



ISSN 0188-7297



LA EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE MATERIALES ESTRUCTURALES Y PUENTES

Francisco J Carrión Viramontes
María Guadalupe Lomelí González
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Miguel Martínez Madrid

Publicación Técnica No. 231
Sanfandila, Qro, 2003

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**La evaluación no destructiva
de materiales estructurales y
puentes**

**Publicación Técnica No. 231
Sanfandila, Qro, 2003**

Este trabajo se realizó en la Coordinación de Equipamiento para el Transporte del Instituto Mexicano del Transporte por el Dr Francisco Javier Carrión Viramontes, el Ing Juan Antonio Quintana Rodríguez, la Ingra María Guadalupe Lomelí González y el Dr. Miguel Martínez Madrid.

Índice

Resumen	XI	
Abstract	XIII	
Resumen ejecutivo	XV	
1	Introducción	1
1.1	Causas típicas de falla	4
1.2	La evaluación no destructiva (END)	6
1.3	Criterios de diseño	8
1.4	Causas para retirar un elemento en servicio	11
1.5	Consideraciones adicionales	12
2	Efectividad de la evaluación no destructiva	15
2.1	Efectividad de la inspección no destructiva	15
2.1.1	Aspectos generales que afectan una IND	16
2.1.2	Confiabilidad de una inspección	19
2.2	Fundamentos de mecánica de la fractura	23
3	Técnicas para la inspección no destructiva	25
3.1	Clasificación de las técnicas de IND	26
3.1.1	Técnicas para la inspección superficial	27
3.1.2	Técnicas de inspección volumétrica	27
3.1.3	Técnicas de integridad o globales	28
3.2	Alcances de las IND	28
3.2.1	Detección y evaluación de defectos	29
3.2.2	Detección de fugas	29
3.2.3	Medición de dimensiones	29
3.2.4	Localización geométrica	30
3.2.5	Caracterización de la microestructura	30
3.2.6	Determinación de esfuerzos y respuesta dinámica	30
3.3	Criterios para seleccionar una técnica de IND	31
3.4	Capacitación, calificación y certificación	33

3.4.1	Niveles de certificación	34
4	Técnicas de inspección superficial	37
4.1	Inspección visual	37
4.1.1	Características generales de la inspección visual	44
4.2	Líquidos penetrantes (PT)	44
4.2.1	Procedimiento general de inspección con PT	46
4.2.2	Clasificación de los métodos PT	48
4.2.3	Ventajas y limitaciones de los líquidos penetrantes	51
4.3	Corrientes parásitas o Eddy (ET)	52
4.3.1	Tipos de bobina o sensores	54
4.3.2	Sensibilidad del método de corrientes Eddy	59
4.3.2.1	Conductividad eléctrica	59
4.3.2.2	Permeabilidad magnética	60
4.3.2.3	Factor de distancia (<i>Lift-off factor</i>)	61
4.3.2.4	Factor de relleno (<i>fill factor</i>)	61
4.3.2.5	Efectos de borde o frontera	62
4.3.2.6	Efecto de pantalla (<i>skin factor</i>)	62
4.3.3	Pruebas por impedancia	65
4.3.3.1	Sistemas de medición de impedancias	67
4.3.3.2	Sistemas para el análisis de fases	67
4.3.4	Frecuencia de operación o trabajo	71
4.3.5	Aplicaciones de las corrientes Eddy	71
4.3.6	Ventajas y limitaciones de las técnicas EC	72
4.4	Partículas magnéticas (MT)	73
4.4.1	Principios básicos del magnetismo	73
4.4.2	Generación del campo magnético	77
4.4.2.1	Yugos	77
4.4.2.2	Bobinas	78
4.4.2.3	Conductores centrales	78
4.4.2.4	Contacto directo	80

4.4.2.5	Puntas de contacto	81
4.4.2.6	Corriente inducida	81
4.4.3	Histéresis magnética y desmagnetización	82
4.4.3.1	Histéresis magnética	82
4.4.3.2	Desmagnetización	84
4.4.4	Detectores de la pérdida de flujo magnético	84
4.4.5	Partículas magnéticas	85
4.4.6	Otros detectores visuales	86
4.4.7	Otros detectores magnéticos	87
4.4.8	Ventajas y desventajas	88
5	Técnicas de inspección volumétrica	89
5.1	Inspección por ultrasonido (UT)	89
5.1.1	Propiedades de las ondas sonoras	91
5.1.2	Interacción con las fronteras	96
5.1.2.1	Impedancia acústica	97
5.1.2.2	Incidencia oblicua	99
5.1.2.3	Conversión de modos	100
5.1.2.4	Ángulos críticos	102
5.1.2.5	Doble interfase	105
5.1.2.6	Reflexión en esquinas	107
5.1.3	Atenuación de las ondas de ultrasonido	108
5.1.3.1	Atenuación de la intensidad	109
5.1.4	Técnicas de inspección por ultrasonido	110
5.1.4.1	Métodos de inmersión y contacto	110
5.1.4.2	Técnicas de pulso-eco	113
5.1.4.3	Técnicas de transmisión	113
5.1.4.4	Técnicas de contacto angular	115
5.1.4.5	Técnicas de ángulo crítico	117
5.1.4.6	Inspecciones con onda continua	118
5.1.5	Generación y detección del ultrasonido	118

5.1.5.1	Transductores piezoeléctricos	118
5.1.5.2	Transductores electromagnéticos-acústicos (EMAT)	122
5.1.5.3	Ondas de ultrasonido producidas por láser	122
5.1.6	Parámetros para la selección del ultrasonido	123
5.1.7	Formatos para la presentación de datos	124
5.1.8	Ventajas y desventajas del ultrasonido	127
5.1.8.1	Ventajas	128
5.1.8.2	Desventajas	128
5.2	Radiografía industrial	129
5.2.1	Principios básicos	129
5.2.2	Absorción y dispersión	132
5.2.3	Fuentes de radiación	136
5.2.3.1	Fuentes de rayos X	136
5.2.3.2	Fuentes de rayos gamma	140
5.2.3.3	Radiografía con neutrones	141
5.2.4	Formación de imágenes	143
5.2.4.1	Películas	143
5.2.4.2	Pantallas fluorescentes	144
5.2.4.3	Detectores en arreglos lineales	145
5.2.5	Calidad de las imágenes	146
5.2.5.1	Control de dispersión	146
5.2.5.2	Pantallas intensificadoras	146
5.2.5.3	Factores geométricos	147
5.2.5.4	Falta de resolución de la película	148
5.2.5.5	Indicadores de calidad de imágenes	149
5.2.6	Aspectos de seguridad	150
5.2.7	Tomografía computarizada (CT)	152
5.2.8	Ventajas y desventajas de la radiografía industrial	154
5.2.8.1	Ventajas	154
5.2.8.2	Desventajas	155

5.3	Emisiones acústicas (AE)	156
5.3.1	Aspectos generales	156
5.3.2	Señales de emisiones acústicas	158
5.3.3	Sensores acústicos	162
5.3.4	Técnicas de inspección	163
5.3.5	Ventajas y desventajas de las emisiones acústicas	164
5.3.5.1	Ventajas	164
5.3.5.2	Desventajas	165
6	Técnicas para la inspección de puentes	167
6.1	Radar de penetración (GRP)	167
6.1.1	Metodología Hermes	170
6.1.2	Metodología Peres	171
6.2	Sensores magneto-restrictivos	172
6.2.1	Detección de corrosión en cables y varillas	173
6.2.2	Detección de defectos en cables y varillas	175
6.2.3	Evaluación del tiempo de curado del concreto	176
6.2.4	Determinación de la tensión en cables	177
6.3	Sensores de corrosión	178
6.4	Antena electromagnética	180
	Referencias	183

Resumen

Se presenta una síntesis de las técnicas de evaluación no destructiva más empleadas en la industria y en el sector transporte. En cada caso, se analizan las diversas variantes de las técnicas, destacando sus ventajas y desventajas, y se analiza su uso en un amplio contexto que incluye el diseño y los diferentes escenarios de falla que pudieran presentarse.

Se discuten en forma general las diversas maneras de clasificar las técnicas de inspección no destructiva y se abordan en forma detallada las de inspección superficial, las de inspección volumétrica y algunas especiales para la inspección de puentes.

Respecto a las superficiales, se incluyen los principios básicos de la inspección visual, las técnicas por corrientes parásitas y las de partículas magnéticas. En cuanto a las volumétricas, se analizan el ultrasonido, los rayos X y las emisiones acústicas. Finalmente, para casos específicos se consideran el radar de penetración, los sensores magneto-resistivos, los sensores de corrosión y las antenas electromagnéticas.

Abstract

A brief description of the non destructive evaluation techniques most used in industry and in the transport sector are presented in this work. In each case, several variations of these techniques are analyzed, putting emphasis on their advantages and disadvantages, and reviewing their use in a more extent context that includes design and the most common failure scenarios that could happen.

In general, different classifications for the non destructive inspection techniques are discussed, and the surface, volumetric and special techniques for bridge inspection are described in detail.

For the surface inspection techniques, the basic principles for visual, Eddy current and magnetic particles are presented. For the volumetric, ultrasound, x ray and acoustic emission are analyzed. Finally, for the specific cases for bridge inspection, ground penetration radar, magnetoresistive sensors, corrosion sensors and electromagnetic antennas are considered.

Resumen ejecutivo

En los sistemas modernos de administración de puentes y, en general para los de diseño y operación de sistemas mecánicos complejos, la evaluación e inspección no destructiva juegan un papel preponderante desde el diseño hasta la operación. Nuevas teorías como la de la mecánica de la fractura y los modelos para determinar criterios de estimación de vida útil y vida residual, adquieren cada vez mayor importancia para garantizar la operación y servicio de dichos sistemas. De esta manera, el diseño y la operación se relacionan con la evaluación no destructiva a través de las características intrínsecas de los materiales y sus posibles mecanismos de falla, además de programas de mantenimiento que buscan prevenir fallas catastróficas o accidentes.

En los esquemas actuales de diseño y mantenimiento, el uso de procedimientos de inspección es fundamental; por lo que su desempeño debe ser evaluado en cada caso particular. La determinación de la sensibilidad y confiabilidad de las técnicas de inspección no destructiva, es fundamental para el éxito de toda inspección y evaluación posterior.

Dentro del contexto general, las diferentes técnicas de inspección no destructiva se clasifican en tres principales tipos: superficiales, volumétricas y globales. Las primeras permiten detectar o identificar defectos superficiales en los materiales; mientras que las volumétricas consisten en “ver” el interior de los materiales. Las globales se refieren a métodos que evalúan una estructura o sistema en forma integral y, bajo un criterio pasa-no pasa, se define la presencia de un problema o daño potencial, sin que necesariamente se identifique plenamente.

Dentro de las técnicas superficiales, tres son las más utilizadas e importantes: las visuales (incluyendo todos aquellos métodos de ayuda), los líquidos penetrantes, las corrientes parásitas o Eddy; y las técnicas magnéticas (incluyendo especialmente las partículas magnéticas). En cuanto a las volumétricas, las más utilizadas y con mayor potencial son el ultrasonido, la radiografía industrial y las emisiones acústicas.

En el caso de los puentes carreteros, varias técnicas de inspección se han desarrollado en la última década, dentro de las cuales y como muestra se presentan sin ser excluyentes, el radar de penetración; los sensores magneto-resistivos; los sensores de corrosión, y las antenas electromagnéticas. En todos los casos se han obtenido resultados favorables, aunque es necesario mayor desarrollo e investigación.

1 Introducción

A pesar de que las fallas de un elemento estructural o de una estructura completa son poco comunes, llegan a suceder atribuyéndose generalmente a dos causas: a los defectos preexistentes de manufactura, o al daño inducido durante el servicio.

El primer tipo de causa resulta fundamentalmente de la negligencia, la ignorancia o los errores humanos en alguno de los procesos de diseño, selección de materiales, manufactura o control de calidad. En cambio, la segunda causa de falla estructural, que es más difícil prevenir por presentarse en nuevos diseños y/o nuevos materiales, se debe a comportamientos desconocidos o condiciones que no se pudieron anticipar o prever durante el diseño.

En ambos casos, las fallas son factibles de superar con la utilización del criterio de diseño con tolerancia al daño y la aplicación adecuada de la evaluación no destructiva, que son dos conceptos diferentes íntimamente ligados que suelen asegurar la operación de una estructura por determinados periodos de servicio.

El criterio de diseño con tolerancia al daño es un concepto relativamente reciente; se refiere a la habilidad de una estructura o un elemento estructural para resistir la presencia de defectos o grietas preexistentes durante un tiempo determinado. Esto es, la capacidad para seguir operando mientras una grieta o defecto sea menor a cierto tamaño crítico sin que su integridad estructural se vea comprometida.

De manera complementaria, la evaluación no destructiva proporciona la información actualizada de la situación en que se encuentra un componente en determinado momento, de manera que identifica la presencia de una o varias grietas, y conocer la localización y tamaño de las mismas.

A partir de esa información y de un análisis de las condiciones de operación, propiedades del material y el diseño (en el que está incluido el tamaño de grieta mas grande tolerable), se establece qué tan críticas son las grietas y en caso de no serlo, predecir su comportamiento y estimar cuánto transcurrirá para que lo sean. De esta manera se define un tiempo de vida útil o establece un periodo de inspección que permite dar seguimiento al desarrollo de las grietas, y fijar programas de mantenimiento.

En la práctica, para un lote de cierto componente mecánico o estructural, se tiene que el número de componentes fallados en función del tiempo presenta un comportamiento como el de la figura 1.1. En este caso, generalmente se tiene un gran número de fallas al inicio de la vida útil por los defectos latentes que resultan del proceso de manufactura. Después de la etapa inicial, se presenta la etapa estable en la que las fallas se reducen significativamente hasta que el componente llega al final de su vida útil, cuando el número de fallas se incrementa nuevamente como respuesta al desgaste, la fatiga y/o el deterioro por operación normal.

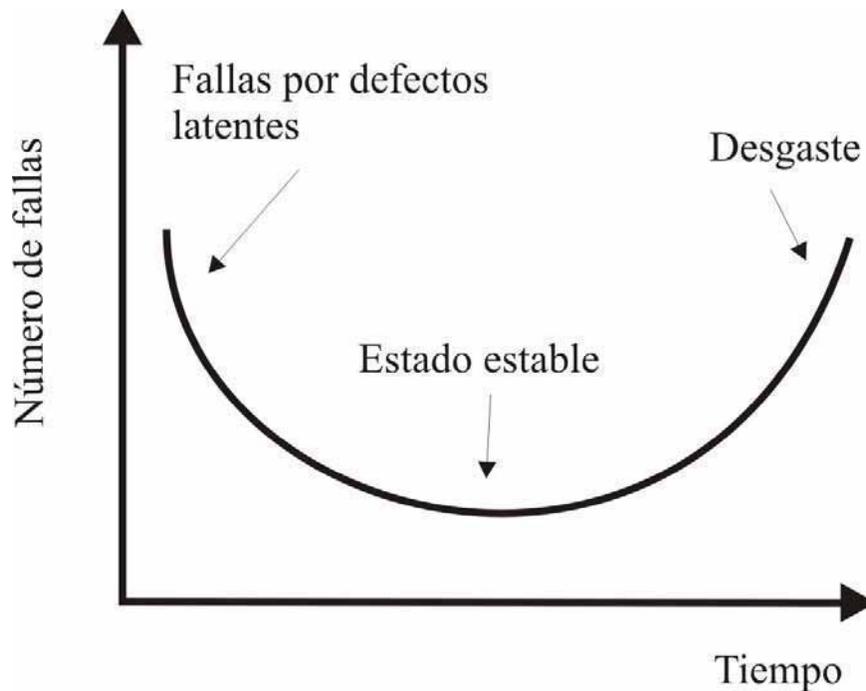


Figura 1.1
Comportamiento típico para la incidencia de fallas

La evaluación no destructiva proporciona el primer paso para asegurar la integridad estructural mediante identificar componentes dañados que deben ser reparados o sustituidos. Como todas las técnicas de inspección tienen sus limitaciones y es posible exista un número de grietas o defectos que no se hayan detectado; el diseño con tolerancia al daño se convierte en la segunda línea de defensa contra las fallas catastróficas incorporando configuraciones y materiales resistentes a esas grietas indetectables. Es por esto que la tolerancia al daño se considera también como la medida o calificación del grado de protección de una estructura ante situaciones o condiciones de falla no anticipadas, que pudieran resultar catastróficas.

Existen varios ejemplos de fallas catastróficas en las que los diseños no tuvieron tolerancia al daño. Uno de ellos es el de los buques *Liberty* construidos durante la Segunda Guerra Mundial ^[1]. En esa época, la demanda de barcos cargueros se había incrementado ante las necesidades de suministro de los Estados Unidos de América al continente europeo. Para aumentar la capacidad de producción de los astilleros se desarrolló un proceso innovador que sustituyó los remaches por soldadura; se consideró exitoso hasta que en 1943 un buque se partió en dos cuando navegaba de Siberia a Alaska al norte del Océano Pacífico.

Posteriormente, de 2700 buques construidos, 400 sufrieron fracturas del mismo tipo; de las cuales 90 se clasificaron como graves. Las investigaciones revelaron que las fallas se debieron a una combinación de tres factores: la quilla de los

buques tenían defectos o grietas por soldaduras debido a la falta de pericia del personal técnico; las grietas se iniciaron en esquinas donde había una alta concentración de esfuerzos; y el acero empleado mostraba baja tenacidad a la fractura. Lo anterior, aunado con la baja temperatura del ambiente, provocó que una de las grietas en la soldadura se propagara de manera crítica al grado de llegar a partir en dos al buque.

Otro ejemplo mas reciente de falla por baja tolerancia al daño es el del trasbordador espacial *Challenger* ^[1]. En este caso se debió a que el material con que se fabricó un sello no se comportó adecuadamente ante las bajas temperaturas y altas presiones a las que estaba sujeto, provocando fugas de combustible (Figura 1.2), y la explosión final del trasbordador.



Figura 1.2
Fotografía del trasbordador espacial *Challenger*, momentos antes de la explosión

En ambos casos, las fallas se originaron por condiciones de operación extremas y comportamientos imprevistos del material que pudieron evitarse de haberse aplicado el criterio adecuado para la tolerancia al daño.

Un ejemplo de un buen diseño con tolerancia al daño es el de un bombardero B-17F que en una misión en África durante la Segunda Guerra Mundial, después de chocar con otro avión, y sufrir un daño significativo en el fuselaje (Figura 1.3); fue capaz de volar 90 minutos en esas condiciones y llegar a su base.



a) Bombardero B-17F en vuelo después de una colisión en el aire



b) Detalle del daño después del aterrizaje

Figura 1.3
Ejemplo de un diseño con tolerancia al daño

1.1 Causas típicas de falla

Existe un gran número de casos documentados sobre fallas en materiales y componentes estructurales, cuyo origen se debe fundamentalmente a daños inducidos en servicio [2]. Si bien es cierto que las causas son múltiples e intervienen diversos factores; es posible clasificarlas de manera general según las causas más comunes son:

- a) Deformación plástica
- b) Deformación inelástica
- c) Pandeo
- d) Fatiga
- e) Fluencia
- f) Corrosión
- g) Fractura

Fallas por deformación plástica

Debido a que todas las estructuras se constituyen con materiales deformables, es importante considerar en el análisis estructural los cambios en las dimensiones que producen las cargas aplicadas. En general, los materiales se comportan en forma elástica cuando las fuerzas que actúan sobre ellos son pequeñas, y las deformaciones o flexiones que se presentan se pueden describir perfectamente por la teoría de la elasticidad de los materiales [3].

El parámetro que rige el comportamiento de las deformaciones elásticas es la rigidez del material; y en el diseño generalmente se supone que las deformaciones se recuperan cuando se descarga, y el componente recupera su forma original. Las deformaciones elásticas no son causa de falla por sí mismas, pero pueden inducir fallas por interferencias o contacto entre componentes al momento de

deformarse, provocando que el sistema se comporte de manera distinta a la prevista. En general, estas fallas son por errores en el diseño.

Fallas por deformación inelástica

Cuando las fuerzas que se aplican a un componente estructural son excesivas, pueden sobrepasar el límite elástico del material (valor de cedencia), y provocar deformaciones permanentes en el mismo. Aunque las estructuras se diseñan para no sobrepasar estos límites de cedencia, es posible que esto ocurra en las zonas de mayor concentración de esfuerzos. No todas las deformaciones permanentes conducen una fractura inmediata, pero es común que se conviertan en zonas débiles de la estructura en las que la concentración de esfuerzos se puede incrementar hasta generar grietas que posteriormente se conviertan en fracturas ^[4].

