida con un tiempo T pero sin interponer un material absorbente.

5.12.3 Gráficas para el cálculo del tiempo de exposición.

Con el fin de evitar engorrosos cálculos al operario de radiografía, los tiempos de exposición se calculan con gráficas o reglas de cálculo de exposición.

Gráficas para rayos X.- Se relacionan en ellos la exposición en mA/min., con el espesor y la tensión en el tubo.

Las condiciones para las que se confeccionan estas gráficas son:

- a) Tipo del equipo.
- b) Material a radiografiar.
- c) Tipo de película y condiciones de revelado.
- d) Pantallas reforzadoras empleadas.
- e) Distancia foco-película.
- f) Densidad fotográfica.

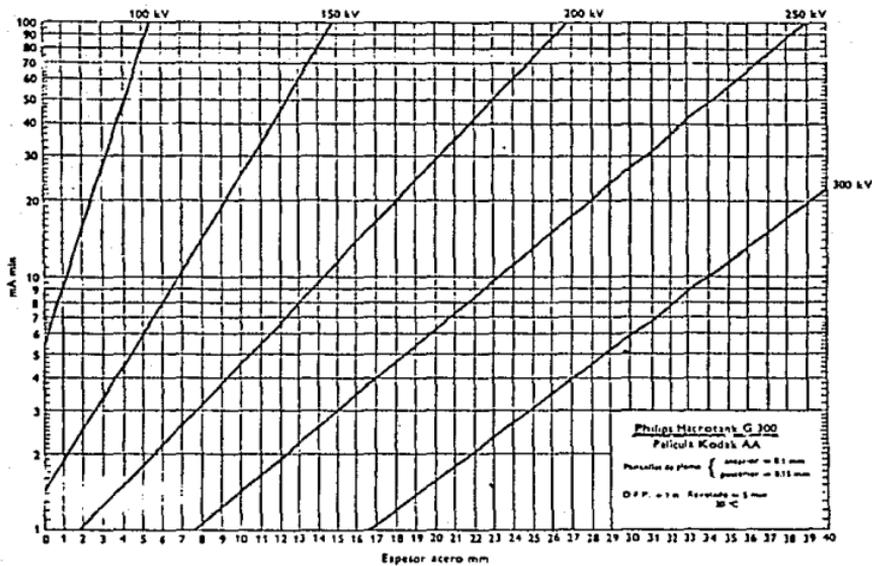
Normalmente, las gráficas o cartas de exposición se confeccionan para densidades comprendidas entre 1.5 y 2.5, películas de factor entre 40 y 200, distancias foco-películas de 700mm. y pantallas reforzadoras de 0.05mm. (0.002") y 0.15mm. (0.006") para la anterior y posterior respectivamente.

En la gráfica 1 se muestra la carta de exposición para un equipo de 300 KV y densidad 1.5 para película de factor 40. En el eje de ordenados, aparecen el tiempo en min. tomando como intensidad el valor de 5mA.

Gráfica para rayos gamma.- Las gráficas para el cálculo del tiempo de exposición con rayos gamma son parecidos a los rayos X si bien en este caso, se relacionan únicamente espesores con las exposiciones, ya que las características de la radiación para rayos gamma permanece invariable.

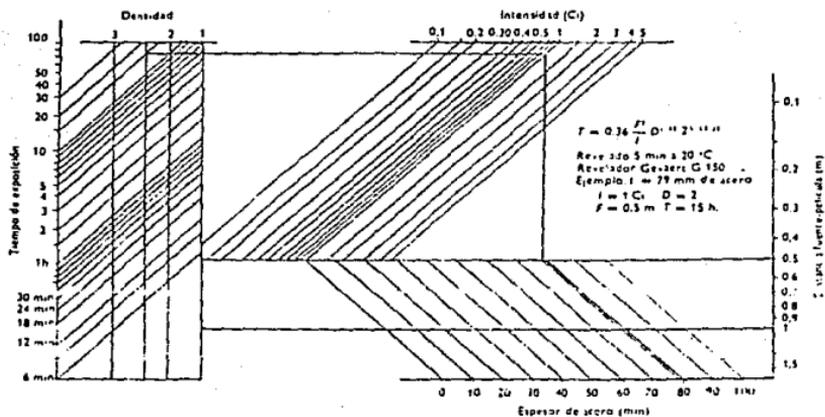
En la gráfica 2 puede verse la carta de exposición para una fuente de Iridio 192.

En la gammagrafía industrial, normalmente no se hace uso de car-



GRAFICA No. 1

frío 192-pantallas de plomo (0,10-0,15 mm)



GRAFICA No. 2

tas de exposición utilizando reglas de cálculo apropiadas que permiten el cálculo de las exposiciones con rapidez y exactitud (ver la siguiente figura).

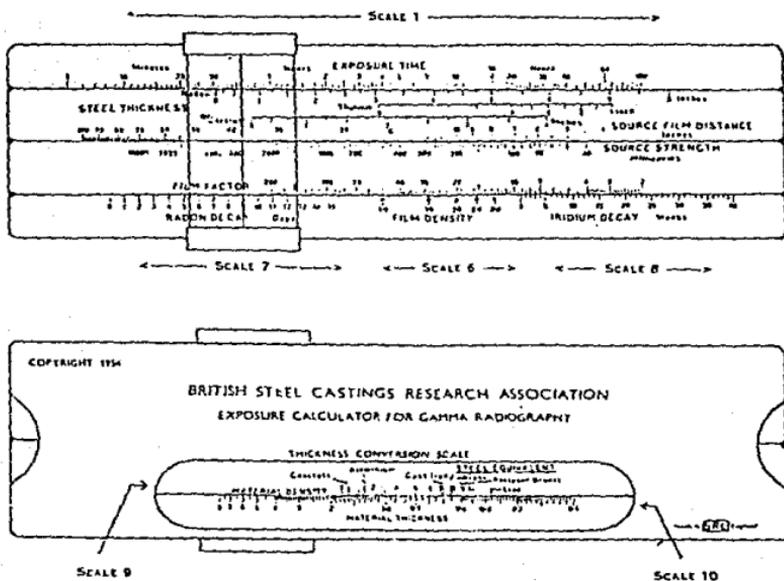


Figura 5.15

5.13 CALIDAD RADIOGRAFICA

5.13.1 Calidad y sensibilidad radiográfica.

Quando se examina radiográficamente una pieza, la percepción en la película de los posibles defectos que en ella puedan encontrarse, es función de la calidad de la imagen así como de la sensibilidad de la radiografía obtenida.

En la mayoría de los casos, sensibilidad y calidad se consideran sinónimos. Sin embargo si por ejemplo, se trata de radiografiar una pieza que presenta distintos espesores, la calidad radiográfica en este caso consiste en tener en cuenta los distintos espesores y su visualización sobre la placa con un máximo de sensibilidad adecuada.

En el examen de materiales por radiografía existen limitaciones en cuanto al tamaño mínimo de defecto detectable.

La sensibilidad de una película expresa el tamaño mínimo de los defectos detectables basándose en los conceptos de definición de imagen y contraste. La sensibilidad radiográfica se expresa en tanto por ciento del espesor de la pieza. Generalmente, para medir la sensibilidad se sitúa una placa delgada del mismo material sobre el objeto a radiografiar y en este caso la sensibilidad viene dada por la expresión:

$$S (\%) = (e/t) 100$$

donde : e = espesor de la placa (visible sobre la película)
t = espesor de la pieza

A este valor se le denomina sensibilidad de espesor y corresponde a la utilización de la placa o plancha de material en la parte más alejada de la película.

5.13.2 Indicadores de calidad de imagen.

La calidad de imagen que es consecuencia de la técnica radiográfica seguida es necesario expresarla en un valor numérico y para ello se recurre a los indicadores de calidad de imagen (I.C.I.), (I.Q.I.).

El indicador de calidad de imagen que en general es un pequeño dispositivo constituido por un material de naturaleza idéntica o de propiedades análogas a las del material de la pieza que se va a radiografiar y sus fines pueden ser:

- a) Señalar las sensibilidades obtenidas en diferentes partes de una pieza con espesores distintos.
- b) Servir como valor de referencia que ha de alcanzar la radiografía.
- c) Servir de referencia con respecto al defecto mínimo detectable, etc.

La calidad es tanto más elevada, cuando son más visibles sobre ella las partes más delgadas del indicador.