Fallas por pandeo

Esta es una falla típica de vigas o placas sometidas a cargas de compresión ^[5]. En este caso, se produce una inestabilidad estructural cuando las cargas de compresión generan deflexiones laterales, y subsecuentes momentos de flexión que desembocan en más deformaciones. El pandeo puede ocurrir con cargas muy pequeñas, menores a las de cedencia y es un fenómeno no lineal controlado por la rigidez del material y su geometría. El pandeo es una falla que cuando se presenta suele ser catastrófica.

Fallas por fatiga

Cuando una estructura se somete a cargas cíclicas se produce un efecto de deterioro en el material que, aun con cargas pequeñas suelen generarse grietas y fallas graves ^[6]. En general, el deterioro se inicia con defectos o micro-grietas que actúan como zonas de concentración de esfuerzos, para la aparición y propagación de grietas. Ante las cargas cíclicas, la energía de deformación es particularmente grande en zonas de concentración de esfuerzos que normalmente se liberan mediante la ruptura del material manifestándose en el crecimiento de las grietas. La mecánica de la fractura ^[7] ha desarrollado teorías para describir este fenómeno y, de hecho, es uno de los fundamentos básicos para establecer criterios de diseño e inspección no destructiva.

Fallas por fluencia

La fluencia es un fenómeno asociado con el tiempo, y ocurre cuando un elemento estructural se somete a cargas estáticas en periodos prolongados. Normalmente, cuando una carga se libera, las deformaciones elásticas del material se recuperan, pero las inelásticas permanecen, aun sin carga. Estos cambios en dimensión pueden ser permanentes, o en algunos casos se recuperan gradualmente por medio de un proceso de "relajamiento". En casi todos los casos, la capacidad de recuperación de los materiales depende del tiempo durante el cual estuvieron sometidos a las cargas de deformación y a la magnitud de éstas.

En el caso de la fluencia, aun cuando las cargas no sobrepasan los límites elásticos presentan deformaciones permanentes debido a que ocurren procesos

de difusión y dislocación ^[8], los cuales dependen del tiempo y la temperatura. Por esto, la fluencia es particularmente importante en metales cuando trabajan por tiempos prolongados a altas temperaturas; mientras que en polímeros ocurren a temperatura ambiente.

Fallas por corrosión

La corrosión es una degradación del material por ataque químico que se presenta en diversas formas --galvánica (por el contacto de dos metales diferentes), picaduras, exfoliación, ataque intergranular, o en combinación con la concentración de esfuerzos--. Es un proceso altamente ligado con el tiempo que depende de las características del material y del medio ambiente ^[9]. En general el proceso de corrosión es más agresivo cuando el material se somete a altas temperaturas y humedad. La corrosión se manifiesta en la mayoría de los casos como una pérdida de espesor, o sección eficaz del material base; sin embargo, en combinación con esfuerzos de tensión, se forman y desarrollan grietas que en muchos casos, suelen ser graves.

Fallas por fractura

Una falla catastrófica en una estructura ocurre cuando se presenta la ruptura de una o varias de sus partes. En la mayoría de los casos, las fallas por fractura se deben a sobrecargas, aunque existen algunos que son por defectos o grietas preexistentes con niveles relativamente bajos de carga. La fractura de un material, típicamente presenta un comportamiento dúctil en el que se libera una gran cantidad de energía en forma de deformación permanente, por lo que es posible anticipar la falla mediante detección de deformaciones.

Existen otros casos particularmente graves y peligrosos en los cuales ocurren las fracturas sin previo aviso; se deben a que el material presenta un comportamiento dúctil, que se caracteriza por tener muy poca deformación plástica. El parámetro que mide la resistencia a la fractura de un material es el factor de tenacidad a la fractura ^[1,7], que es una medida de la capacidad de un material con una grieta para resistir una condición de carga sin que llegue a fracturarse totalmente.

1.2 La evaluación no destructiva (END)

Se puede definir la como *el proceso de inspección y análisis de un componente o elemento estructural para determinar su integridad*. Así, la END no sólo comprende todo el proceso de inspección no destructivo, sino también el análisis de los resultados de esta inspección para calificar la condición estructural del componente evaluado. Es fundamental distinguir entre los conceptos, evaluación no destructiva (END) e inspección no destructiva (IND); ya que el primero es un proceso más complejo que incluye al segundo.

En toda END se deben tener en consideración dos aspectos fundamentales: la capacidad de la técnica para la IND, y el fundamento teórico de la ciencia de los materiales e ingeniería mecánica estructural para el análisis. El éxito de una END

depende, por un lado, de una adecuada selección e interpretación de la técnica empleada en la inspección no destructiva, comúnmente llamada técnica no destructiva o método no destructivo.

Por el otro lado, la selección y aplicación adecuada del marco teórico es imprescindible, ya que es el sustento para el análisis. Para lograr este éxito es prioritario contar con información *a priori* que permita conocer el tipo de fallas que se pueden presentar y así tener elementos que faciliten la selección del método no destructivo más adecuado, considerando para ello las capacidades propias del método a través de los parámetros de sensibilidad y confiabilidad.

De manera general, se puede decir que las técnicas no destructivas más comunes son: inspección visual; radiografía; ultrasonido; corrientes parásitas; partículas magnéticas y líquidos penetrantes; de las cuales, aunque limitada pues sólo permite identificar defectos superficiales, la inspección visual es la más utilizada de todas.

Para detectar defectos internos se emplea la radiación X o gamma (radiografía), o la energía acústica (ultrasonido). Cuando se trata de defectos superficiales pequeños, que al no detectarse con una inspección visual, se pueden identificar midiendo cambios en conductividad eléctrica, o examinando los cambios en las corrientes inducidas por campos magnéticos. Por su parte, las grietas en materiales ferromagnéticos se localizan magnetizando al elemento y observando alteraciones en campo magnético.

Cuando se emplea cualquiera de las técnicas de inspección destructiva es importante considerar que hay un límite en el tamaño del defecto que pueden identificar con un alto grado de confiabilidad. Existe un gran número de factores que influyen en esto, por ejemplo, cuando los defectos son demasiado pequeños, no es fácil detectarlos, a menos que se tengan condiciones de inspección muy favorables. Por otro lado, si las condiciones de inspección son muy desfavorables, es posible que defectos muy grandes no se lleguen a identificar.

No sólo las condiciones ambientales para una inspección son importantes, sino también factores que incluyen la selección de la técnica de inspección; la calibración y el manejo del equipo utilizado; la preparación del espécimen; el tipo de defecto y su orientación; y la capacitación y disposición del inspector (estado de ánimo, experiencia, expectativas, etc).

Es importante destacar que el objetivo de una IND, **NO** es determinar el tamaño más pequeño que se puede encontrar, sino más bien, establecer el tamaño de defecto más grande que se puede dejar de detectar. Como se verá mas adelante, existen varios métodos estadísticos para establecer la probabilidad de detección de defectos en cada método de inspección, considerando los límites y condiciones de una aplicación determinada.

1.3 Criterios de diseño

Como se mencionó, la evaluación no destructiva juega un papel fundamental en la prevención de fallas; por ejemplo, en estructuras nuevas permite detectar defectos en el proceso de manufactura o construcción, y durante la vida útil de la estructura, identificar daños por corrosión, fracturas o defectos que el medio y las condiciones de operación inducen, poniendo en riesgo la integridad o seguridad de la misma.

Partiendo del hecho que los materiales a nivel micro-estructural no son perfectos, y cada uno de los defectos se pueden convertir en grietas y fallas, es necesario tener una aproximación de integridad estructural que permita evaluar el desempeño del material y detectar las fallas antes de que se conviertan en críticas.

Por ello, es claro que existe una relación muy estrecha entre el criterio de diseño, las condiciones de operación y el método de inspección que se empleará en una evaluación no destructiva. Si bien no es objeto de este trabajo realizar un análisis detallado de los criterios de diseño de estructuras o componentes mecánicos, es conveniente describir algunos aspectos fundamentales para establecer la relación existente, con la evaluación no destructiva.

Criterio de diseño a la fatiga

Existen muchas aproximaciones para asegurar la integridad de las estructuras, y en todas la clave es diseñar para una larga duración mediante una selección adecuada de los materiales. En el caso del diseño a la fatiga, la estructura se calcula de tal manera que los elementos se someten a bajos niveles de esfuerzos para evitar que los defectos más grandes que pudieran estar presentes en la estructura no se propaguen; esto es, que el factor de intensidad de esfuerzos en estos defectos sea menor del umbral de crecimiento de grietas ΔK_{Ith} .

Otra manera de proteger el diseño de una estructura contra la falla por fatiga es colocar refuerzos que detengan el crecimiento de alguna grieta que se pudiera desarrollar. Todo este criterio se completa con la evaluación no destructiva de la estructura, tanto al momento de su construcción, como durante toda su vida útil. En este caso, el objeto de la END es monitorear el comportamiento de la estructura para verificar que se cumplen las condiciones de operación supuestas durante el diseño.

Criterio de diseño de vida infinita

El primer criterio de diseño que se utilizó en estructuras fue el de vida infinita; consiste en hacer los diseños de tal manera que los esfuerzos en el material están por debajo del límite del esfuerzo de resistencia a la fatiga, S_e , de acuerdo con el modelo de fatiga de la mecánica del medio continuo descrito por las curvas S-N.

A pesar de que este criterio resolvió muchos problemas estructurales, posteriormente se encontró que el esfuerzo de resistencia a la fatiga es un parámetro muy sensible a los defectos internos del material y a las condiciones de prueba con la cual se determinaba, por lo que muchos diseños fallaron por fatiga en condiciones de operación real. Ante la imposibilidad de asegurar un material “perfecto”, los ingenieros desecharon el criterio rápidamente, y optaron por los basados en la mecánica de la fractura que buscan asegurar la integridad estructural para los materiales “reales” disponibles en el mercado.

Criterio de diseño de vida segura

Un criterio que se deriva del criterio de vida infinita es el de vida segura. Éste determina la vida de un componente tomando como base un estudio estadístico de falla en el que se establece la probabilidad de fallas como función del tiempo; y el valor de vida promedio se divide entre un factor de seguridad que delimita una vida segura de servicio para la cual la probabilidad de falla es prácticamente nula (figura 1.4).

Normalmente el factor de seguridad es entre 3 o 4, y aunque se utilizó mucho en diseños hasta mediados del siglo XX con resultados satisfactorios, se han documentado muchos casos en los que surgieron fallas por fatiga con tiempos de servicio menores al 50% de la vida segura estimada ^[11].

El talón de Aquiles del diseño de vida segura es la presencia de daño estructural, o el comportamiento no anticipado del material en la etapa de diseño, lo cual resulta en una falla por fatiga que se desarrolla en muy poco tiempo de servicio. Aun utilizando factores de seguridad muy altos, no es posible prevenir fallas que se presentan con 100 h de servicio cuando la vida segura de servicio, se calculaba en 400 h ^[11].

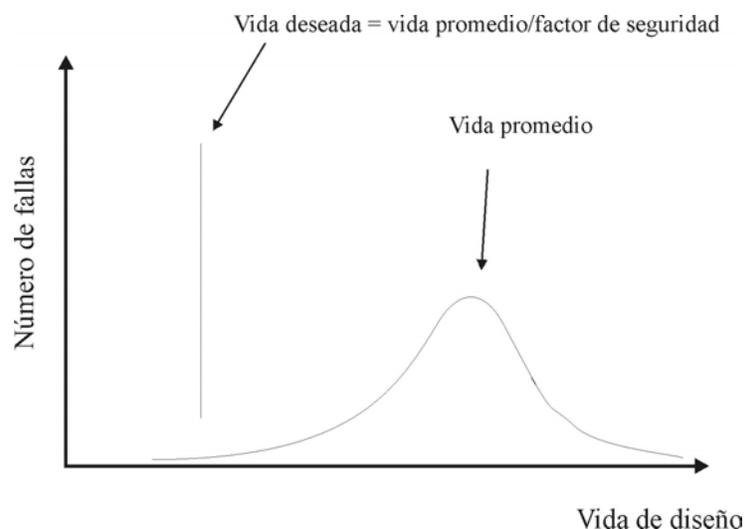


Figura 1.4
Esquema para calcular la vida segura de servicio, utilizando la curva de probabilidad de falla en un componente

Criterio de diseño con tolerancia al daño

Para evitar fallas en componentes estructurales antes de que lleguen a su vida útil de diseño, se desarrollaron métodos de diseño con tolerancia al daño cuyo objetivo es asegurar la integridad de una estructura que puede tener defectos o daños no identificados al inicio de su vida en servicio. Como se mencionó, la tolerancia al daño es la capacidad de una estructura o un elemento estructural para resistir la presencia de fracturas o grietas de un determinado tamaño, en un determinado periodo de servicio. El tamaño inicial de una grieta se determina con base en las limitaciones de inspección con la idea de que esto sea un criterio conservador. Existen dos aproximaciones generales para garantizar la integridad estructural, bajo este criterio.

La primera aproximación es el criterio de crecimiento lento de una grieta. En la figura 1.5 se presenta una gráfica del proceso de crecimiento típico de una grieta por fatiga. Se da con un tamaño inicial de grieta, y con el tiempo crece. Al principio, el crecimiento pero a medida que se aproxima al tamaño crítico, es más rápido.

El objeto de esta aproximación es calcular el tiempo de servicio de la estructura de tal manera que quede dentro del tiempo de crecimiento lento para las condiciones de servicio. Se puede utilizar un factor de seguridad (típicamente 2) para reducir el tiempo de servicio. Una vez que haya transcurrido el tiempo calculado de servicio, se debe inspeccionar la estructura o el componente a fin de determinar si debe ser reemplazado, reparado, o se le permite un periodo mayor de servicio. Como es claro, la END es primordial en el empleo de este criterio.

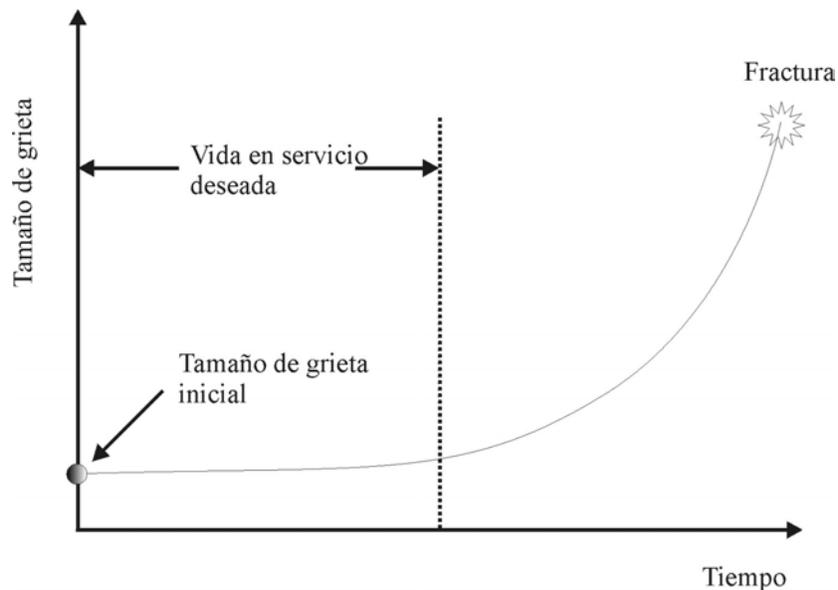


Figura 1.5
Curva típica de crecimiento de grieta por fatiga para determinar la vida en servicio, con base en el criterio de crecimiento lento

El segundo criterio es el del diseño a prueba de falla. Su objetivo es analizar todos los casos críticos de falla, y utilizar refuerzos que sirvan para detener el crecimiento de posibles grietas, de tal manera que la distribución de esfuerzos se modifique para que sea otro elemento no dañado el que resista la mayor carga. Si ha de crecer alguna otra grieta, el diseño es tal que esto deba ocurrir en otro elemento, el cual a su vez va estar diseñado para que en algún momento se detenga el crecimiento de la grieta (figura 1.6). Es evidente que este criterio tiene dos inconvenientes fundamentales; el primero, el alto costo, ya que requiere un análisis de falla completo y muy detallado. Por otro lado, el costo de fabricación también suele ser alto por el uso de elementos complejos de refuerzo para detener posibles grietas críticas, y el uso de materiales de altas especificaciones; por lo anterior, únicamente se aplica en componentes o sistemas críticos.

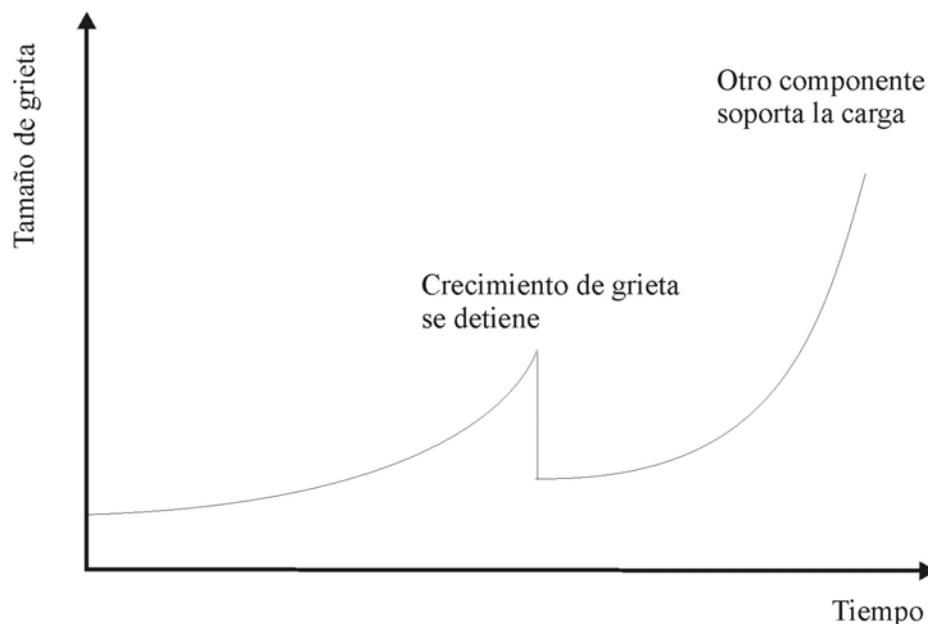


Figura 1.6
Proceso de crecimiento de grieta con elementos para detener grietas,
utilizando el criterio de diseño a prueba de falla

1.4 Causas para retirar un elemento en servicio

Cuando se utiliza adecuadamente la evaluación no destructiva y el análisis de crecimiento de grietas en los materiales, es posible definir una estrategia para retirar del servicio un componente mecánico o estructural, que teóricamente, ocurrirá después de un largo periodo de servicio. En la figura 1.7 se indica cómo el tiempo de servicio de un elemento se prolonga mediante una secuencia adecuada de inspecciones no destructivas y reparaciones.

Los tiempos o periodos de inspección se pueden calcular considerando el tamaño más grande de las grietas que se pudieran dejar de detectar, y un factor de seguridad. Este proceso, en principio se puede repetir un número indeterminado de veces, pero en la práctica se suspende cuando el costo de inspección y reparación es más alto que el de remplazo. Es evidente que el criterio al que al inicio de la sección se hace referencia, es de carácter técnico-económico. La clave fundamental del procedimiento es la confiabilidad de la inspección no destructiva para conocer el tamaño de grieta más grande aun cuando no sea detectada, y de ahí calcular la vida residual del componente.