Anteriormente a los indicadores de calidad de imagen se les conocía con el nombre de penetrámetros, en algunos países aún se les sigue llamando así.

El número de un penetrámetro y la visualización del mismo son sus partes más delgadas sobre la película, no implica en general que todos los defectos cuyas dimensiones sean equivalentes a las de dichas partes sean detectables, ya que la detección de los defectos será función de su orientación y posición respecto al haz de radiación.

5.13.3 Tipos de indicadores de calidad de imagen.

Son muy diversos los tipos de indicadores de calidad que se encuentran en uso. Entre los más frecuentemente utilizados podemos citar los siguientes:

- a) Indicadores de hilos.- Están formados por una serie de hilos de diferentes diámetros crecientes embutidos en una lámina de goma o material plástico, cuando se observa la radiografía se hace notar el hilo de menor diámetro, que sea perfectamente visible, bien en su longitud, en el caso de piezas de espesor uniforme, bien sobre la parte que más interesa si el espesor es irregular. Dentro de este tipo de indicadores, el más utilizado es el recomendado por el IIW/IIS aceptado por ISO y recogido por la norma DIN54109 de 1962. Ver figura

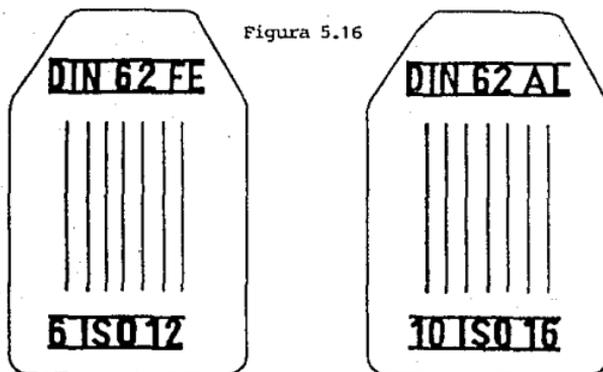


Figura 5.16

Cada indicador lleva las marcas comunes: DIN-62 e ISO y las marcas variables Fe Al Cu estas marcas variables se deben a que existen tres clases de indicadores: una para la radiografía de la fundición y los distintos tipos de acero (clase Fe), otra para el aluminio y sus aleaciones (clase Al) y una tercera para el cobre y sus aleaciones (clase Cu).

Los grupos 1-7, 6-12 y 10-16 son los números de orden del primero y último de los hilos de cada indicador ver tabla siguiente para la clase Fe:

Tipos de indicadores DIN y diámetros de los hilos presentes en cada uno de ellos

| IQI de hilos DIN 54 109 | | | | | | | | |
|-------------------------|------|--------|---------|------|--------|----------|------|--------|
| Fe 1/7 | | | Fe 6/12 | | | Fe 10/16 | | |
| Núm. | Ø mm | Ø pulg | Núm. | Ø mm | Ø pulg | Núm. | Ø mm | Ø pulg |
| 1 | 3,2 | 0,13 | 6 | 1 | 0,040 | 10 | 0,40 | 0,016 |
| 2 | 2,5 | 0,10 | 7 | 0,80 | 0,032 | 11 | 0,32 | 0,012 |
| 3 | 2 | 0,08 | 8 | 0,63 | 0,025 | 12 | 0,25 | 0,010 |
| 4 | 1,6 | 0,065 | 9 | 0,50 | 0,020 | 13 | 0,20 | 0,0080 |
| 5 | 1,25 | 0,050 | 10 | 0,40 | 0,016 | 14 | 0,16 | 0,0065 |
| 6 | 1 | 0,040 | 11 | 0,32 | 0,013 | 15 | 0,13 | 0,0050 |
| 7 | 0,80 | 0,032 | 12 | 0,25 | 0,010 | 16 | 0,10 | 0,0040 |

El campo de aplicación para el grupo 1-7 es para espesores de 30 a 200 milímetros; para el grupo 6-12 es de 8 a 80mm y para el grupo 10-16 es de 6 a 40mm.

El indicador de hilos, en el caso de radiografía de soldaduras, se situará sobre el cordón con los hilos perpendicularmente dispuestos al eje de la soldadura.