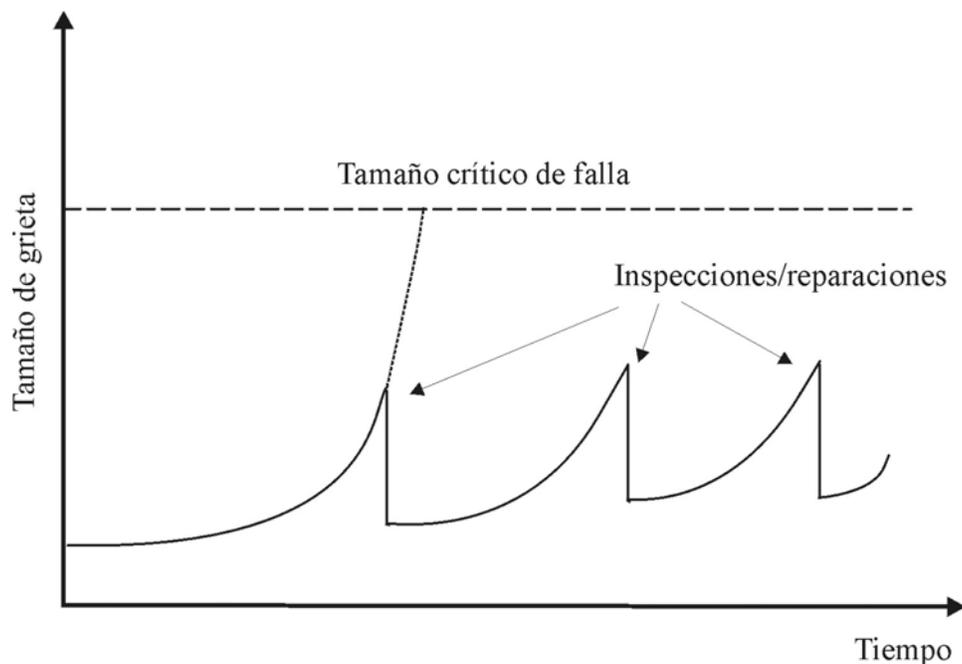


Figura 1.7

Crecimiento de grietas con procesos cíclicos de inspección / reparación para alargar la vida de un componente estructural o mecánico

1.5 Consideraciones adicionales

El propósito de este subcapítulo es dar una breve introducción a los aspectos fundamentales que los ingenieros deben tomar en cuenta para que un diseño sea seguro, y garantice su integridad durante la vida en servicio. La meta es anticipar las fallas y proporcionar los medios para mitigar los efectos de éstas cuando se presentan. Para lograr lo anterior, hay varios aspectos relevantes: el diseño, la fabricación, y la evaluación no destructiva en todas las etapas del componente o sistema.

Mientras que los esfuerzos son cada vez mayores para asegurar la integridad de las estructuras, se ha demostrado que es imposible asegurar que alguna se encuentre libre de defectos. Esto, sin tomar en cuenta sus complejas dimensiones. Más aún, es imposible prevenir daño accidental inducido durante el servicio, que aunado con la fatiga, corrosión o alguna otra forma de degradación del material, desencadena una falla grave. Por ello, es innegable la importancia de las END antes y después de la construcción de una estructura, o un sistema complejo.

El diseño con tolerancia al daño ha demostrado ser una de las aproximaciones que garantizan la integridad de las estructuras, y reducen el riesgo a daño; sólo se puede lograr con estudios detallados de diseño, y la selección y aplicación adecuada de las inspecciones no destructivas. En los capítulos posteriores se analizarán las técnicas más comunes, y los aspectos fundamentales que se deben tener en la selección y aplicación de una evaluación no destructiva.

2 Efectividad de la evaluación no destructiva

La evaluación no destructiva (END) no comprende solamente el proceso de inspección utilizando varias técnicas no destructivas para localizar y medir uno o varios defectos en un elemento estructural o mecánico, sino también todo un análisis con el que se da una interpretación desde el punto de vista estructural o mecánico del comportamiento en cuestión, considerando la localización y características del defecto identificado y las condiciones de carga a las que está sometido. Todo ello con objeto de calcular la vida útil, o remanente en las condiciones presentes y futuras de operación y establecer un criterio cuantitativo de la sanidad del elemento que en particular.

Hay diferentes niveles de evaluación de acuerdo con el grado de detalle del análisis que se lleve a cabo; sin embargo, existe una marcada diferencia entre lo que corresponde a una END y lo que propiamente es una inspección no destructiva ó IND. Esta última, únicamente corresponde a la primera etapa de la END que considera una o varias técnicas no destructivas para identificar y localizar defectos superficiales o dentro del material constitutivo del componente que se analiza. La caracterización de los defectos, tanto superficiales como internos en un elemento, no determinan por sí mismos la capacidad de trabajo y operación del mismo; para ello, es necesaria una segunda etapa de análisis que regularmente se basa en conceptos de mecánica del medio continuo y mecánica de la fractura con objeto de delimitar la acción de los defectos en el comportamiento estructural en determinadas condiciones. Esta segunda etapa es la que distingue a una END de lo que es una IND.

De lo anterior se puede establecer que la efectividad de una END no depende solamente de la capacidad de la técnica no destructiva *per se*, sino también de la precisión y fidelidad del marco teórico que se emplea en el análisis. Es por ello, que este capítulo se divide en dos partes; la primera analiza de manera general lo que corresponde a la efectividad de las inspecciones no destructivas; y la segunda, el marco teórico de la mecánica de la fractura para establecer criterios generales de aplicación, según el material y las condiciones específicas de trabajo y diseño.

2.1 Efectividad de la inspección no destructiva

La efectividad de una IND se podría determinar en términos de dos parámetros: la sensibilidad, y la confiabilidad de la técnica. La sensibilidad se refiere principalmente a la resolución mínima del método que se relaciona con el tamaño más pequeño de defecto que se puede detectar. Por otra parte, la confiabilidad se refiere a la certeza con que se localizan o identifican defectos de cierto tamaño. No obstante que el empleo de ambos parámetros parece razonable para calificar una técnica de inspección no destructiva, es necesario precisar su interpretación cuantitativa al existir varios factores adicionales que no dependen de la técnica en sí, y que afectan los resultados de manera importante.

Antes de presentar los procedimientos y criterios para establecer la efectividad de una IND, es importante discutir algunos aspectos prácticos y de sentido común con el propósito de comprender y establecer los alcances y limitaciones de las técnicas no destructivas.

2.1.1 Aspectos generales que afectan una IND

Un método ideal para la inspección no destructiva debe ser barato, preciso y confiable; y aplicarse tanto en planta para calificar a un componente en las distintas etapas de su fabricación, como en campo para calificarlo estando en servicio. En general, las técnicas de inspección no destructiva trabajan bajo el principio de que se aplica algún tipo de estímulo sobre el componente que se evalúa y mide la respuesta de éste como resultado del estímulo. Algunos ejemplos al respecto son la energía magnética, la energía ultrasónica, o la radiación electromagnética. El objeto de la inspección es interpretar la respuesta e identificar cierto tipo de anomalía que se asocie con algún defecto o grieta en el componente.

De forma ideal, la interpretación de una medición debería conducir a una decisión de aceptación o rechazo. Así, por ejemplo, si a^* es el tamaño de grieta máximo permisible, cualquier pieza con una grieta de tamaño $a \leq a^*$ sería aceptada, mientras que aquellas con grietas de magnitud $a > a^*$ resultarían rechazadas. En este caso hipotético, la gráfica de la probabilidad de rechazo como función del tamaño de grieta correspondería a la de la figura 2.1. Cabe destacar que el tamaño de grieta máximo permisible, a^* , se determina normalmente con los criterios de la mecánica de la fractura, como se discutirá mas adelante.

En la práctica, para una técnica específica de inspección no destructiva, cada tamaño de grieta tiene una probabilidad de ser detectada, y la curva de probabilidad de rechazo ideal de la figura 2.1, se modifica de acuerdo con la figura 2.2. En este caso se incurre en dos tipos de errores; el de tipo I, corresponde a la situación en que un componente se rechaza por una grieta de tamaño menor a a^* . Desde el punto de vista operativo, este tipo de error no produce ningún riesgo, ya que simplemente se rechazan piezas que de otro modo serían aceptadas; sin embargo, el impacto económico llega a ser significativo. Por su parte, el error tipo II corresponde al caso en el que se aceptan componentes con tamaños de grieta mayores al de a^* , poniéndose en servicio piezas que deberían ser rechazadas; por tanto, se incurre en problemas de seguridad que pudieran causar fallas prematuras del componente.

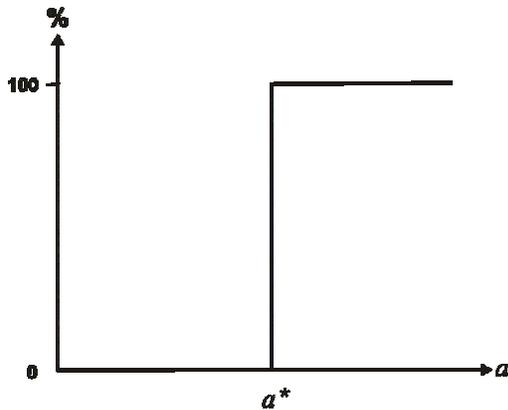


Figura 2.1
Probabilidad de rechazo, según el tamaño de grieta (caso ideal)

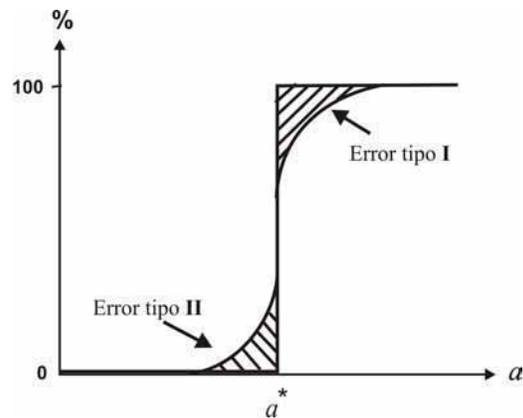


Figura 2.2
Probabilidad de rechazo, según el tamaño de grieta (caso real)

Ante todo lo anterior, la clave fundamental en la evaluación de una IND *no está en conocer el tamaño de grieta más pequeño que se puede detectar*; sino más bien, **en conocer el tamaño de grieta más grande que se puede dejar de detectar**, y que conllevaría a desencadenar una falla antes de que se cumpla el tiempo de la vida útil del componente. Esto depende fundamentalmente del tipo de técnica de inspección utilizada; no obstante también hay otros factores externos que la alteran. De manera general, los factores que influyen en el desempeño de una IND se pueden dividir en cuatro:

- Factores geométricos
- Factores humanos
- Factores técnicos
- Factores ambientales

Los factores geométricos corresponden a aspectos como la geometría del componente y su tamaño, así como a la orientación y localización de la falla; por ejemplo, con la técnica de ultrasonido, la orientación es importante, ya que cuando es paralela a la dirección del haz ultrasónico resulta difícil detectarla; mientras que la probabilidad de detección es muy alta si es perpendicular. Por otro lado, la ubicación influye de manera significativa pues en general una técnica de inspección resulta muy buena para grietas superficiales, pero no interiores o viceversa. En cuanto a la forma del componente, es fundamental tomar en cuenta todos los detalles del mismo, ya que pudieran ocultar u obstruir la detección de defectos.

Los factores humanos son muy variados, pero fundamentalmente se refieren al inspector en sí mismo. La actitud mental es esencial para un buen resultado, pero

también lo son el estado de ánimo, el cansancio y la salud. La capacitación y la experiencia son factores que ayudan al éxito de la inspección; en ocasiones se pueden tener expectativas sobre lo que se puede encontrar, creando una tendencia que llega a afectar de forma negativa o positiva al trabajo.

El efecto normalmente es negativo cuando se enfoca la inspección a un tipo de falla particular y se da poca atención a otras posibles averías; por el contrario, es positivo cuando existe un conjunto de experiencias para conocer los puntos débiles y hacer que se concentre más la inspección en ellos. La figura 2.3 muestra una comparación de los resultados en la inspección estructural de aviones Boeing 747 antes y después de contar con información sobre las zonas proclives a generar grietas, y de aquellas en las que se incrementa su efectividad. Otro factor significativo suele ser la aplicación continua y rutinaria de algún procedimiento, ya que puede causar aburrimiento y disminuir la atención del inspector sobre el trabajo que realiza.

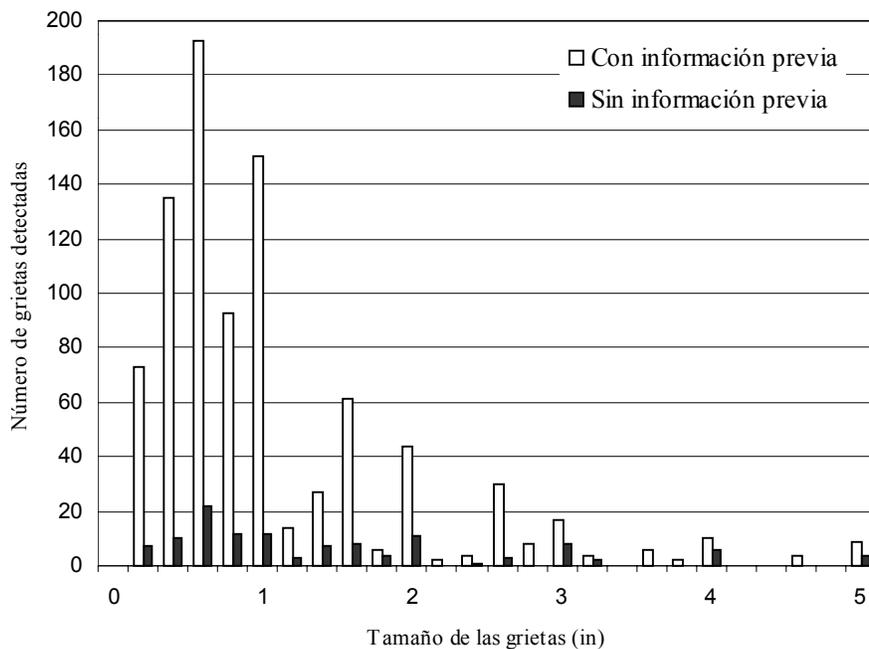


Figura 2.3
Comparación del número de grietas, detectadas con y sin información previa

Los factores técnicos comprenden la selección de la técnica de inspección, la calibración del equipo, el uso apropiado del mismo, y la correcta aplicación de la metodología de inspección. La selección de una técnica se refiere a determinar un método de excitación y medición del componente, como puede ser escoger entre rayos X, ultrasonido, emisiones acústicas o corrientes parásitas.

La selección depende del problema potencial que se quiere detectar y de un conocimiento detallado de las capacidades y limitaciones de cada técnica. La

metodología se refiere al procedimiento mismo que se utilizará; por ejemplo, en ultrasonido se puede aplicar el haz recto o el haz angular. Definitivamente, la correcta calibración y el uso apropiado del equipo son determinantes para una buena IND.

Finalmente, los factores ambientales como el clima, la humedad, el ruido, la accesibilidad o la temperatura ambiente, influyen también de manera importante, tanto en el inspector, como en el equipo y en las condiciones específicas de trabajo; de ahí que deben ser siempre considerados, y en la medida de lo posible, tener las mejores condiciones de trabajo.

2.1.2 Confiabilidad de una inspección

En la mayoría de los casos, la IND se lleva a su límite, tratando de detectar grietas pequeñas, siendo común encontrar que en inspecciones repetidas de un mismo componente con un mismo equipo, pero con diferentes inspectores se obtengan distintos resultados. En estas condiciones, un criterio de rechazo/aceptación es poco viable en la práctica, por lo que se hace necesario el criterio de probabilidad de detección para establecer la confiabilidad de una inspección.

Considérese, por ejemplo, el resultado de N inspecciones. Si N_1 es el número de muestras con grietas, N_2 es el de muestras sin grietas ($N = N_1 + N_2$); A_1 es el número de muestras agrietadas en las que se detecta correctamente la presencia de grietas; A_2 es el de muestras agrietadas en las que no se detecta la falla ($N_1 = A_1 + A_2$); A_3 son las muestras sin grieta en las que erróneamente se detecta una grietas, y A_4 son las muestras sin grietas en las que no se detecta nada ($N_2 = A_3 + A_4$). Así, se pueden definir los siguientes conceptos:

- Probabilidad de Detección (POD) = sensibilidad de detección = $\frac{A_1}{N_1}$
- Probabilidad de Reconocimiento (POR) = $\frac{A_4}{N_2}$
- Probabilidad de detección falsa (error tipo I) (FCP) = $\frac{A_3}{N_2}$
- Probabilidad de omisión (error tipo II) = $\frac{A_2}{N_1}$
- Exactitud de la inspección = $\frac{(A_1 + A_4)}{N}$

Las inspecciones repetidas, con varios conjuntos de muestras con y sin grietas, permiten establecer la curva de detección versus el tamaño de falla (POD vs a).

Los resultados para un componente estructural de aluminio 2219-T87, inspeccionado con diferentes métodos se presentan en la figura 2.4 [10]. Es importante destacar en este caso que la POD depende del tamaño de grieta, a mayor el tamaño, mas probabilidad; sin embargo, también influye el método de inspección, para los cuales la dispersión obtenida se debe fundamentalmente a la variación del equipo y a limitaciones del inspector.

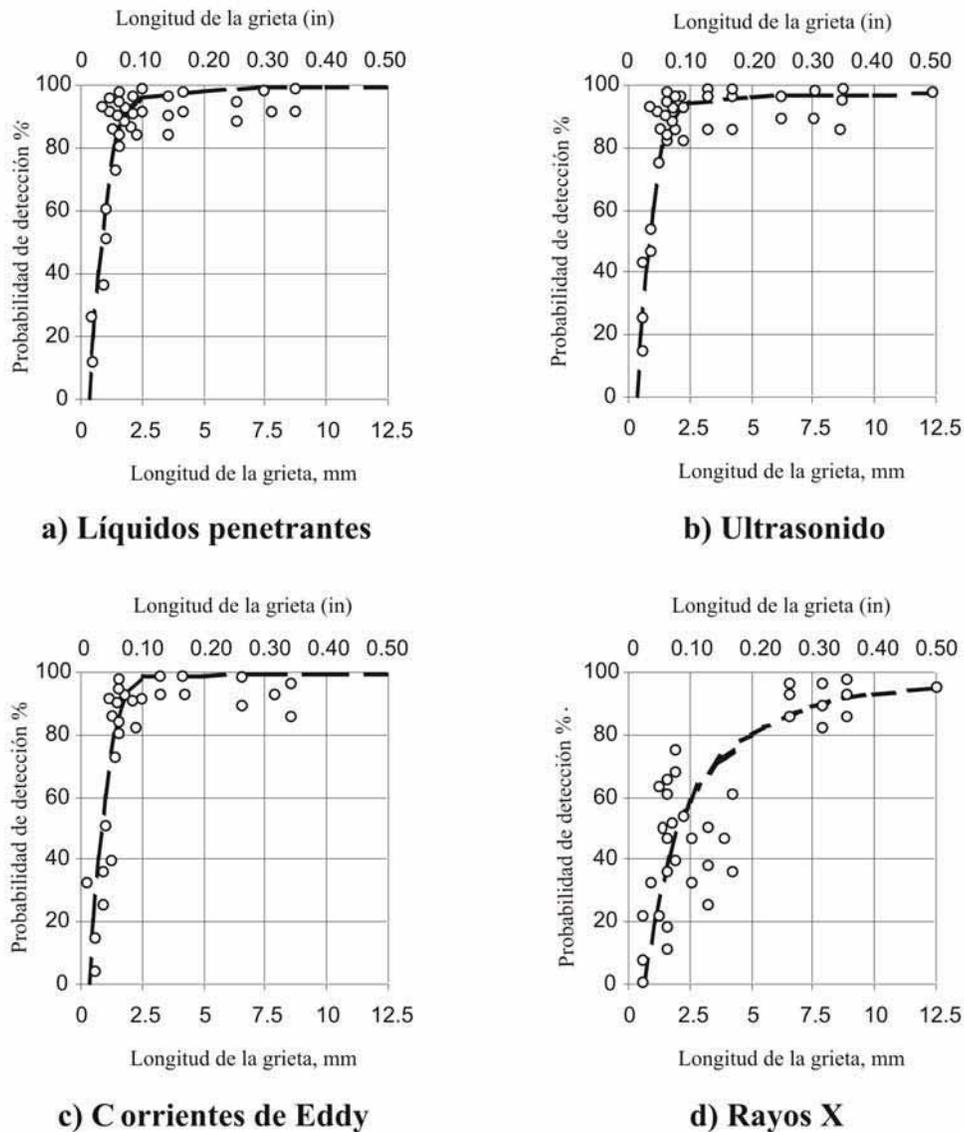


Figura 2.4
Comparativo de la POD de cuatro métodos de IND

Métodos estadísticos pueden ser utilizados; en principio, para obtener la curva media de la POD como función del tamaño de grieta con varios límites de confiabilidad [10,12,13]. La figura 2.5 muestra el esquema de un caso típico para la curva media de la POD (50% de confiabilidad), y otra curva con un 95% de

confiabilidad. Se define al tamaño de grieta a_{END} como aquel que puede ser detectado, con una probabilidad determinada a un nivel de confiabilidad específico. En la figura 2.5, se muestra el valor de a_{END} que tiene un 90% de POD con un 95% de confiabilidad; normalmente se conoce este valor como el tamaño de grieta con un 90/95.

Los porcentajes de POD y confiabilidad se fijan de acuerdo con diferentes criterios, particularmente de seguridad. A medida que se establecen porcentajes de POD y confiabilidad más altos, el valor de a_{END} tiende a ser mayor, lo que significa que el diseño en desarrollo tiene que tolerar el tamaño de grieta, lo que a su vez representa diseños más robustos y resistentes. En cambio, porcentajes más bajos implican grietas menores; y por tanto, los diseños deben hacerse tolerantes a defectos más pequeños. En 1970 se adoptó el criterio 90/95 para el tamaño de grieta a_{END} como tolerancia al daño para el proyecto del bombardero B1 de la fuerza aérea de los EUA ^[10], posteriormente, este criterio se generalizó en toda la industria aeronáutica ^[14].