- b) Indicadores de calidad de espesor constante y de taladros calibrados.- Son los más utilizados en América. Se construyen de un material radiográficamente análogo al que se va a radiografiar. En este caso el espesor de la placa representa un porcentaje determinado del espesor a radiografiar. La placa está provista de una serie de taladros de diámetros crecientes iguales o múltiplos del espesor de la citada placa. En su lectura se hace notar la presencia sobre la imagen de los taladros que son visibles.

Dentro de este tipo de indicadores el grupo más importante y más utilizado es el tipo 4T - T - 2T (A.S.T.M.).

El espesor del indicador para los distintos niveles de inspección se eligirá de acuerdo con la siguiente tabla:

| Indicador a utilizar según los distintos niveles de inspección | | | | |
|--|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------|
| Marca identificación | Espesor del indicador | Espesor mínimo del objeto | | |
| | | Categoría 2-1T, 2-2T, 2-4T | Categoría 1-1T y 1-2T | Categoría 4-2T |
| 5 | 0,005 | 1/4 | 1/2 | 1/8 |
| 6 | 0,006 | 5/16 | 3/8 | ... |
| 8 | 0,008 | 3/8 | 3/4 | 3/16 |
| 9 | 0,009 | 7/16 | 7/8 | ... |
| 10 | 0,010 | 1/2 | 1 | 1/4 |
| 11 | 0,011 | 9/16 | 1 1/16 | ... |
| 12 | 0,012 | 5/8 | 1 1/4 | ... |
| 20 | 0,020 | 1 | 2 | 1/2 |
| 100 | 0,100 | 5 | 10 | 2 1/2 |
| 150 | 0,150 | 7 1/2 | 15 | 3 3/4 |

depende de las condiciones impuestas en el control de la obra, ya que la especificación puede imponer el que sean visibles uno, dos o los tres taladros para un mismo espesor.

De acuerdo con las condiciones impuestas para la inspección se distinguen las siguientes categorías de radiografías:

- Radiografía de categoría 2-1T; en estas radiografías debe ser visible el taladro 1T, del indicador correspondiente al 2% del espesor radiografiado.
- Radiografía de categoría 2-4 T; en ellas y utilizando el indicador correspondiente al 2%, deberá verse al taladro 4T.
- Radiografía de categoría especial; en este grupo se incluyen las categorías 1-1 T, 2-2 T y 4-2 T. Ver tabla siguiente:

Categoría de las radiografías según A.S.T.M. y su equivalencia en sensibilidad %

| Categoría | Espesor indicador en % E | o taladro mínimo visible | Sensibilidad equivalente % |
|-----------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 2-1T | 2 | 1T | 1,4 |
| 2-2T | 2 | 2T | 2,0 |
| 2-4T | 2 | 4T | 2,8 |
| 1-1T | 1 | 1T | 0,7 |
| 1-2T | 1 | 2T | 1,0 |
| 4-2T | 4 | 2T | 4,0 |

E = espesor a radiografiar

El espesor nominal del indicador es igual al 2% del espesor a radiografiar y dicho espesor se indica sobre los indicadores con números de plomo de altura mínima 3/32 (2.4mm).

Cuando se trata de radiografiar soldaduras es necesario intercalar entre el indicador y la chapa una lámina de forma que el grueso de ésta más el de el indicador sea equivalente al sobreespesor del cordón. El indicador se colocará paralelo a la soldadura a unos 5mm del borde de ésta y lo más alejado posible del foco de radiación.

c) Indicadores de escalones.- El más utilizado es el API-ASME según se ve en la figura No. 5.18 , cuyas dimensiones se especifican en ella.

Se utilizan dos tipos de penetrámetros o indicadores:

a) Para espesores de acero hasta 2 pulgadas (50mm) de espesor:

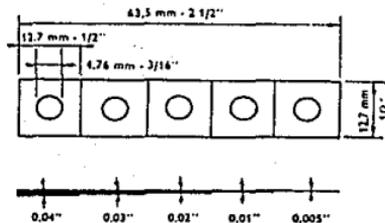
| | | | | | |
|-------|------|------|------|------|----------|
| 0.005 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | pulgadas |
| 0.13 | 0.25 | 0.51 | 0.76 | 1.01 | mm |

espesores de los escalones del indicador.

b) Para espesores de acero comprendidos entre 2 y 4 pulgadas -- (50 a 100 mm).

| | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|
| espesor de los escalones en Flg. | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.09 |
| espesor en milímetros | 1.01 | 1.27 | 1.52 | 1.78 | 2.29 |

Cada escalón lleva un taladro de 3/16 de Flg. (4.8mm) de diámetro. La lectura se hace sobre el espesor más delgado, visible sin tener en cuenta el taladro.



Indicador de escalones A.P.I.-A.S.M.E.

Figura 5.18

5.14 TECNICAS RADIOGRAFICAS

Ante la imposibilidad de estudiar todos los problemas que se presentan en la aplicación del examen radiográfico a la gran variedad de productos sobre los que pueden ser utilizados, nos vamos a referir principalmente al examen de uniones soldadas por ser este campo posiblemente en el que más se ha aplicado este método de ensayo y tal vez sea en él en el que se encuentren los problemas más representativos y característicos, planteados por la radiografía industrial.

5.14.1 Técnica radiográfica

Se considera como técnica radiográfica, el conjunto de reglas y normas utilizadas en la obtención de radiografías. La técnica radiográfica abarca todos los conocimientos, reglas y normas relativos a equipo, película y material de marcado e identificación de películas y proceso de revelado e interpretación de los resultados.

a) Fuentes de radiación:

Se utilizan normalmente equipos de rayos X comprendidos entre 40 y 400 kilovolts o fuentes de rayos gamma de actividad comprendida entre 2 y 100 curies de Iridio 192 y cobalto 60.

b) Película radiográfica:

Se utilizan generalmente películas de grano fino y elevado contraste de los tipos Structurix D7 y D4 y Kodak AA y M.

c) Pantallas reforzadoras:

Se emplean en general pantallas de plomo de espesores de 0.12mm para la pantalla anterior y de 0.25 para la posterior.

d) Chasis o portapelículas:

Las películas y pantallas se colocan en el interior del chasis flexible de material plástico para asegurar el contacto con la película o examinar.

e) Indicadores de calidad de imagen:

Se utilizan distintos tipos de indicadores según se ha visto anteriormente.

f) Marcas de identificación:

Se utilizan números y letras de plomo cuya imagen queda registrada en la película.

5.14.2 Radiografía de piezas que presentan grandes diferencias de espesor

Hay que tener en cuenta los espesores a radiografiar para evitar sobre o subexposiciones de partes finas o gruesas respectivamente.

Se puede lograr la radiografía con una sola exposición de la siguiente manera:

- 1) Añadir a las partes delgadas un material homogéneo en forma de una pieza de compensación con el fin de que la absorción de la radiación sea igual a la de la parte más gruesa del objeto (ver fig. 5.19)

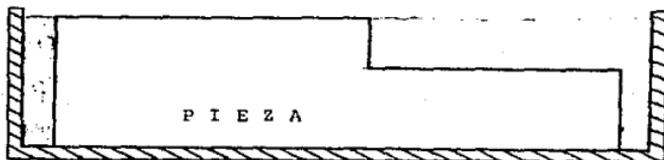


Figura 5.19

- 2) Realizar la exposición simultáneamente con dos películas de distinta rapidez. También se pueden utilizar otros medios como filtros o bien realizar varias exposiciones del objeto con las condiciones de exposición óptimas para cada espesor.

5.14.3 Inspección radiográfica de uniones soldadas.

a)- Soldaduras a tope de elementos cilíndricos.- En el caso de que se trate de tubos la exposición se efectuará a una pared o a doble pared según los casos.

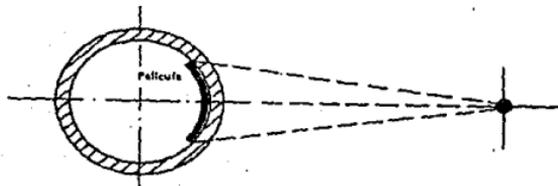
- 1.- Radiografía a una pared.

Si el tubo tiene un orificio de acceso o un extremo abierto, la radiografía se puede efectuar según se ve en la figura 5.20

2.- Radiografía de una sola pared sin acceso.

Se efectúa cuando el tubo no presenta ni orificio de acceso ni extremo abierto, según se ve en la figura 5.21

El cálculo de tiempo de exposición será el correspondiente al doble espesor de pared.



Radiografía de una sola pared. Interior accesible.