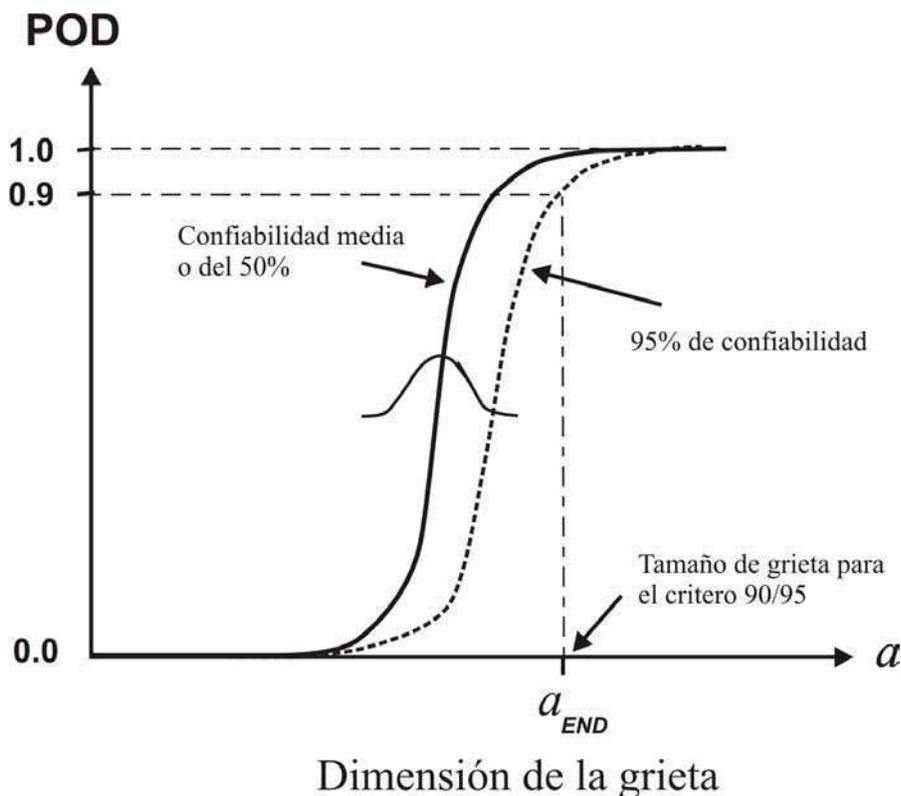


Figura 2.5

Esquema que muestra las probabilidades de detección media con 95% de confiabilidad, indicando como se establece el criterio 90/95

La figura 2.6 corresponde a un estudio comparativo para un mismo caso con 12 diferentes inspectores ^[15]. La diversidad de la POD media de cada uno es notoria,

siendo en el caso de uno de ellos particularmente baja. Estas diferencias deben ser siempre consideradas, ya que fundamentalmente resultan de la capacitación y la capacidad misma de la persona.

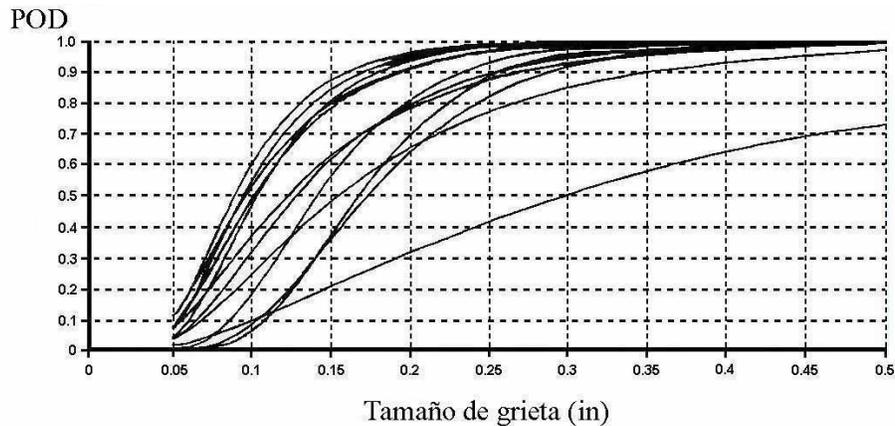


Figura 2.6
POD media de 12 inspectores obtenidas para de la inspección visual de estructuras de aeronaves

A pesar de que las curvas de POD vs a pueden establecer los límites de grieta para un criterio 90/95, es factible demostrar esta capacidad mediante la inspección de grupos de muestras con un único tamaño de grieta, donde al menos dos no tienen grietas por cada muestra agrietada, y cumpliendo el objetivo de inspección de acuerdo con la tabla 2.1 ^[10]. Así, si de 29 muestras inspeccionadas, todas las grietas de un mismo tamaño son detectadas, se cumple el criterio 90/95; o para otro caso, de 75 muestras inspeccionadas, el máximo de errores o grietas no detectadas es de tres.

Tabla 2.1
Número de grietas no detectadas, y el número de observaciones que se requieren para un criterio 90/95 para un tamaño de grieta

Número de observaciones	Número de errores
29	0
46	1
61	2
75	3
89	4
103	5

2.2 Fundamentos de mecánica de la fractura

Para mostrar cómo se aplican los conceptos básicos de la mecánica de la fractura para calcular la tolerancia al daño de un componente mecánico o estructural, se discutirán algunos conceptos de manera muy general, sin pretender un análisis detallado de esta teoría, para lo cual se invita al lector consultar las refs 1 ó 7.

El primer concepto fundamental que se introduce en la teoría de la mecánica de la fractura, es el factor de intensidad de esfuerzos, K . El cual se relaciona con las condiciones de carga, σ ; el tamaño de grieta, a ; y la geometría del componente, β , mediante la siguiente expresión:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a\beta} \quad (2.1)$$

Nótese que el valor del factor de intensidad de esfuerzos se incrementa a medida que crece el tamaño de grieta.

De resultados experimentales obtenidos a la fecha, se puede definir un valor crítico de intensidad de esfuerzos, K_c , el cual es una propiedad del material y que corresponde al valor a partir del cual una grieta crece en forma inestable, y que se asocia al momento de fractura o falla total. Así, el valor de tamaño de grieta crítico se puede obtener conociendo las condiciones de carga, la geometría del componente y el valor de intensidad de esfuerzo crítico, proporcionando un valor límite de tolerancia al daño para las condiciones dadas.

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma\beta} \right)^2 \quad (2.2)$$

La ecuación 2.1 se aplica solamente cuando las condiciones de carga son estables y el comportamiento del material es lineal.

Cuando el material exhibe un comportamiento no lineal, se utiliza la teoría elástico-plástica o no lineal de la mecánica de la fractura ^[1]. A pesar de que el modelo elástico-plástico es más complejo, la metodología para obtener el tamaño de grieta crítico es la misma y el criterio de tolerancia al daño se aplica de manera semejante.

Cuando las condiciones de operación son cíclicas, se utiliza un modelo que describe el fenómeno de crecimiento de grietas por fatiga basado en el trabajo desarrollado por Paris ^[16]. En este caso se emplea el valor de la amplitud cíclica del factor de intensidad de esfuerzos, definido por $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$, lo cual se puede expresar de la forma:

$$\Delta K = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{\pi a\beta} = \Delta\sigma\sqrt{\pi a\beta} \quad (2.3)$$

El modelo de Paris permite a partir de este último parámetro, establecer una ecuación que calcula la velocidad de crecimiento de una grieta, y estimar su tamaño en un determinado momento:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (2.4)$$

Donde N es el número de ciclos, y las variables C y m son constantes en un material en particular, y se interpretan como propiedades del mismo.

Integrando esta expresión se puede calcular el tamaño de una grieta con sólo conocer el número de ciclos (relacionado con el tiempo en servicio), y un valor de grieta inicial.

De igual forma, se puede calcular el número de ciclos para que una grieta pase de un tamaño a_0 , a uno límite, o final a_f :

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C\Delta K^m} \quad (2.5)$$

Este número de ciclos permite estimar la vida útil o remanente del componente para determinadas condiciones de operación y un tamaño de grieta, a_0 , que se haya identificado mediante una IND.

Cuando se considera el fenómeno de crecimiento de grietas por esfuerzo bajo corrosión, la ecuación que describe la velocidad de crecimiento de grieta es:

$$\frac{da}{dt} = F(K) \quad (2.6)$$

Esta ecuación se integra para calcular el tiempo que debe transcurrir para que una grieta crezca de un valor a_0 , a uno final, a_f , resultando:

$$t = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{F(K)} \quad (2.7)$$

3 Técnicas para la inspección no destructiva

Las inspecciones no destructivas (IND) en materiales o estructuras, tienen como objetivo identificar defectos, irregularidades, discontinuidades o imperfecciones, tanto en su interior como en el exterior, sin alterar de manera permanente las condiciones físicas, químicas o mecánicas del elemento analizado. La información que de éstas se obtiene sirve generalmente, para determinar la funcionalidad u operabilidad del elemento en estudio con base en algún criterio de evaluación específico.

En una IND se pueden utilizar diversas fuentes de energía para obtener algún tipo de medida del componente que se examina; por ejemplo, se puede emplear el ultrasonido, los rayos X y las emisiones acústicas en un mismo caso. De igual forma, para un sólo tipo de energía se aplican varios procedimientos de inspección, como puede ser el del ultrasonido mediante haz recto y haz angular. Es común que a todas estas se les denomine técnicas o pruebas no destructivas y que se identifiquen con las iniciales PND.

Las técnicas o PND se emplean ampliamente como herramientas de control de calidad en la industria manufacturera y de la construcción durante el proceso de fabricación de un producto; siendo el principal objetivo aceptar o rechazar la pieza. También son empleadas para verificar la sanidad de un componente cuando éste se encuentra en servicio, siendo su propósito determinar la vida remanente de la pieza en las condiciones físicas en que se encuentra y las condiciones de operación a las que está sujeta. En este último caso, la inspección resulta ser más difícil, ya que el componente es parte integral de un sistema más complejo, y su acceso puede ser limitado, o en algunos casos el trabajo se debe realizar en campo.

Existen muchas técnicas para la IND, y se clasifican conforme a criterios como el tipo de defecto que se puede identificar; la localización de éste; o el tipo de energía empleada para excitar la respuesta en la pieza.

Mas allá de cómo se clasifiquen, lo más importante es contar con elementos técnicos suficientes para conocer la capacidad general de cada técnica y seleccionar la más adecuada para un determinado caso. Es por ello que en este capítulo se presenta la clasificación más aceptada, y se describen las características relevantes de las técnicas para establecer una referencia general, que posteriormente en capítulos subsiguientes, se detallará para cada caso.

3.1 Clasificación de técnicas de IND

De manera general, las formas más usadas para clasificar las técnicas de IND, son de acuerdo con ^[10]:

- a) Tipo o forma del defecto
- b) Ubicación del defecto

De acuerdo con el tipo o forma del defecto, las técnicas de inspección no destructiva se dividen en dos grupos:

- Técnicas de IND para defectos volumétricos. Son las que se utilizan para detectar defectos con magnitudes significativas en sus tres dimensiones (largo, alto y ancho); es decir, tienen un volumen definido (tabla 3.1)
- Técnicas de IND para defectos planos. Corresponden a las que se aplican a defectos, cuya característica principal es que una de sus dimensiones es pequeña o poco significativa, en comparación con las otras dos (tabla 3.1)

Tabla 3.1
Descripción general de los defectos volumétricos y planos

DEFECTOS VOLUMÉTRICOS	DEFECTOS PLANOS
Porosidades Inclusiones Contracciones Agujeros, o vacíos Adelgazamientos por corrosión Picaduras por corrosión	Discontinuidades Grietas Laminaciones Falta de adherencia superficial Discontinuidades por solidificación Grietas por tratamientos térmicos Grietas por trabajo mecánico Grietas por fatiga Grietas por corrosión bajo esfuerzo Grietas en soldaduras Falta de fusión en soldaduras Penetración incompleta en soldaduras

La tabla 3.2 presenta una clasificación de las técnicas de IND de acuerdo con el tipo o forma de defecto. Es claro que esta clasificación puede resultar confusa ya que una misma técnica se emplea para ambos tipos de defectos. Otro inconveniente es que es independiente de la localización del defecto y, por tanto, resulta poco útil en casos en los que la inspección se realiza en una zona en particular.

Tabla 3.2
Clasificación de las PND de acuerdo con el tipo de defecto

MÉTODOS DE IND PARA DEFECTOS VOLUMÉTRICOS	MÉTODOS DE IND PARA EN DEFECTOS PLANOS
Visual Por réplica de superficies Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Campo magnético Corrientes de Eddy Microondas Ultrasonido Radiografía Tomografía computarizada por rayos X Radiografía por neutrones Termografía Holografía óptica Procesamiento digital de imagen	Visual Microscopia por réplica Partículas magnéticas Campo magnético Corrientes de Eddy Microondas Perturbación de corriente eléctrica Ultrasonido Absorción magnética Ultrasonido Emisión acústica Termografía

Al considerar la ubicación física del defecto, las técnicas de IND se dividen en tres grupos:

- a) Para defectos superficiales
- b) Para defectos interiores
- c) De integridad, o globales

3.1.1 Técnicas para la inspección superficial

Se emplean para inspeccionar la sanidad en la superficie del material de la pieza o componente. Por lo general detectan discontinuidades en la superficie, o a profundidades no mayores a 6 mm. Las técnicas de este tipo más conocidas y empleadas son la inspección visual (VT); los líquidos penetrantes (PT); las partículas magnéticas (MT); y las corrientes parásitas, o corrientes Eddy (ET).

3.1.2 Técnicas de inspección volumétrica

Se utilizan para conocer la sanidad de un material y detectar discontinuidades generalmente ocultas en su estructura interna. En este caso, las técnicas más comunes son el ultrasonido industrial (UT), la radiografía industrial (RT), y las emisiones acústicas (AET).

3.1.3 Técnicas de integridad o globales

Se aplican para inspeccionar la condición de todo un sistema sin que necesariamente se evalúe de manera individual cada componente. La forma inicial para estas técnicas fue con recipientes a presión y tuberías, mediante lo que se denominaba “detección de fugas” o de hermeticidad. Sin embargo, el concepto se extendió o se utiliza con otro tipo de sistemas, como puede ser una estructura, o un puente carretero.

Tabla 3.3
Clasificación de las PND de acuerdo con la localización del defecto

SUPERFICIALES	INTERIORES	GLOBALES
Visual Líquidos penetrantes Réplica Partículas magnéticas Corriente eléctrica Absorción magnética Ultrasonido Emisión acústica Termografía Holografía óptica Holografía acústica Procesamiento digital de imagen Microscopia acústica	Partículas magnéticas Campo magnético Perturbación de corriente eléctrica Absorción magnética Corrientes de Eddy Microondas Ultrasonido Emisión acústica Radiografía Rayos X Tomografía computarizada Radiografía por neutrones Termografía Holografía óptica Holografía acústica	Emisiones acústicas Vibraciones Detección de fugas

3.2 Alcance de las IND

La aplicación más extendida y desarrollada para las inspecciones no destructivas, es como herramienta para los programas de aseguramiento de calidad en la industria de manufactura. En estos casos, se emplean para verificar que las piezas, componentes o equipos, se encuentran libres de defectos que afecten su vida útil. Sin embargo, el campo de aplicación de las inspecciones no destructivas es mucho más amplio, y en general se utilizan para diferentes casos, como son los siguientes:

- Detección de defectos
- Detección de fugas
- Medición de dimensiones
- Localización geométrica
- Caracterización de la microestructura

- Determinación de esfuerzos
- Evaluación de la respuesta dinámica

3.2.1 Detección y evaluación de defectos

Como se mencionó, es una de las aplicaciones más comunes, pero antes de entrar en detalles, es fundamental comprender lo que se entiende por defecto y discontinuidad. Se define defecto como una o más imperfecciones cuyo tamaño, forma, orientación, localización o sus propiedades, son tales que no cumplen con determinados criterios de aceptación y, por tanto, pudieran ser motivo de rechazo. De igual forma, se define discontinuidad como la falta de continuidad o cohesión, intencional o involuntaria, en la estructura física o configuración de un componente o material.

La detección de un defecto es uno de los aspectos más importantes en los que se utilizan las técnicas IND, ya que el conocimiento del tipo, tamaño, y orientación del mismo, permite determinar si un elemento debe ser rechazado o aceptado. Para lo anterior se utiliza un marco teórico, ya sea de la mecánica del medio continuo, o mecánica de la fractura, para analizar en diferentes escenarios, las condiciones de trabajo del elemento, y establecer si se exceden ciertos límites de trabajo, los cuales se pueden definir en muchas maneras, todas basadas en las propiedades mecánicas del material constitutivo del elemento y las condiciones de operación del mismo. Como criterio general se define el límite, utilizando un factor de seguridad que se multiplica al valor máximo aceptable (normalmente de esfuerzos). Otra práctica común es recurrir a los criterios establecidos en códigos o normas que emiten instituciones con reconocimiento técnico, tales como la American Society of Mechanical Engineers (ASME), o la Nuclear Regulation Commission (NRC), entre otros.

3.2.2 Detección de fugas

En elementos o sistemas diseñados y fabricados para resistir altas presiones, las técnicas IND se utilizan para determinar la posible presencia de fugas. En este caso, suelen ser muy simples ya que van desde procedimientos para verificar que un sistema puede mantener una alta presión por un tiempo mínimo, hasta procedimientos para localizar fugas por sonido, o por interacción del fluido con el medio externo. En forma sistemática, se pueden utilizar procedimientos sofisticados con sensores de ultrasonido, emisiones acústicas, o inclusive, vibraciones.

3.2.3 Medición de dimensiones

Aunque la metrología no es una técnica de inspección no destructiva, el empleo de diferentes técnicas IND para la metrología es muy común. Este es el caso de cuando se miden espesores, por ejemplo, de tuberías o recipientes a presión en

los que los instrumentos comunes de medición (calibradores) no se pueden usar. Así, el ultrasonido, las corrientes parásitas o de campo magnético, contribuyen en forma directa o indirecta a proporcionar una medida del espesor del material.

Por otro lado, cuando es necesario medir desplazamientos o deformaciones muy pequeñas en una pieza, normalmente en servicio, es factible aplicar procedimientos, tales como el de holografía o los de fotoelasticidad.

3.2.4 Localización geométrica

Un problema ocasional cuando se tiene una estructura compleja, es localizar un elemento en particular. Esto suele complicarse si la estructura contiene uniones con soldadura, o la configuración geométrica de la misma es compleja. Existen casos, por ejemplo, en los que el elemento que se desea localizar está embebido en una estructura de algún otro material (como pueden ser varillas de refuerzo en concreto), y por alguna razón es necesario ubicar su posición. Las técnicas que comúnmente se emplean para localización son la radiografía (rayos X), la tomografía computarizada, la radiografía de neutrones, o las técnicas magnéticas.

3.2.5 Caracterización de la microestructura

Otra área interesante de aplicación para la IND, es la caracterización microestructural del material constitutivo de un elemento estructural en servicio. Generalmente, se requiere en materiales metálicos y en condiciones en las cuales el uso del microscopio está limitado ya que no siempre es fácil recurrir a un aparato portátil, o a la técnica de réplica. En estas condiciones, convienen técnicas IND que de manera indirecta reflejen la condición microestructural del material.

La predicción de propiedades físicas y/o mecánicas con las técnicas IND; es una aplicación poco utilizada hasta la fecha; sin embargo, para medir el tamaño de grano en metales o determinar el tipo de aleación, se han empleado con éxito las técnicas de corrientes de parásitas y ultrasonido. En mediciones más sofisticadas, los rayos X, la radiografía de neutrones, la tomografía computarizada, o el microscopio acústico son recurrentes para determinar algunas otras propiedades físicas o mecánicas que se afectan por la microestructura del material.

3.2.6 Determinación de esfuerzos, y respuesta dinámica

Para evaluar un diseño, o el comportamiento de un sistema en operación, se necesita en muchos casos evaluar su respuesta dinámica a fin de determinar aspectos como resonancias o frecuencias naturales de vibración. En otros casos, es fundamental establecer los niveles de esfuerzos máximos a los que se somete un componente estructural, para validar el diseño o determinar sus condiciones reales de operación. Todo ello se puede analizar mediante técnicas globales de IND, o con extensómetros.