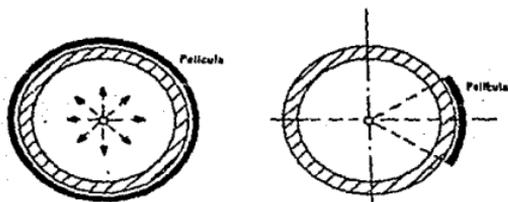
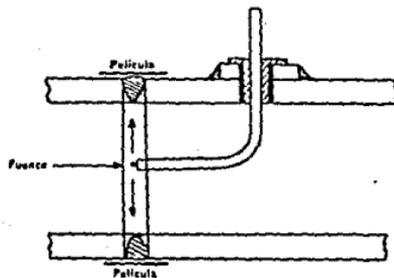
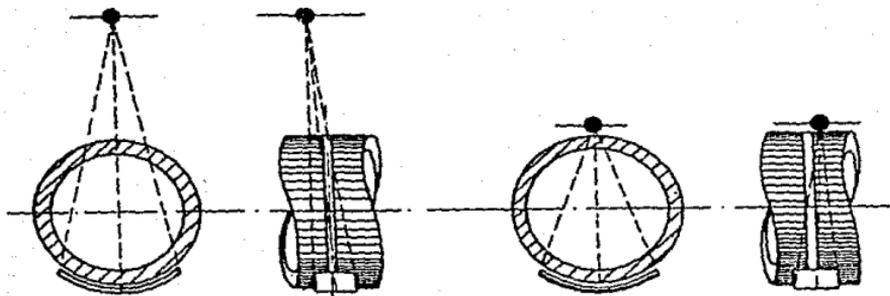


FIGURA Exposición panorámica. Tubo con orificio de acceso.

Figura 5.20

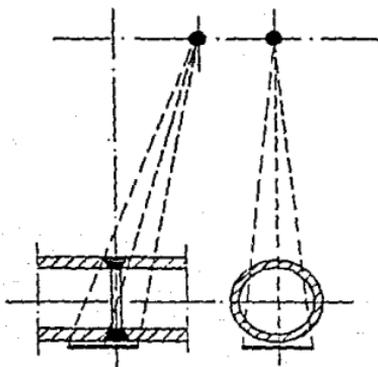


Radiografía de doble pared. Vista de una sola pared.

Figura 5.21

3.- Radiografía a doble pared en tubos de diámetro exterior, inferior a 100mm.

Se sitúan fuente y película en el exterior del tubo, según se ve en la figura 5.22



Radiografía de doble pared. Vista de doble pared.

Figura 5.22

En este caso, la fuente se situará de forma que no se proyecte sobre la radiografía la imagen de la soldadura que no se radiografía. -- Usualmente el ángulo entre el plano de la soldadura y el eje de la radiación suele ser de 15° .

La distancia foco-película se hallará tomando como espesor el diámetro exterior del tubo.

El indicador de imagen será el correspondiente al espesor doble de la pared y se situará en el exterior del tubo en la parte más próxima a la fuente con un eje longitudinal situado perpendicularmente al plano de la unión.

4.- Radiografía a doble pared en tubos o recipientes de diámetro superior a 100 mm.

La técnica de doble pared puede utilizarse en este caso (para Ir-192) en espesores y diámetros superiores se pueden utilizar fuentes de Co-60.

Quando la distancia foco-película sea igual al diámetro del tubo, la fuente se deberá situar pegada a la superficie del tubo.

5.14.4 Soldaduras a tope planas.

La fuente se sitúa perpendicularmente a la soldadura (Fig. 5.23)

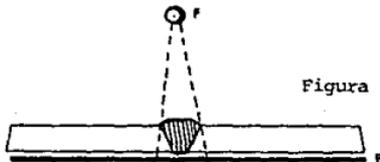


Figura 5.23

5.14.5 Soldaduras en ángulo.

Quando se trata de soldaduras con preparación de bordes pueden dar se los siguientes casos:

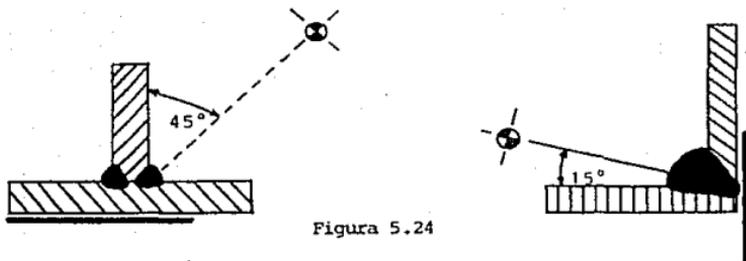


Figura 5.24

Si no hay preparación pueden darse los siguientes casos:

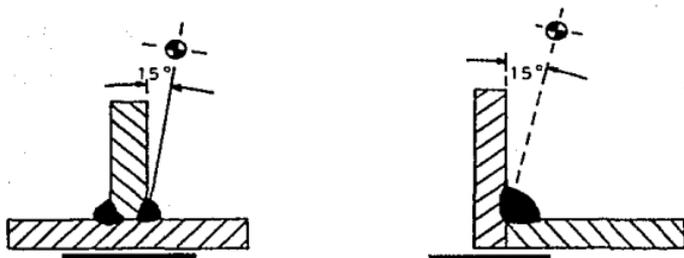


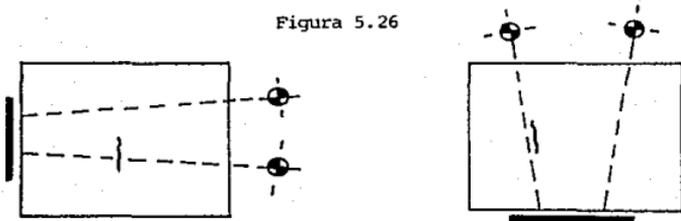
Figura 5.25

5.14.6 Radiografías de piezas de fundición y forja.

Usualmente se requieren equipos potentes dados los grandes espesores que suelen presentar estas piezas.

Ante la sospecha de defectos finos longitudinales tales como grietas de contracción y estalladuras o roturas de forja, habrá de recurrirse a efectuar exposiciones con distintos ángulos (Fig. 5.26)

Figura 5.26



CAPITULO 6**CONCLUSIONES**

6. CONCLUSIONES

Los exámenes no destructivos constituyen una técnica de gran -- utilidad en la inspección de materia prima, equipos y en el control -- de calidad de productos y procesos industriales.

No hace falta resaltar el efecto tan perjudicial de las discontinuidades tales como : grietas y/o fisuras, defectos en soldaduras -- y algunas otras fallas en un producto en donde su manufactura debe de ser de primera calidad, debido a las funciones que realizará, como -- por ejemplo: álabes de turbina, componentes de aeronaves, gasoductos, nucleoelectricas, etc. . En donde principalmente por la seguridad y el buen funcionamiento es necesario que todos sus componentes vayan checados al cien porciento. Por ejemplo las discontinuidades o grietas que pueden incubarse posteriormente en piezas o componentes estructurales, debido a condiciones ambientales degradantes, o durante su -- servicio , pueden llegar a comprometer seriamente la seguridad de al gún sistema, de ahí la importancia de del empleo de las pruebas no des tructivas para la diagnosis de una pieza o componente estructural.

Por lo anterior se juzgo de gran interés agrupar en el presente trabajo los métodos de pruebas no destructivas más usuales para dete~~c~~tar tanto defectos superficiales como subsuperficiales.

BIBLIOGRAFIA

- Introducción a la Metalurgia física
Sydney H. Avner
McGraw-Hill
- Metalurgia física para ingenieros
Albert G. Guy
Fondo Educativo Interamericano
- Metals Handbook Vol. 11
American Society for Metals (ASM)
- Boletín informativo del Instituto de Investigaciones Eléctricas Vol.11 Num. 4 julio/agosto 1987
Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)
- Inspección Radiográfica de Uniones Soldadas
Alfonso Ruiz Rubio
Ed. URMO 1971
- Introducción a los métodos de ensayos no destructivos
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
Ed. Madrid
- Boletín Tecnolab Vol.III Num. 15
Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México (LAPEM)
Edita Comisión Federal de Electricidad
- La radiografía en la industria moderna
Eastman Kodak Company
- Código ASME Sección V
Edición 1983
- Annual Book of ASTM Standards, Sección 3 Vol. 03.03
Edición 1988
- Radiografías de soldaduras
Instituto Internacional de la Soldadura