El comportamiento dinámico de un elemento estructural puede evaluarse con sensores de esfuerzos cuando el elemento está sujeto a cargas dinámicas; o también utilizar sensores de aceleración (acelerómetros) y/o transductores acústicos, de desplazamiento o velocidad.

El esfuerzo local en un elemento estructural, bajo determinadas condiciones de carga puede determinarse usando métodos que se auxilian con sensores de esfuerzo, como son los revestimientos fotoelásticos, o las galgas extensiométricas.

3.3 Criterios para seleccionar una técnica de IND

Cuando es necesaria una inspección no destructiva de un elemento estructural o componente mecánico, el principal problema es seleccionar la técnica más apropiada y económica. Para ello se aconseja conocer lo siguiente:

- Tipos de defectos potenciales y su localización
- Tamaño y orientación del defecto
- Tamaño y forma del objeto a inspeccionar
- Material constitutivo del material a inspeccionar

A manera de guía general las tablas 3.4 y 3.5 indican criterios para la aplicación de las técnicas IND para defectos volumétricos y superficiales, respectivamente. En estas se indican las aplicaciones más comunes de cada técnica, los materiales en los que se utilizan y se mencionan algunas limitaciones y ventajas de cada una.

En la práctica, es común utilizar dos o más técnicas de inspección en un solo elemento para aumentar la velocidad de ejecución o la sensibilidad en la detección de discontinuidades o defectos. Sin embargo, en estos casos no es recomendable considerar una técnica como sustituto de la otra, ya que el resultado final es generalmente, desfavorable; por el contrario, se deben tomar como complementarias unas de otras. Un ejemplo de lo anterior es cuando en un sistema o estructura compleja se utiliza una técnica de inspección global, mediante la cual se evalúa el comportamiento total del sistema, a partir de la cual se puede llegar al resultado de que existe algún tipo de problema, y posteriormente aplicar alguna otra técnica de inspección (por ejemplo, ultrasonido) para localizar y cuantificar el problema detectado.

Tabla 3.4
Características principales de algunas técnicas volumétricas para la inspección no destructiva (IND)

PRUEBA	TIPO DE DEFECTO	SE PRESENTA EN:	VENTAJAS	LIMITACIONES
Radars de penetración	Grietas, vacíos, localización de objetos en la parte interna (barras de refuerzo), perfiles transversales del material, laminaciones, medición de espesores	Concretos, pavimentos, materiales compuestos, y materiales estructurales	Cubre una gran área de inspección de manera muy rápida; opera a la velocidad del tráfico cuando inspecciona pavimentos y puentes; genera imágenes en 2D y 3D	Muy alto costo de operación del equipo y de operación; el procesamiento de la información es complejo; no detecta defectos o grietas muy pequeñas
Termometría del infrarrojo de banda dual	Localización de objetos en la parte interna (barras de refuerzo), defectos estructurales, grietas, laminaciones, vacíos	Concretos, pavimentos, estructuras de concreto reforzado	Cubre una gran área de inspección de manera muy rápida. Permite mediciones de los elementos internos de una estructura	Alto costo, baja sensibilidad para detectar grietas; variaciones en las propiedades del material afectan los resultados; genera imágenes en 2D de 3D
Emisiones acústicas	Grietas, velocidad de crecimiento de grietas, fatiga y corrosión	Metales, aceros estructurales, estructuras de concreto	Localiza puntos de falla con alta precisión; determina parámetros para estimar vida útil de los elementos	Costo relativamente elevado; análisis e interpretación de datos son complejos
Radiografía	Grietas, inclusiones, porosidad. Uniformidad del material	Fundición, forja, partes maquinadas, soldadura, componentes electrónicos, materiales compuestos	Detecta fallas internas; usada en un amplio rango de geometrías y tipos de material, se obtiene una impresión permanente; se obtiene información cualitativa y cuantitativa	Alto costo de operación; no puede detectar defectos muy pequeños ni grietas muy pequeñas; se obtienen impresiones en 2D de estructuras en 3D
Ultrasonido	Grietas, adherencia, porosidad, inclusiones, defectos de laminación, corrosión, medición de espesores	Soldadura, aleaciones, adherencia entre materiales, difusión en el pegado, materiales compuestos, tuberías y tanques a presión	Detecta defectos internos y los muestra en 3D; utilizado en diferentes tipos de geometría y materiales, se obtiene un registro permanente; obtiene información cualitativa y cuantitativa	Difícil de aplicar en geometrías complejas; generalmente requiere de agua u otro tipo de acoplante; algunas veces se dificulta la interpretación
Tomografía computarizada	Grietas, vacío, inclusiones, porosidad, uniformidad del material, integridad de ensamble, alineación de componentes	Fundición, forja, partes maquinadas, soldadura, componentes electrónicos, materiales compuestos	Detecta fallas internas; usado en un amplio rango de geometrías y tipos de material, se obtiene una impresión permanente; se obtiene información cualitativa y cuantitativa.	Alto costo de operación; no puede detectar defectos muy pequeños ni grietas muy pequeñas; largo tiempo de inspección

Tabla 3.5
Características principales de algunas técnicas superficiales que se utilizan en IND

PRUEBA	TIPO DE DEFECTO	SE PRESENTA EN:	VENTAJAS	LIMITACIONES
Líquidos penetrantes	Grietas, vacíos, porosidades y uniones entre piezas laminadas, picaduras superficiales	Soldadura, forja, maquinados superficiales, fundición, grietas en componentes sujetos a fatiga o esfuerzos debido a la corrosión	Bajo costo de aplicación, fácil de implementar, portátil, fácil de interpretar; tiene alta sensibilidad para discontinuidades abiertas y de poca profundidad	La falla debe estar abierta en la superficie; requiere inmersión del líquido penetrante; la profundidad es difícil de estimar; puede dar indicaciones falsas por irregularidades
Corrientes de Eddy	Grietas, vacíos, variación en la composición de las aleaciones o del tratamiento térmico, medición de espesores	Tuberías, variación en las aleaciones, para medir espesores en recubrimientos.	Portátil, lectura inmediata	Sensible a la geometría; baja penetración, superficial, difícil de interpretar; cambios de conductividad afectan las condiciones de lectura
Partículas magnéticas	Grietas, vacío, defectos de laminación y unión entre piezas laminadas	Fundición ferromagnética, forja, extrusión, laminación, rolado	Requiere poca preparación, limpieza; es un método rápido y económico; revela discontinuidades que no afloran a la superficie; cuenta con amplio espectro de alternativas de aplicación	Se aplica sólo a materiales ferromagnéticos; detecta fallas próximas a la superficie; sólo detecta discontinuidades perpendiculares al campo magnético
Imagen infrarroja	Detección de pequeñas diferencias en temperatura que correlacionen con defectos del material o desempeño de los materiales	Detecta corrosión en la estructura de aeronaves	No requiere contacto superficial; detecta condiciones que afectan la transferencia o generación de calor en el material; capacidad para realizar inspecciones en tiempo real	Su equipamiento es costoso; los resultados son afectados por las condiciones ambientales y de la emisividad superficial

3.4 Capacitación, calificación y certificación

La efectividad de las técnicas para una inspección no destructiva depende en gran parte, de la capacidad del personal que las aplica. Por esto existen normas y documentos que estipulan los procedimientos y criterios que garantizan la capacitación, calificación y certificación del personal en las técnicas de inspección. Algunas guías o normas en las que se detallan los criterios y procedimientos de capacitación, calificación, y certificación son:

- a) Práctica recomendada, No SNT-TC-1A, de la Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos (ASNT), Capítulo 2, *“Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification”*
- b) Norma No DP ISO 9712-3, “Norma para la capacitación, calificación y certificación de personal que realiza END”, elaborada por el Organismo Internacional de Normalización (ISO)

En esos documentos se definen los conceptos de capacitación o entrenamiento, calificación y certificación; los cuales son importantes para el personal técnico que

realiza algún tipo de inspección no destructiva. A continuación se definen estos conceptos:

Entrenamiento

Es el programa debidamente estructurado para proporcionar los conocimientos teóricos, y desarrollar las habilidades prácticas de un individuo para una actividad definida de inspección. En una organización, estos programas pueden ser establecidos por alguna otra empresa que se contrate para ello, o realizarse en forma interna si cuenta con personal capacitado para los cursos o si se contrata personal externo con capacidad para impartirlos.

Calificación

Es la demostración objetiva, mediante exámenes teóricos y prácticos de que un individuo posee los conocimientos teóricos y las habilidades necesarias para desarrollar correctamente una técnica de inspección no destructiva, evaluar las indicaciones obtenidas, aplicar correctamente criterios de aceptación y elaborar reportes de inspección. Estos exámenes se aplican y califican por personal certificado como el nivel III, que es el más alto de certificación (ver niveles de certificación). Adicionalmente, para aplicar un examen es necesario que la institución o entidad responsable cumpla con los requisitos en la guía SNT-TC-1A.

Certificación

Es el testimonio escrito que extiende una empresa contratante o una agencia central certificadora que demuestra que un individuo ha sido debidamente capacitado y está calificado para emplear un método de IND. Para que una empresa contratante pueda certificar necesita tener definida su política, los procedimientos de evaluación y certificación, y cumplir con todo lo establecido en la práctica recomendada SNT-TC-1A; de igual forma, una agencia central certificadora debe apegarse a los requisitos de la norma ISO 9712. La certificación emitida por cualquier empresa contratante o agencia central certificadora es válida para los niveles I y II. Para certificar un nivel III es necesario que la empresa u organismo tenga adicionalmente a los requisitos de la normatividad, un reconocimiento internacional en el ámbito de las IND.

3.4.1 Niveles de certificación

Dentro del campo de la IND, se definen en forma general tres niveles de certificación para los inspectores. En una institución o entidad pueden subdividirse de acuerdo con condiciones particulares o aplicaciones específicas. Estos niveles se dan de manera independiente para cada método o técnica IND.

Si alguien se encuentra en el proceso de capacitación y/o de certificación, se le considera como aprendiz, que por definición es aquel que esta recibiendo

entrenamiento para adquirir los conocimientos y la habilidad necesaria para efectuar una técnica IND específica.

Lo anterior no lo habilita para realizar por sí solo una inspección, interpretación o evaluación de una indicación, ni emitir un reporte de resultados. Algunos de estos atributos los podrá efectuar una vez que concluya su periodo de experiencia y capacitación, y haya aprobado su examen de calificación para el nivel I. En forma general, los niveles básicos de certificación se describen a continuación ^[17].

Nivel I

Es el que se obtiene cuando se ha cumplido con el entrenamiento básico, y se han cubierto los requisitos establecidos en la guía SNT-TC-1A. Tener un nivel I significa que se está capacitado y calificado para calibrar correctamente un equipo de inspección, realizar una inspección específica, aplicar los criterios de aceptación o rechazo definidos en un procedimiento o instrucción de inspección, y reportar o realizar los registros de estas actividades. El inspector nivel I debe ser entrenado y supervisado por personal certificado y calificado de nivel II.

Nivel II

Es el nivel en el cual se está capacitado y calificado para efectuar correctamente las actividades mencionadas para un nivel I, y además puede avalar y realizar la calibración de un equipo de prueba, interpretar y evaluar los resultados conforme a un código, norma o especificación aplicable. El personal con este nivel debe estar familiarizado con los alcances y limitaciones de su técnica, y ser responsable de la capacitación práctica y supervisión de inspectores nivel I. Un nivel II se considera capacitado para procedimientos de inspección y organización, así como emitir reportes de los resultados durante las inspecciones.

Nivel III

Además de cumplir con los requisitos de los niveles I y II, debe ser capaz de establecer técnicas y procedimientos, interpretar códigos, normas y especificaciones, así como de seleccionar el método y la técnica de inspección. El personal con nivel III es responsable de las actividades IND para las cuales está calificado. Además contar con suficientes conocimientos sobre procesos de manufactura y tecnología de materiales para establecer criterios de aceptación cuando así se requiera. El personal que se ubique en este nivel, además de conocer otras técnicas IND está capacitado para entrenar y certificar a personal nivel I y II.

4 Técnicas de inspección superficial

Dentro del conjunto de técnicas o procedimientos para la inspección no destructiva, no es de sorprender que las inspecciones superficiales constituyan la primera línea de defensa contra las fallas de elementos mecánicos o estructurales en servicio. Generalmente, el primer síntoma de algún problema se detecta a partir de alguna manifestación superficial que se hace “visible”, y que normalmente se observa con algún tipo de inspección superficial. El bajo costo, el relativo poco tiempo de aplicación que requieren, la poca sofisticación que tienen, y la muy amplia difusión y gama de aplicaciones que tienen, los hacen los más importantes de todos los que se utilizan. Dentro de este tipo, la inspección visual es quizá, la de mayor relevancia ya que se utiliza, en al menos el 90% de todos los casos de inspección.

Una evaluación muy superficial podría hacer pensar que la inspección visual tiene poca relevancia por su subjetividad y simplicidad; sin embargo, es la de mayor importancia ya que generalmente es la primera en utilizarse, y cuyos resultados resultan ser fundamentales para justificar algún otro tipo de inspección. Esto mismo se podría suponer para cualquier otro tipo de técnica de inspección superficial, pero por el contrario, finalmente se puede llegar a la conclusión que casi todas son simplemente una técnica visual más sofisticada, como se verá más adelante.

4.1 Inspección visual (VT)

La definición más aceptada para la inspección visual (VT) es ^[15]: “.... *El proceso de examen y evaluación de un sistema o sus componentes, mediante el cual se utilizan los sentidos humanos auxiliados únicamente con algún dispositivo que magnifique la capacidad sensorial del inspector. El proceso de inspección puede constituirse por acciones, como observar, escuchar, sentir, oler, agitar o revolver. Incluye una componente cognoscitiva que, con las observaciones, se correlacionan con la información técnica del sistema o la estructura y de los datos sobre las condiciones de servicio pasadas y presentes....*”. Es importante destacar que en esta definición se pueden considerar, además de la vista, otros sentidos humanos para cualquier proceso de decisión y búsqueda. A pesar de que la inspección visual depende fuertemente de las capacidades del observador, el sistema que conforma el sentido humano y el cerebro, conforman un sistema de inspección de muy alta sensibilidad y con una muy alta capacidad de discernimiento que puede ser entrenada para encontrar e interpretar variaciones mínimas en un sistema.

Como ya se dijo, la inspección visual es la técnica IND más utilizada, y en la industria es la que permite detectar el 80% de las grietas o defectos que se presentan en los componentes mecánicos o estructurales ^[18]. De manera general,

la técnica de inspección visual se puede dividir en dos grandes grupos: inspecciones directas e indirectas.

La inspección directa puede incluir el empleo de telescopios, microscopios, endoscopios, periscopios, proyectores ópticos, comparadores, video en tiempo real, o cualquier otro dispositivo de procesamiento de imágenes en tiempo real o de tratamiento para resaltar los defectos o grietas, como pueden ser líquidos penetrantes o las partículas magnéticas. La inspección indirecta es aquella en la que se obtienen imágenes fijas (fotografías) o en movimiento (video grabaciones) para un análisis posterior.

Un aspecto fundamental de toda inspección, pero en especial de la visual, es el conocimiento detallado de las propiedades y características físicas del material constitutivo y del diseño de la pieza a inspeccionar. En gran parte, e independientemente de los métodos o dispositivos de ayuda utilizados, una acertada interpretación depende significativamente de esta información.

Como se señaló, el método más sencillo y rápido para obtener datos sobre el estado de una estructura o sistema, es la simple observación visual; sin embargo, para lograr mayor información se deben cumplir tres condiciones básicas:

- a) *Poder ver*. Esto se refiere a que a todas las partes o elementos que se desean inspeccionar son accesibles, ya sea de manera directa o con la ayuda de medios complementarios
- b) *Saber ver*. Significa que el personal encargado de una inspección cuenta con capacitación y experiencia suficientes, para interpretar y calificar adecuadamente lo que observa
- c) *Conocer lo que se quiere ver*. Es decir que la información técnica y de diseño de lo que se va a evaluar, debe estar disponible y ser analizada antes de que se ejecuten los trabajos de inspección. Lo anterior para identificar puntos o zonas de particular relevancia, definir la estrategia de inspección, o conocer los antecedentes sobre incidentes o inspecciones anteriores

Una consideración especial que se debe tener para la inspección visual es la habilidad y conocimiento de un inspector para complementar su trabajo con una adecuada interpretación de los planos de diseño y de toda la información técnica disponible. De igual forma, deberá adquirir la capacidad para definir estrategias de evaluación, o considerar el uso de dispositivos de ayuda para mejorar la calidad de observación.

El empleo de dispositivos de ayuda es común en la inspección visual; por lo general se clasifican en cuatro tipos:

- a) Sistemas de iluminación y espejos
- b) Dispositivos de magnificación de imagen

- c) Endoscopios y dispositivos para observación remota
- d) Sensores de imagen

Sistemas de iluminación

Los sistemas de iluminación y espejos corresponden a aquellos dispositivos que de alguna forma, resaltan las grietas o los defectos en las superficies mediante el manejo de la luz y de su contraste con el fondo. Para estos casos, las técnicas más utilizadas son:

- Manejo de la intensidad y del ángulo de incidencia de la luz, mediante juegos de iluminación, espejos y pantallas
- Manejo del contraste y de los colores utilizando filtros o procesos de interferencia de luz monocromática
- Uso de luz polarizada a través de filtros
- Manejo del fondo a base de pantallas

Otras dos técnicas para destacar grietas superficiales son los líquidos penetrantes y las partículas magnéticas, particularmente cuando se auxilian con la luz fluorescente. Aunque estrictamente, ambas se pueden clasificar como visuales, por ello se catalogan de manera independiente por la forma sistemática y específica con que se aplican describiéndose por separado.

Dispositivos de magnificación de imagen

Como su nombre lo dice, son aquellos que aumentan la superficie de inspección mediante mecanismos ópticos. Dentro de éstos se encuentran las lentes de aumento o lupas, y los microscopios portátiles. Normalmente, los dispositivos que amplifican la imagen entre 5X y 10X, son llamados macroscópicos; mientras que los microscopios de campo proporcionan ampliaciones típicas entre 10X y 200X.

Endoscopios y equipos para la observación remota

Cuando por limitaciones de acceso, no es posible inspeccionar visualmente una superficie ya sea por condiciones ambientales adversas o limitaciones geométricas o de ubicación, se utilizan dispositivos de observación remota o endoscopios. Entre estos equipos se consideran los telescopios y todos los mecanismos o robots que se operan a distancia para facilitar el acceso al área de inspección (normalmente con algún tipo de sensor de imagen, o cámara de video). Los endoscopios son aparatos de aplicación específica que permiten la observación dentro de tuberías pequeñas, áreas cerradas de difícil acceso, ranuras o perforaciones; así como para observar el interior de una pieza o equipo sin necesidad de desarmarlo.

Se clasifican en tres diferentes tipos: rígidos, flexibles y asistidos con sistemas de video. Los rígidos se constituyen de un tubo rígido cuyo diámetro es típicamente entre 0,01 a 0,05 m, y cuentan con un sistema de lentes y espejos con capacidad de magnificación de 3X hasta 50X, según el diseño. Para iluminar la zona que se desea observar cuentan con un pequeño foco incandescente cercano al campo de visión, o tienen una fibra óptica conectada a una lámpara externa. Algunas características son su fácil maniobrabilidad, la amplitud de su campo de visión de hasta 60°, la capacidad para la observación lateral, y su limitada longitud de cobertura (0,5-3,0 m). Existen algunas variantes de los endoscopios rígidos, como son los miniendoscopios con diámetros de 0,001 a 0,01 m, y los endoscopios extensibles.



a) Magnificación de 8X a 16X



b) Magnificación 40X

Figura 4.1
Dispositivos de magnificación

Los endoscopios flexibles provienen del desarrollo de la fibra óptica, donde una de éstas se utiliza para transmitir la luz e iluminar la zona de inspección, y otra para transmitir imagen de observación. La longitud de los dispositivos depende de la aplicación misma, pero pueden ser muy grandes (hasta 30 m), debido a que no hay pérdidas de resolución o intensidad por la distancia, pues la fibra óptica actualmente disponible es de muy alta calidad. Otra característica de los endoscopios flexibles es su diámetro, que puede ser de hasta milímetros. La desventaja más grande de estos equipos es su campo de visión, el cual es muy reducido ($\sim 30^\circ$), y si se utilizan lentes en el extremo de la fibra se obtiene una imagen deformada. Es muy común que los endoscopios flexibles utilicen sensores digitales de imagen con monitores de video.

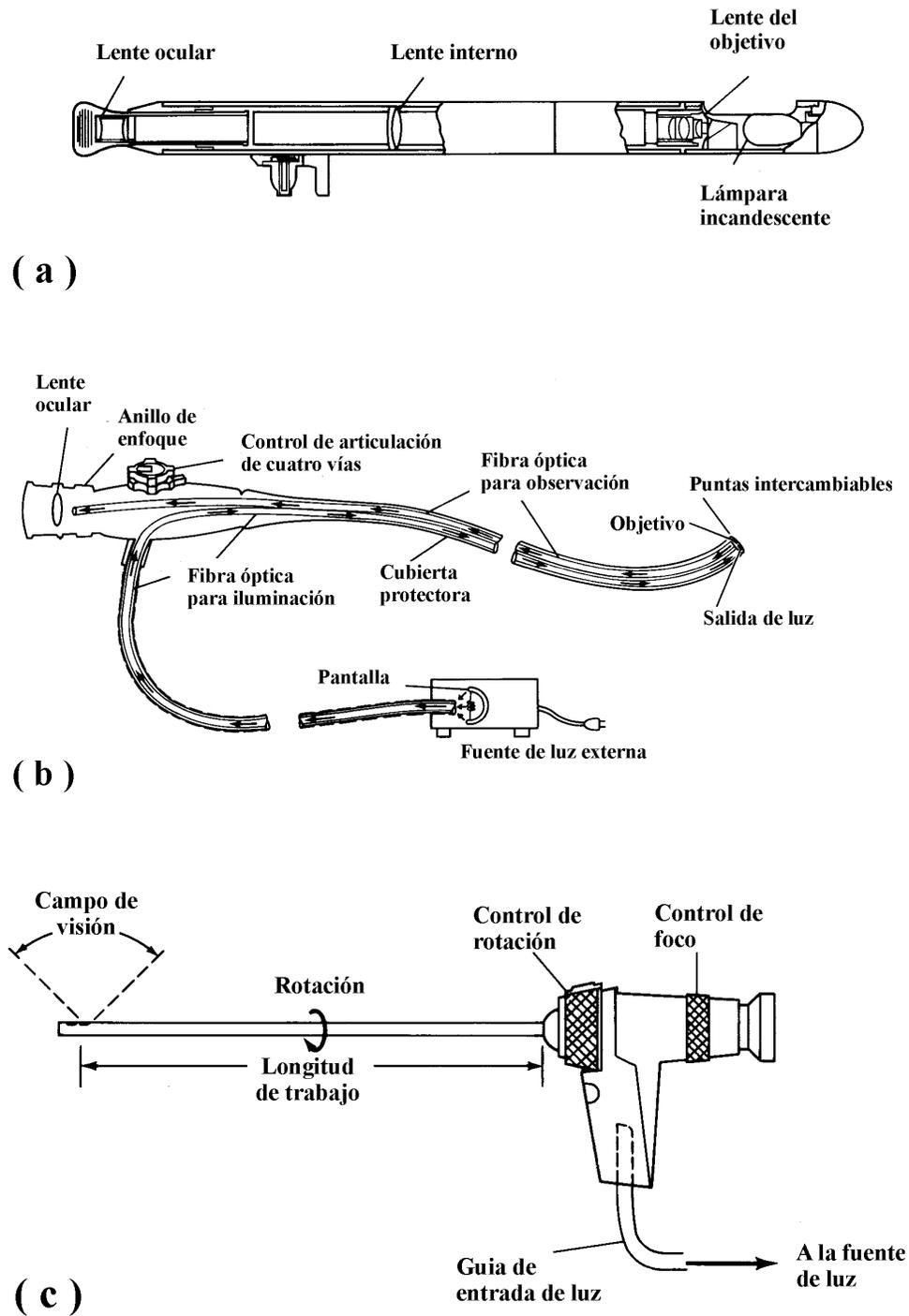


Figura 4.2
Tipos de endoscopios. (a) Rígido con fuente de luz en el extremo, (b) Flexible con fibra óptica, (c) Rígido con fuente de luz externa

Cuando en una inspección se va a utilizar un endoscopio, el primer paso es definir el tipo de equipo basándose en las necesidades y condiciones específicas de la inspección. Por lo tanto, para lograr una adecuada selección es necesario considerar los siguientes aspectos fundamentales:

- Distancia focal
- Campo de visión
- Resolución
- Método o sistema de iluminación
- Amplificación
- Orientación del campo de visión
- Medio ambiente
- Uso de equipos de registro de imágenes o video

De manera general, se ha encontrado que las ventajas más grandes que se obtienen con el uso de endoscopios, es el poder observar áreas cerradas de limitada accesibilidad y su uso en una muy amplia gama de condiciones y casos. En contraparte, las desventajas mayores son que no se puede definir la probabilidad de detección de grietas (POD) y que es un método de inspección puntual, requiriendo de mucho tiempo si el área de interés es muy grande.

Sensores de imagen

Son generalmente equipos de fotografía o video que se utilizan para documentar una inspección, y tener evidencia que pudiera ser necesaria en un análisis posterior. Es común que estas imágenes sean digitalizadas y se procesen para aumentar o mejorar su resolución, detallando aspectos no identificados durante el trabajo inicial de campo. A manera de ejemplo, en la figura 4.3 se muestra la fotografía de un puente de concreto con presfuerzo externo, en el cual se realizó una inspección visual para evaluar daños por corrosión, en la 4.4a el detalle de un cable de presfuerzo externo de este puente, al que se había identificado un problema de abultamiento durante la evaluación de campo, sin que el inspector pudiera en ese momento establecer su condición exacta. Un estudio posterior de la imagen muestra la fisura en el recubrimiento y la exposición del cable de acero (figura 4.4b); permitiendo a partir de esta información, inferir el nivel de daño por corrosión sin necesidad de una segunda inspección de campo.



Figura 4.3
Puente de concreto con presfuerzo externo



(a)



(b)

Figura 4.4
Detalle del daño del cable de presfuerzo externo del puente examinado;
a) fotografía original; b) amplificación digital

4.1.1 Características generales de la inspección visual

Entre las ventajas más significativas en este tipo de inspección, destacan:

- + Es totalmente portátil
- + No es excluyente; se puede usar en combinación con otros métodos
- + Es un método de muy bajo costo
- + Proporciona resultados inmediatos
- + Requiere poco entrenamiento
- + En si misma, no requiere equipo de seguridad
- + Se utiliza en inspecciones globales; necesita poco tiempo en la mayoría de los casos

En contraparte, las limitaciones a las que generalmente se enfrenta un inspector cuando recurre a la inspección visual, son:

- Sólo puede detectar defectos superficiales
- La superficie de inspección debe estar limpia
- Debe haber acceso visual
- La iluminación debe ser consistente con el método de inspección y el tipo de defectos que se pueden observar
- Depende fuertemente de la agudeza visual del inspector
- Susceptible a factores humanos (capacidad, experiencia, estado de ánimo)
- Respecto a otros métodos, tiene una probabilidad de detección muy pequeña que disminuye con el tamaño del defecto

4.2 Líquidos penetrantes (PT)

La inspección por líquidos penetrantes (PT) es una técnica versátil y de simple aplicación para una gran variedad de materiales y diseños que permite localizar defectos o grietas superficiales. El método se basa en los principios básicos de la acción capilar, y la capacidad de humectación de un líquido de baja viscosidad, propiedades que permiten que éste penetre por hendiduras o grietas imperceptibles a la vista para resaltarlas y evidenciarlas. En general, la viscosidad, la capilaridad y la humectación están íntimamente relacionadas entre sí, y dependen de la tensión superficial del líquido y su capacidad para mojar la superficie de un material determinado. Una forma directa para medir dicha capacidad es a través del ángulo que hay en el punto de contacto de una gota con una superficie sólida, y que entre más pequeños sean, es mejor la capacidad de humectación del líquido (figura 4.5).

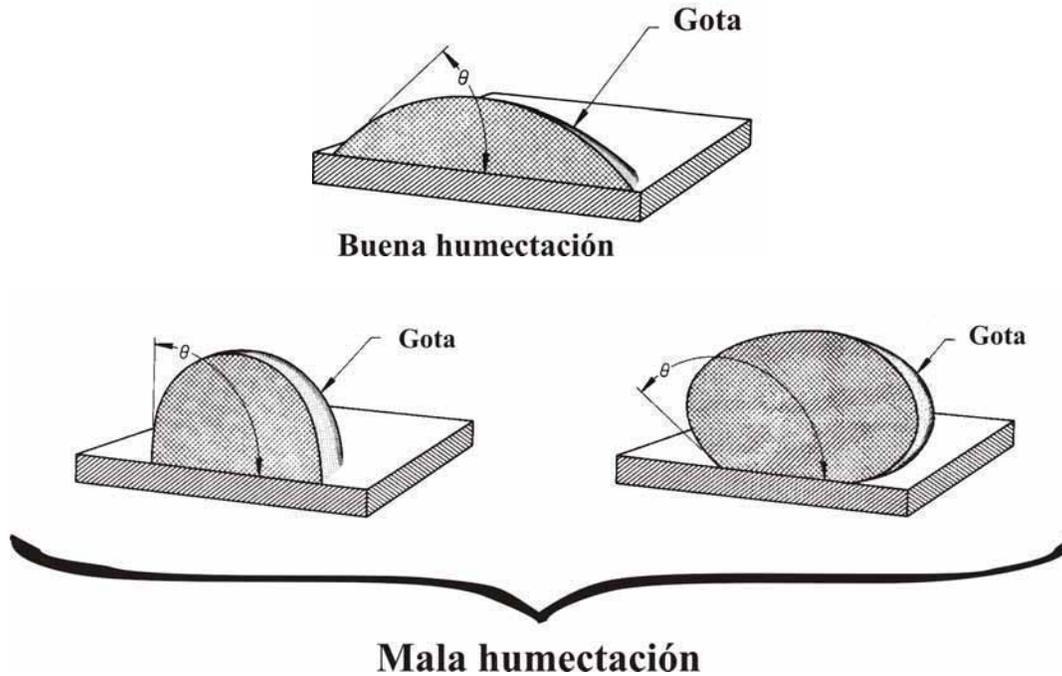


Figura 4.5
 Humectación a partir del ángulo entre una gota y una superficie sólida; a) buena humectación $\theta < 90^\circ$; b) y c) mala humectación $\theta \geq 90^\circ$

Otra manera por medio de la cual mide la capacidad de humectación de un líquido es a través del fenómeno de capilaridad; esto es, midiendo la altura a la que un líquido sube por un tubo capilar (figuras 4.5 y 4.7).

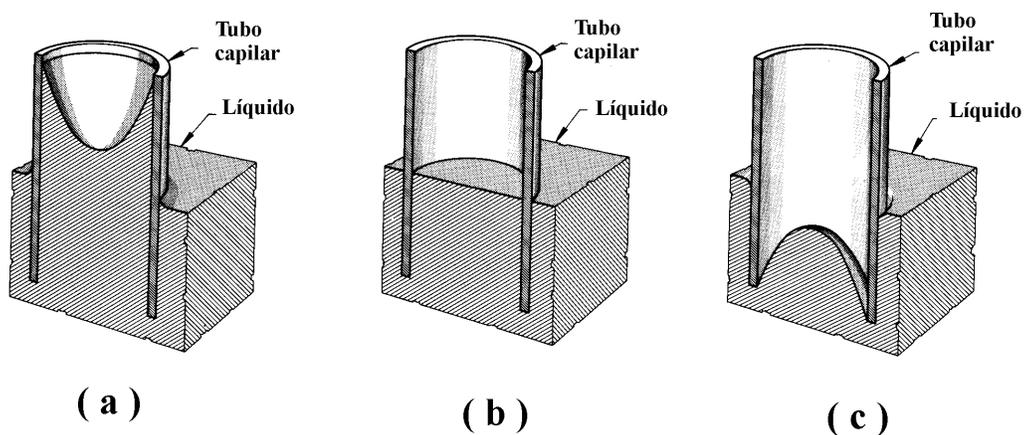


Figura 4.6
 Capilaridad de un líquido determinada por el ángulo de contacto entre un líquido y la pared del tubo; a) alta capilaridad $\theta < 90^\circ$; b) no hay capilaridad $\theta = 90^\circ$; c) depresión capilar $\theta > 90^\circ$

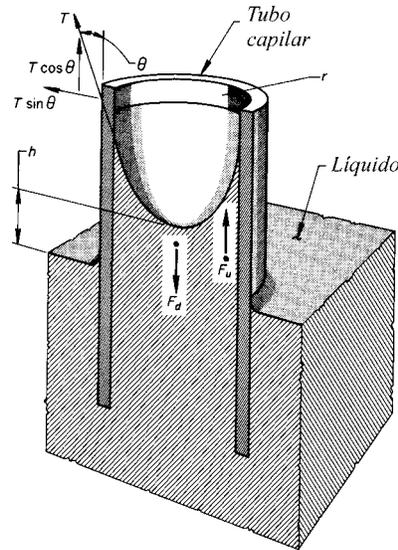


Figura 4.7

Fuerzas que intervienen para el fenómeno de capilaridad: F_d , fuerza descendente por el peso de la columna del líquido; F_u , fuerza ascendente por la tensión superficial a lo largo del perímetro del menisco

4.2.1 Procedimiento general de inspección con PT

En términos generales, la inspección con líquidos penetrantes es un proceso de seis pasos (figura 4.8) cuyo objeto es utilizar un líquido de alta capacidad de humectación que penetre y resalte a simple vista grietas, o defectos superficiales que inicialmente no son visibles (figura 4.9).

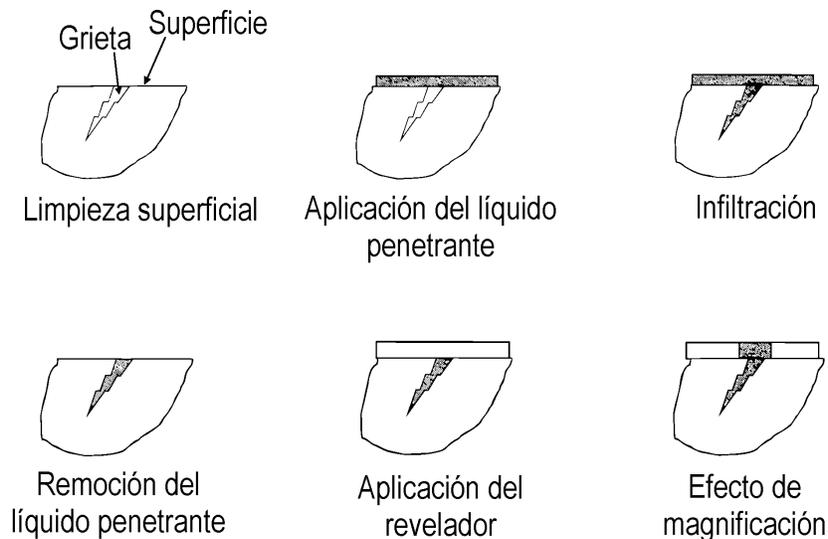


Figura 4.8

Operaciones básicas para la inspección con líquidos penetrantes

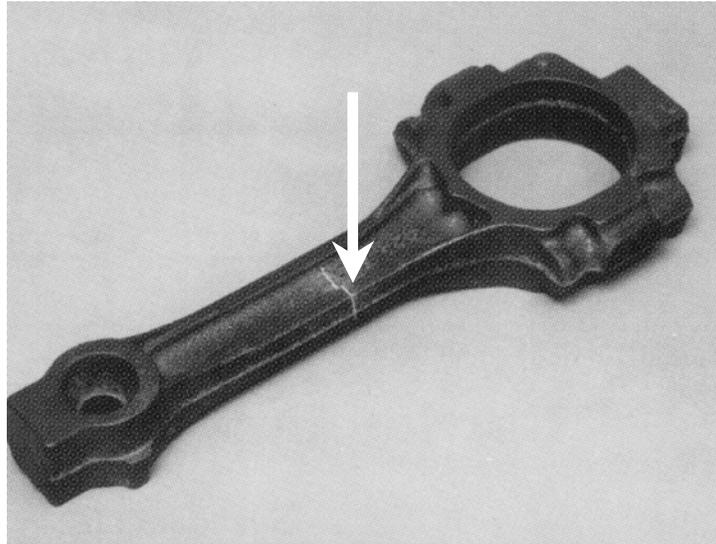


Figura 4.9
Grieta detectada con la técnica de líquidos penetrantes

Limpieza superficial

El primer paso, quizá el más importante, es la limpieza de la superficie que se va a inspeccionar, para que quede libre de impurezas, polvo, pinturas, recubrimientos, residuos de material, grasas y cualquier otro tipo de sustancia o material que pudiera interferir en la evaluación enmascarando las grietas, o dando indicaciones falsas de grietas inexistentes. Esta etapa, puede ser manual o por medios mecánicos; en ambos casos, se debe tener especial cuidado para no “tapar” o “cerrar” las grietas.

Aplicación del líquido penetrante

El segundo paso consiste en la aplicación del líquido penetrante en forma directa sobre la superficie que se desea evaluar. La dosificación se hace con una brocha, por inmersión o rociado, o por cualquier otro procedimiento que permita que el líquido cubra abundante y totalmente la superficie.

Infiltración

Una vez aplicado el líquido penetrante, es necesario dar tiempo para que se infiltre en las grietas e imperfecciones. El tiempo depende del tamaño de grieta que se espera detectar, del material de la pieza, la forma, el tipo de penetrante y la posición de la pieza respecto a la fuerza de gravedad. El tiempo típico de

infiltración o penetración puede variar desde 5 min para discontinuidades relativamente grandes, hasta 3 h en discontinuidades muy pequeñas.

Remoción del líquido penetrante

Se procede a retirar o limpiar de la superficie de la pieza todo el excedente del líquido penetrante, para que quede sólo el que se infiltró por las grietas o defectos. La remoción debe ser antes de que el penetrante seque, pues de lo contrario no va actuar el revelador, volviéndose necesario reiniciar todo el proceso.

Aplicación del revelador

Al igual que el líquido penetrante, el revelador se aplica de muy diversas maneras: con brocha, por inmersión, etc. La función principal es reaccionar con el líquido penetrante (únicamente presente en las grietas o defectos) para colorear y resaltar las áreas en las que éste se encuentre, es decir, en las que hubo infiltración. Cualquiera que sea el revelador, se recomienda que permanezca sobre la superficie aproximadamente el mismo tiempo que se requirió para la infiltración; lo anterior con el fin de dar tiempo a que el revelador reaccione con el penetrante, y se obtenga una indicación de buena calidad. En cada caso, la mejor manera para establecer el tiempo óptimo para la inspección es mediante una serie de pruebas experimentales.

Magnificación

Por lo general, la zona afectada por la reacción líquido penetrante-revelador es mucho mayor que la ocupada por la grieta. Esto se debe a la difusión del penetrante en el revelador, permitiendo resaltar grietas muy pequeñas y aumentar la capacidad de resolución del método de inspección. Por ello, una adecuada selección de los líquidos penetrante-revelador es de fundamental importancia para una buena inspección.

Una vez concluida una inspección con líquidos penetrantes, es recomendable limpiar la superficie ya que éstos tienden a retener humedad, incrementando el riesgo de corrosión, o bien afectando el uso posterior de la pieza. Este paso final puede realizarse mediante un enjuague con agua a presión, por inmersión, o con solvente, según el método aplicado.

4.2.2 Clasificación de los métodos PT

El tamaño, forma y peso de la pieza de trabajo, así como el número de piezas que se quiere inspeccionar son aspectos que se deben tomar en cuenta para seleccionar un método en particular. Sin embargo, en la práctica se encuentra que el grado de sensibilidad y el costo son los factores que más influyen para la selección de un método. Como regla general, se puede decir que los métodos de gran sensibilidad son también los más costosos.

Existe una muy amplia gama de líquidos penetrantes y técnicas que pueden utilizarse en una inspección no destructiva ^[18-20], aunque este tipo de inspección es prácticamente simple, una selección adecuada de los líquidos y una buena aplicación de la técnica son fundamentales para un resultado óptimo. Algunas características de los líquidos penetrantes son:

- Alta capacidad de humectación
- Baja viscosidad
- Alta capilaridad
- Alta tensión superficial
- Lento secado
- No corrosivos
- Alto punto de inflamación
- Fácil de remover o limpiar
- Color brillante y estable

Por sus características propias, los líquidos penetrantes se pueden clasificar en dos tipos generales:

1. Tipo I, fluorescentes
2. Tipo II, no fluorescentes

Tipo I. Fluorescentes

La característica fundamental de este tipo de líquidos es su fluorescencia cuando se exponen a la luz ultravioleta o luz negra generalmente en un cuarto oscuro, para dar mayor realce a la inspección. Casi todos los líquidos de este tipo producen una imagen de color verde y dependiendo de su sensibilidad a la intensidad de la luz, se clasifican en cinco niveles: nivel 1/2, de ultra baja sensibilidad; nivel 1, de baja sensibilidad; nivel 2 de media sensibilidad; nivel 3, de alta sensibilidad; y nivel 4, de muy alta sensibilidad.

Tipo II. Visibles o no fluorescentes

Son comúnmente de color rojo y visibles en condiciones ambientales con la luz blanca. Estos líquidos son generalmente de baja sensibilidad, equivalente al nivel 1 de los líquidos penetrantes fluorescentes.

Otra forma de clasificar los líquidos penetrantes, es de acuerdo con el método con el que se remueve el excedente del penetrante; así, pueden ser cualquiera de los métodos A, B, C, y D, que a continuación se describen.

Método A. Soluble en agua

Este método se refiere a los líquidos penetrantes que, una vez transcurrido el tiempo de infiltración se remueven directamente con un enjuague a base de agua, y no requieren la aplicación de emulsiones. Estos penetrantes contienen la sustancia tipo emulsión y son muy comunes en inspecciones rápidas. Aunque el método es muy simple, tiene la desventaja de su baja sensibilidad, y su lavado excesivo puede remover todo el líquido penetrante infiltrado en las grietas o defectos.

Método B. Emulsión, base aceite

En este tipo de métodos, después de aplicar el líquido penetrante sobre la superficie, se dosifica una emulsión base aceite, que actúa únicamente sobre el líquido excedente. Con ello, el excedente se vuelve soluble al agua y se puede remover fácilmente, evitando disolver el líquido infiltrado por un posible exceso de lavado.

Método C. Penetrante, base solvente

Este método es semejante al método A, excepto que el líquido penetrante se disuelve en un solvente. Su principal ventaja es su alta sensibilidad y su mayor desventaja que requiere mucho trabajo de preparación. Por lo general, su uso se recomienda cuando es necesario inspeccionar un área pequeña, o cuando la inspección se debe realizar en el sitio de operación.

Método D. Emulsión, base agua

Este método es equivalente al método B excepto que la emulsión que se aplica al exceso del líquido penetrante soluble en agua. Por lo general, es lento ya que se debe llevar un control muy preciso del mismo. Su característica más significativa es que se puede obtener una muy alta sensibilidad.

Otra clasificación de los líquidos penetrantes es considerando el tipo de revelador que se utiliza. Como se mencionó, el objeto del revelador es contrastar las grietas o defectos, y destacar o amplificar su presencia para que sean visibles. Existen cuatro formas de reveladores; forma A, que son polvos secos y que generalmente son para el tipo I de líquidos penetrantes. La forma B, son los reveladores líquidos solubles en agua para inspección tipo I o II, y que se aplican para penetrantes no solubles en agua. Forma C, es una suspensión en agua para inspecciones tipo I y II, y la Forma D, son soluciones no acuosas con muy alta sensibilidad, para inspecciones tipo I o II.

En todos los casos, es muy importante tener presente que los métodos, tipos y formas deben ser compatibles entre sí, y seleccionados de acuerdo con la sensibilidad requerida por la inspección que se vaya a realizar.

4.2.3 Ventajas y limitaciones de los líquidos penetrantes

Las ventajas más importantes que tienen las técnicas de inspección por líquidos penetrantes, son:

- + Se utilizan para una gran variedad de materiales
- + Su empleo es relativamente fácil
- + Son de bajo costo
- + La geometría de las piezas no representa un problema
- + Son portátiles; se pueden emplear en laboratorio y en campo
- + Son versátiles; se aplican varios tipos y métodos
- + Permiten cubrir un área muy grande en poco tiempo
- + La orientación, o forma de las grietas superficiales no representa problema alguno
- + Los inspectores se capacitan en poco tiempo

Por otra parte, entre las limitaciones más notables destacan:

- Tienen graves limitaciones cuando se utilizan en materiales porosos
- Se aplican sólo para defectos superficiales
- La superficie de inspección debe estar limpia antes y después de la inspección
- Se debe tener acceso directo a la superficie que se desea inspeccionar
- Por si mismas, no proporcionan un registro permanente
- En superficies rugosas se pueden obtener mediciones falsas
- Los esfuerzos residuales afectan cerrando grietas e impidiendo la infiltración de los líquidos penetrantes
- Debe haber compatibilidad química entre los líquidos y el material (corrosión)
- Requieren de un área de trabajo bien ventilada
- Dependen de factores humanos, tanto para la aplicación misma, como su interpretación
- Se debe cuidar la limpieza durante todo el proceso de preparación y aplicación para evitar contaminación de líquidos

Cuando se utilizan técnicas por líquidos penetrantes, existen varios aspectos de seguridad que hay que tomar en cuenta para garantizar la integridad de los inspectores. En primer lugar, es importante que el área de trabajo tenga una ventilación adecuada para evitar riesgo de intoxicación o incendio, especialmente cuando se emplean solventes. Por lo general, los líquidos y sustancias que se aplican son irritantes a la piel, por lo que se deben utilizar guantes y gafas. Cuando se aplican polvos reveladores, el uso de máscaras es indispensable para evitar sean inhalados por el inspector y se exponga a daños en las vías respiratorias. En los métodos tipo I, el manejo de la luz ultravioleta debe hacerse con cuidado a fin de evitar sobreexposición de la piel, o de los ojos. Finalmente, otro aspecto fundamental es cuidar la compatibilidad química de las sustancias con el material que se va a inspeccionar y las sustancias que éste puede contener.

4.3 Corrientes parásitas o Eddy (ET)

Las técnicas de corrientes parásitas, o corrientes Eddy (ET), se utilizan en materiales conductores basándose en el análisis de las variaciones que las grietas, o defectos superficiales producen en un flujo de corrientes inducidas. Para inducir estas corrientes se utiliza una bobina externa con corriente alterna que genera un campo magnético variable. Como las corrientes inducidas (o parásitas) provocan un campo magnético secundario que tiende a contrarrestar el primero, las variaciones en las primeras se miden a través del campo magnético secundario, el cual se mide con una bobina que puede ser la misma que induce las corrientes u otra independiente.

Las corrientes inducidas, y por tanto, las inspecciones no destructivas basadas en este principio, dependen de varios factores que incluyen la conductividad del material, la permeabilidad magnética, la densidad del espécimen, los esfuerzos residuales, la microestructura, factores geométricos, el acoplamiento magnético, y los defectos o grietas. La sensibilidad a todos ellos hace que esta técnica se emplee en una gran cantidad de aplicaciones o problemas; sin embargo, siempre estará limitada a que el material sea conductor, y para identificar anomalías superficiales o muy cercanas a la superficie.

A pesar de que la técnica de inspección por corrientes Eddy se desarrolló a partir de 1940, el principio físico en el que se respalda ya se conocía desde 1831, cuando Faraday descubrió que un campo magnético variable induce corrientes eléctricas en una bobina. El formalismo matemático del fenómeno quedó descrito en 1864, cuando Maxwell desarrolló la teoría clásica del electromagnetismo. Con fundamento en esta teoría fue que en 1879 se comenzaron a utilizar las corrientes inducidas para medir la conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y temperatura de los metales. Después de esto, pocas aplicaciones no siendo sino hasta 1920, cuando se aplicaron las corrientes parásitas para medir espesores de tuberías, y posteriormente, en 1930 para evaluar soldaduras en tubos de acero.

La ley de Faraday establece que cuando un campo magnético “corta” a un conductor (o un conductor corta a un campo magnético), se induce una corriente eléctrica en el conductor si ésta puede establecer una trayectoria cerrada. La corriente en el conductor se puede generar en dos formas: la primera, moviendo el conductor a través de las líneas del campo magnético; y la segunda, variando el campo magnético que actúa sobre un conductor fijo.

Un esquema de la técnica de inspección por corrientes parásitas se muestra en la figura 4.10. Nótese que la corriente alterna conectada a una bobina induce una corriente eléctrica sobre la superficie del conductor que, en consecuencia, genera un campo magnético secundario opuesto al principal, e cual altera la impedancia de la bobina, modificando la corriente eléctrica que fluye por ésta, y cuya variación se mide con el indicador.

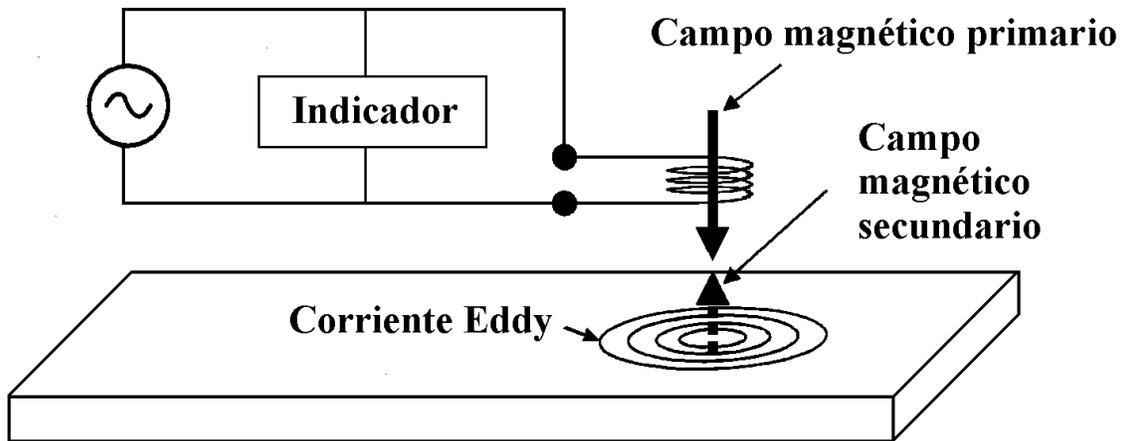


Figura 4.10
Representación esquemática de la técnica de inspección por corrientes parásitas, o Eddy

4.3.1 Tipos de bobina o sensores

En la figura 4.11 se muestran los tres tipos básicos de sensores o bobinas que se utilizan en la inspección no destructiva por corrientes parásitas: bobinas de superficie, bobinas exteriores, y bobinas interiores. A pesar de que los tres tipos son diferentes, en todos los casos las corrientes inducidas fluyen sobre la superficie del material en dirección paralela a la orientación de la bobina. Es importante destacar que la intensidad de las corrientes inducidas es mayor sobre la superficie, y disminuye rápidamente con la profundidad; es por esto, que son más sensibles a discontinuidades superficiales orientadas perpendicularmente a la dirección de las corrientes inducidas.

El campo eléctrico inducido por una bobina es directamente proporcional a la magnitud de la corriente alterna aplicada y su frecuencia. Igualmente influyen los parámetros propios de la bobina, tales como la inductancia, el diámetro, la longitud, el número de vueltas y el material en el núcleo de la bobina.

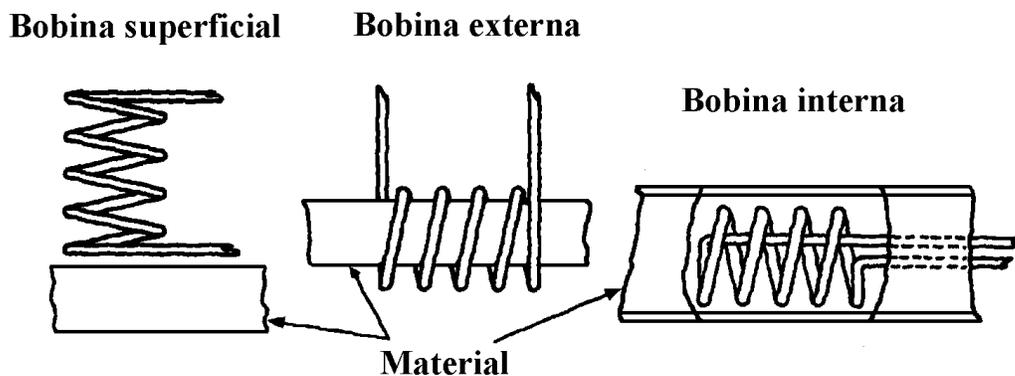


Figura 4.11
Tipos de bobinas para inspección de corrientes Eddy

Bobinas de superficie

Se emplean para inspecciones en superficiales relativamente planas, donde la corriente inducida sigue un patrón circular con un diámetro similar al de la bobina. Por lo general, la bobina se envuelve en un núcleo ferromagnético que concentra el flujo de campo magnético en un volumen mucho menor, con lo que se aumenta la sensibilidad a las discontinuidades muy pequeñas. En la figura 4.12 aparecen diferentes tipos de probadores superficiales.

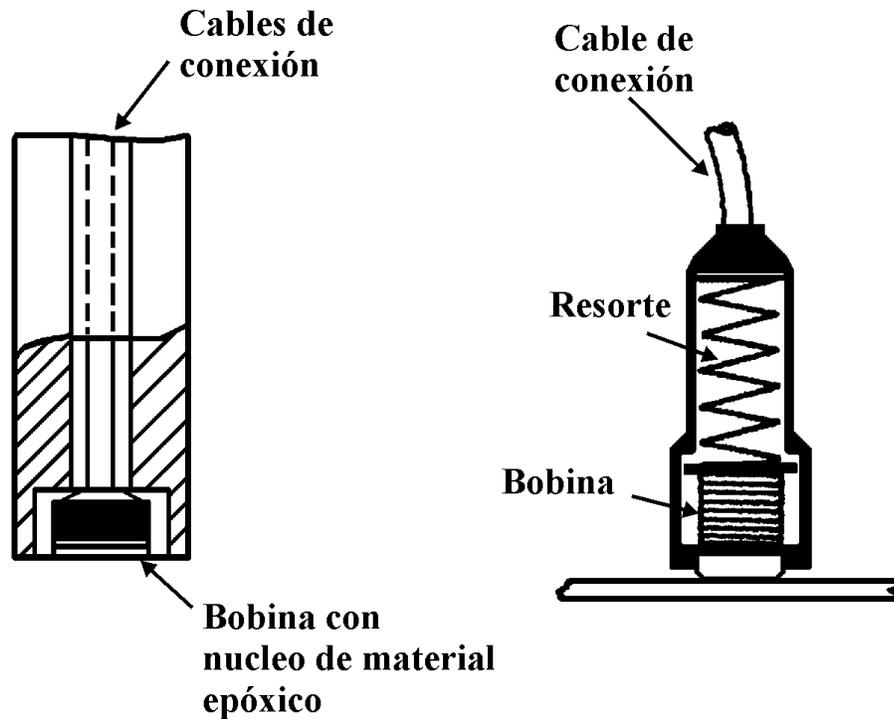


Figura 4.12
Probadores superficiales para la inspección por corrientes Eddy

Bobinas exteriores

Se conocen también como sensores de diámetro exterior o envoltentes, y se aplican en la detección de defectos longitudinales en tubos y barras metálicas. En este tipo de sensores, las bobinas se enrollan alrededor del espécimen de manera que las corrientes inducidas fluyen en dirección circunferencial, lo que permite sean muy sensibles a los defectos orientados en la misma dirección del eje de la bobina.

En igual forma que las bobinas superficiales, el flujo de corriente inducida es mayor en la superficie y decrece significativamente con la profundidad. Como se puede observar en la figura 4.13, la longitud de la bobina y el número de espiras por unidad de longitud pueden ser variables, de manera que se diseñan para aplicaciones particulares. Así, una bobina grande con espiras poco cerradas es para evaluar propiedades globales del material, como es la conductividad; por otro lado, las bobinas pequeñas muy cerradas se emplean para evaluar áreas pequeñas e identificar defectos muy chicos.

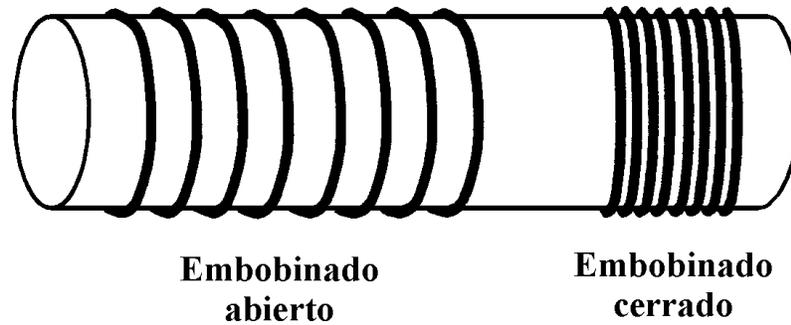


Figura 4.13
Configuraciones de bobinas exteriores

Bobinas para interiores

Son sensores muy semejantes a las bobinas exteriores; se conocen también como sensores de diámetro interno y se emplean para inspecciones en el interior de barrenos o tubos (figura 4.14). Tienen muy alta sensibilidad a los defectos superficiales con orientación paralela al eje de la bobina.

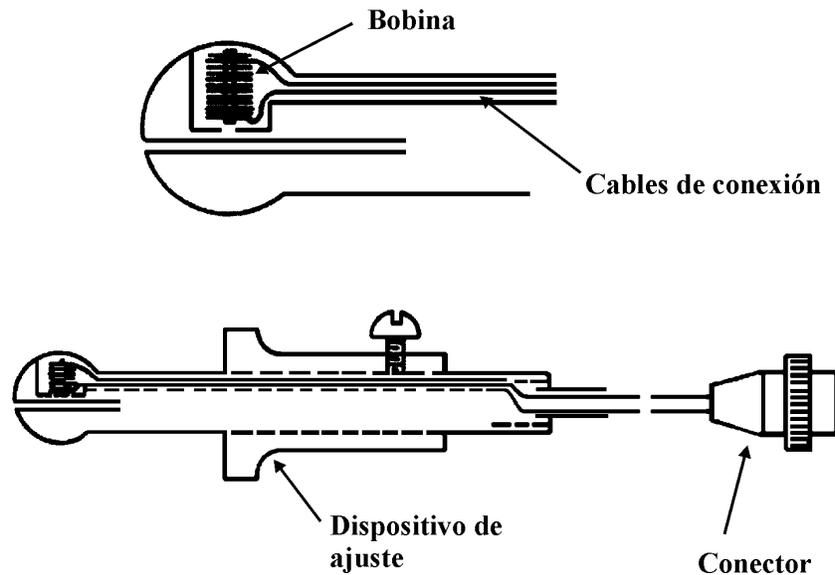


Figura 4.14
Bobina para inspección de interiores por corrientes Eddy

Otra forma para clasificar las bobinas que se aplican en la inspección no destructiva por corrientes parásitas o inducidas, es con base en el arreglo eléctrico, y pueden ser de los siguientes tipos:

- a) Bobina única
- b) Bobinas dobles
- c) Bobinas diferenciales

Bobina única

Estos sensores (figura 4.15) utilizan una sola bobina para inducir la corriente parásita, y medir las variaciones del campo magnético secundario. En este caso, el dispositivo de medición puede ser un voltímetro, amperímetro u osciloscopio.

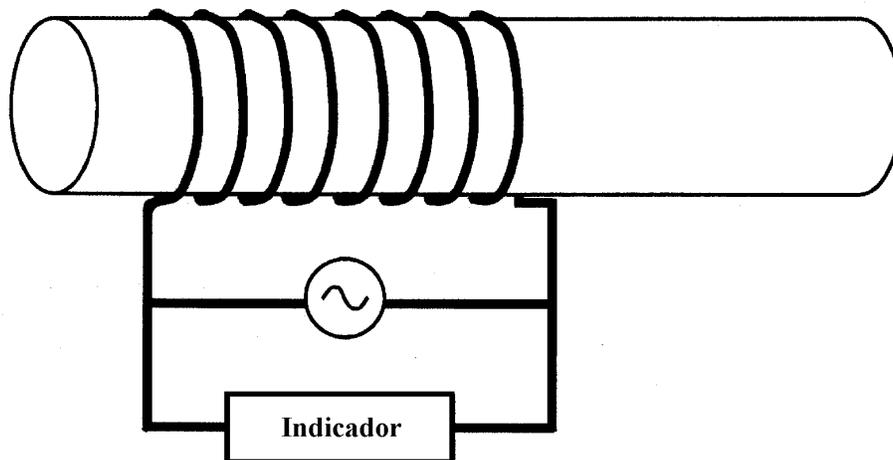


Figura 4.15
Diagrama de bobina única

Bobinas dobles

La figura 4.16 corresponde a la configuración típica de las bobinas dobles. En este arreglo una bobina, llamada primaria, genera el campo magnético para inducir las corrientes parásitas; y una segunda bobina, conocida como secundaria, mide las variaciones del campo magnético secundario. Aunque los dos circuitos eléctricos son independientes, es común que una bobina se enrolle sobre la otra de forma que ambas prácticamente ocupan el mismo espacio. Sin embargo, existen otras configuraciones que se pueden adoptar, lo cual depende de la aplicación particular.

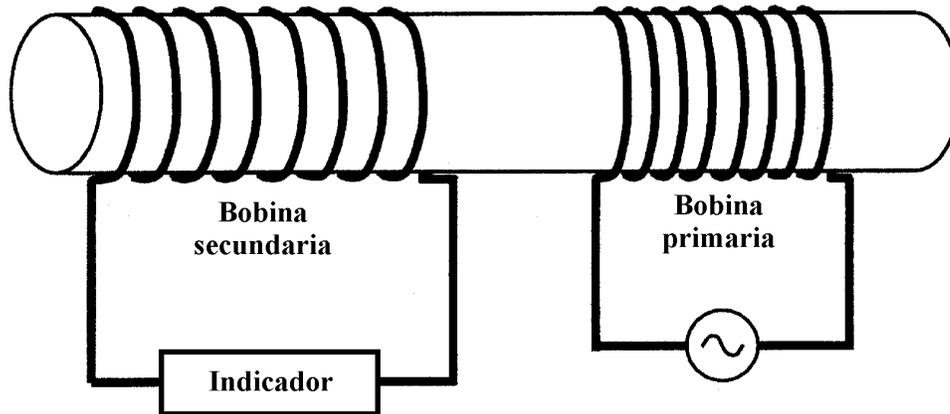


Figura 4.16
Diagrama de un arreglo para medición absoluta de bobina doble

Bobinas diferenciales

Los arreglos diferenciales conectan dos bobinas en serie, de manera que la corriente parásita se induce a dos piezas diferentes (la referencia y la que se evalúa (figura 4.17a), o a dos segmentos de una misma pieza (figura 4.17b). Con ello se obtiene una medición relativa entre ambas, y el circuito eléctrico se balancea de modo que sólo hay una medición diferente a cero cuando hay una diferencia entre ambos segmentos de material, resultando un método muy práctico para casos de “pasa/no pasa”.

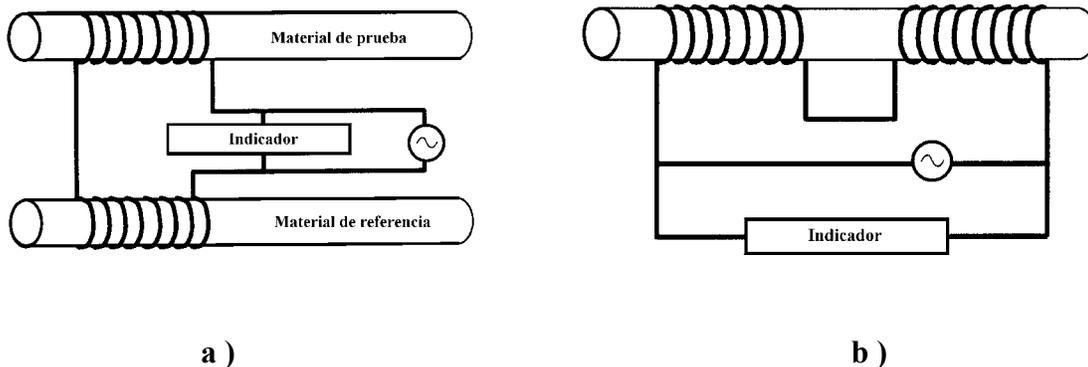


Figura 4.17
Diagramas de diferentes arreglos diferenciales para la inspección por corrientes Eddy; a) comparación externa; b) autocomparación

4.3.2 Sensibilidad del método de corrientes Eddy

Como se ha mencionado, las técnicas de inspección por corrientes parásitas o Eddy dependen de varios parámetros que corresponden a propiedades del material que se va a inspeccionar, características de los sensores empleados, o del procedimiento mismo de inspección.

La versatilidad de estas técnicas es un “arma de dos filos” ya que, por un lado, se pueden aplicar a diversos casos y pueden proporcionar mucha información; pero por el otro, se debe tener un conocimiento de cómo interviene y se controla cada uno de los parámetros para una correcta aplicación e interpretación.

En esta sección se describirán los seis factores más importantes que se deben considerar: conductividad eléctrica; permeabilidad magnética; factor de distancia; factor de relleno; efectos de borde, y efecto pantalla.

4.3.2.1 Conductividad eléctrica

El parámetro principal que describe el fenómeno de las corrientes parásitas es la conductividad, por lo que se aplica fundamentalmente en materiales conductores, y especialmente metales. Así, mediante una IND por corrientes Eddy se pueden evaluar parámetros que dependen de la conductividad, tales como la temperatura; el tipo de aleación; el tratamiento térmico y su microestructura (tamaño de grano); la dureza; los esfuerzos residuales, y las discontinuidades. En general, a mayor conductividad, mayor sensibilidad del método con una menor capacidad de penetración superficial (ver sección 4.3.3.2). La conductividad relativa de varios metales se muestra en las tablas 4.1 y 4.2 ^[21].

Tabla 4.1
Conductividad de varios metales y aleaciones

Metal o aleación metálica	Conductividad % IACS*
Plata	105
Cobre recocido	100
Oro	70
Aluminio	61
Magnesio	37
Latón 70-30	28
Bronce fosforado	11
Monel	3,6
Zirconio	3,4
Zircaloy-2	2,4
Titanio	3,1
Aleación Ti-6Al-4V	1,0
Acero inoxidable 304	3,5
Inconel 600	1,7
Hastelloy X	1,5
Waspaloy	1,4

El IACS (Patrón Internacional de Cobre Recocido) asigna al cobre un valor de conductividad del 100%

Tabla 4.2
Conductividad eléctrica para varias aleaciones de aluminio

Aleación y templado	Conductividad eléctrica % IACS	
	Mínimo	Máximo
1100	57,0	62,0
2014.0	48,5	51,5
2014-T3XX	31,5	35,0
2014-T4XX	31,5	35,0
2014-T6XX	37,0	41,5
2024-0	45,5	50,0
2024-T3XX	28,0	33,0
2024-T4XX	28,5	32,5
2024-T6XX	35,0	41,0
2024-T8XX	36,0	42,5
2219-0	43,0	46,0
2219-T3XX	27,0	31,0
2219-T62X	31,0	35,5
2219-T8XX	31,0	35,5
3003-0	44,5	50,0
6061-0	47,0	51,0
6061-T4-XX	35,5	41,5
6061-T6XX	40,0	45,0
7075-0	44,0	48,0
7075-T6XX	30,0	35,0
7075-T73X	38,0	42,5
7075-T76X	36,0	39,0
7079-0	44,0	47,0
7079-T6XX	30,0	35,0
7178-0	43,0	47,0
7178-T6XX	29,0	34,0
7178-T76	35,0	39,0

En la tabla 4.2 se puede observar que una aleación con una misma composición química (ie 2024) tiene diferencias significativas en la conductividad eléctrica, que depende fundamentalmente del tratamiento termomecánico y su subsiguiente efecto en la microestructura. En general, una aleación presenta mayor conductividad cuando está totalmente revenida, antes del tratamiento térmico.

4.3.2.2 Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética (μ) del material de una pieza que se inspeccione tiene un efecto muy importante en la inspección no destructiva, particularmente la que utiliza corrientes Eddy. La permeabilidad definida como la ecuación 4.1, mide la capacidad para producir un campo magnético en el material.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4.1)$$

Donde, B = intensidad del campo magnético

H = fuerza magnética en el material

Como las corrientes Eddy se inducen por el campo magnético de la bobina, la permeabilidad del material influye de manera importante en la corriente inducida y, por tanto, en el campo magnético secundario.

La permeabilidad magnética $\mu=1$, corresponde al valor de materiales no magnéticos. Para ferromagnéticos, el valor de μ es mayor a uno, $\mu >1$, lo que significa que el campo magnético inducido se intensifica con el material. Esto último, para los materiales ferromagnéticos plantea un problema potencial cuando se utilizan las corrientes Eddy en pruebas no destructivas, ya que las variaciones en el campo magnético pueden producir cambios de impedancia mayores a los debidos por los parámetros de interés (grietas, microestructura, espesor, conductividad, etc).

La solución que se da en este último caso es saturar magnéticamente el material, para que los cambios en el campo magnético no se amplifiquen y no superen a los que se generan por las propiedades de interés. Para saturar el material ferromagnético se utiliza una bobina de corriente directa, y posteriormente se aplica una señal de corriente alterna para inducir las corrientes Eddy.

4.3.2.3 Factor de distancia (*lift-off factor*)

Las indicaciones de las corrientes Eddy son muy sensibles a la distancia entre la bobina y la superficie del material inspeccionado, debido a que la densidad de corriente disminuye rápidamente a medida que la bobina se separa de la superficie de la pieza. Como las variaciones en la separación entre la bobina y la superficie (es decir, el acoplamiento magnético) pueden enmascarar los cambios de impedancia por las causas que interesan, es importante que la distancia se mantenga constante. A pesar que con ello se complica la aplicación de la técnica de inspección no destructiva por corrientes Eddy para piezas de geometría irregular, el efecto del factor de distancia puede emplearse para medir espesores de recubrimientos no conductores (ie pinturas, anodinados) sobre superficies metálicas.

4.3.2.4 Factor de relleno (*fill factor*)

El factor de relleno, o "*fill factor*", describe en el caso de bobinas exteriores o interiores el mismo efecto que en el factor de distancia para las bobinas de superficies. Al respecto, el factor de relleno es sensible a la distancia que hay entre la superficie del material y la de la bobina, que fundamentalmente se deben a las variaciones en el diámetro (interior o exterior, según el caso) de la pieza y del diámetro de la bobina.

Como en este tipo de variaciones pueden resultar cambios muy grandes de impedancia, y enmascarar los cambios por otros parámetros de interés, en una inspección es fundamental mantener la relación entre los diámetros de la pieza y de la bobina. El factor de relleno, N_{fill} , se define mediante la ecuación 4.2, donde

D_i , es el diámetro interno de la bobina, y d_0 el diámetro exterior del objeto de prueba (para el caso de una bobina exterior). Cabe mencionar que es deseable que el factor de relleno sea lo más cercano a la unidad.

$$N_{fill} = \left(\frac{d_0}{D_i} \right)^2 \quad (4.2)$$

Un término análogo se encuentra para el caso de las bobinas interiores, donde el factor de relleno se calcula de la razón entre el diámetro externo de la bobina entre el diámetro interno de la pieza. De manera semejante al factor de distancia, la alta sensibilidad del factor de relleno puede ser favorable para medir diámetros en tubos o barras circulares.

4.3.2.5 Efectos de borde o frontera

El efecto de borde se relaciona con la distorsión en el flujo de corriente inducida, cuando la bobina se aproxima al borde de la pieza o a una unión entre materiales. Una distorsión grande en el flujo de corriente puede tener cambios importantes en las mediciones y, por tanto, enmascarar variaciones por otro tipo de anomalías. A pesar de que existen diseños de bobinas que reducen el área de inspección minimizando el efecto de borde, éste no se puede eliminar completamente, y es recomendable que el área de inspección se mantenga a una distancia determinada de los bordes o fronteras. En general, se establece 3,175 mm (1/8") como la distancia mínima a la que se puede aproximar el área de inspección al borde; sin embargo, el valor depende del tipo y tamaño de bobina y la frecuencia de la corriente alterna de prueba.

4.3.2.6 Efecto de pantalla (*skin factor*)

En la figura 4.18 se presenta una gráfica en la que se muestra la variación de la densidad de corriente como función de la profundidad; puede observarse cómo disminuye rápidamente la densidad de corriente a medida que aumenta la profundidad, por lo que prácticamente las corrientes inducidas se presentan en la superficie del material. A este fenómeno se le denomina "efecto de pantalla" y se debe al campo magnético secundario que las mismas corrientes inducidas producen. Así, los parámetros que tienden a incrementar la densidad de corriente inducida (ie conductividad, ó permeabilidad magnética), también aumentan la intensidad del campo magnético secundario, por lo que disminuyen la capacidad de penetración en el material, resultando un efecto de pantalla mucho mayor.

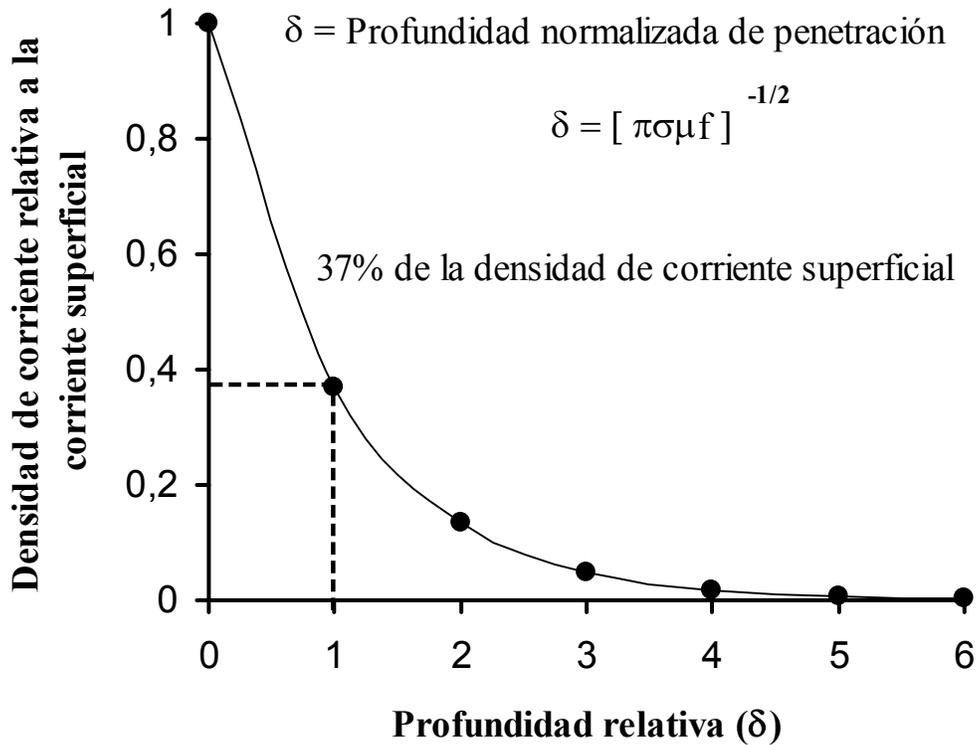


Figura 4.18
Densidad de corriente normalizada en función de la profundidad de penetración normalizada

La profundidad normalizada de penetración δ , se define como la profundidad a la cual la densidad de corriente ha disminuido a un 37% (es decir, a un $1/e$ %) del valor en la superficie. Este parámetro se define de la siguiente manera:

$$\delta = [\pi \sigma \mu f]^{-1/2} \quad (4.3)$$

Donde σ es la conductividad del material; f la frecuencia de la corriente alterna en la bobina, y μ la permeabilidad magnética del material.

En la figura 4.19 se aprecian las gráficas típicas de la profundidad normalizada de penetración como función de la frecuencia para diferentes materiales. Nótese que dicha profundidad aumenta inversamente con la frecuencia, por lo que se definen dos rangos de inspección: corrientes Eddy de baja frecuencia (LFEC), que corresponden a valores de frecuencia entre 100 Hz y 50 kHz; y corrientes de Eddy de alta frecuencia (HFEC) para frecuencias mayores de 100 kHz.

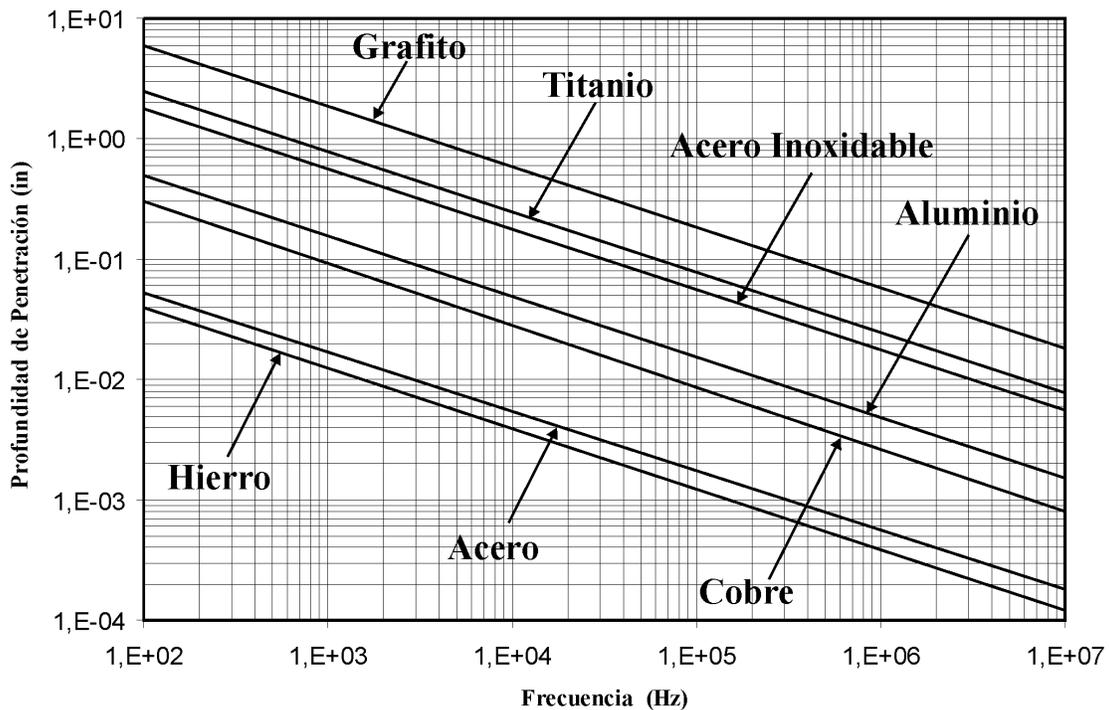


Figura 4.19
Profundidad normalizada de penetración, como función de la frecuencia y para varios materiales

También se observa que el valor de δ aumenta cuando la conductividad disminuye, con lo que se tiene mayor penetración en materiales que no son buenos conductores. Adicionalmente, la capacidad de penetración es menor para materiales ferromagnéticos (es decir, la profundidad disminuye cuando aumenta μ). Como se mencionó, los materiales ferromagnéticos generalmente se pueden saturar magnéticamente con una bobina adicional, por lo que el valor de μ no presenta variaciones cuando se cambia la frecuencia.

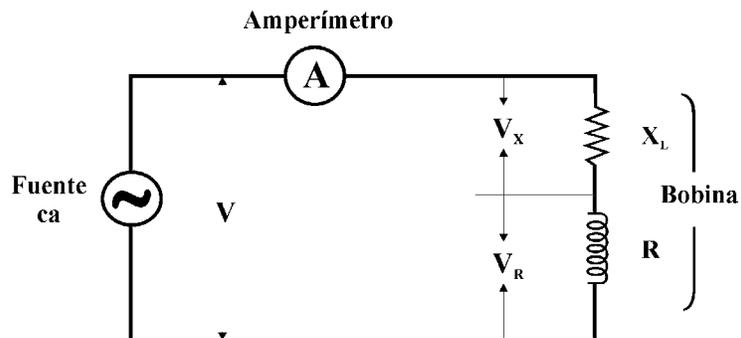
El efecto de pantalla hace que exista un espesor límite para realizar una inspección no destructiva por corrientes Eddy; cuando se evalúan espesores, la capacidad de medición está restringida hasta el valor de la profundidad de penetración normalizada (δ) para el material y la frecuencia utilizada. Por tanto, se puede afirmar que la técnica por corrientes Eddy es más precisa para piezas delgadas, en contraste con la inspección por ultrasonido que es mejor para piezas gruesas. En consecuencia, se concluye que ambas técnicas son complementarias en ciertos casos.

4.3.3 Pruebas por impedancia

Como se analizó en la sección anterior, la inducción de corrientes en un conductor depende de varios factores geométricos y del material. Mientras que la sensibilidad a varios parámetros sugiere aplicaciones diversas para la inspección por corrientes Eddy, es necesario separar adecuadamente la influencia que cada uno tiene para una adecuada interpretación. Esta sección resume brevemente algunos de los procedimientos más utilizados para interpretar los resultados de una inspección por corrientes parásitas, o Eddy.

La inspección por corrientes Eddy consiste en la generación de un campo magnético para inducir corrientes parásitas en una pieza conductora; donde a su vez genera un campo magnético secundario, contrario al primero, que se mide con una bobina. Por tanto, la impedancia de la bobina (resistencia eléctrica a la corriente) es el parámetro básico que se mide para detectar la intensidad de las corrientes Eddy. Considérese un circuito eléctrico con una fuente de corriente alterna, un amperímetro, una bobina y una resistencia conforme la figura 4.20. Si se aplica corriente directa al circuito, la resistencia eléctrica, R , de la bobina es lo único que se opone a dicha corriente. Por el contrario, al aplicar una corriente alterna, la resistencia a la corriente se compone de dos valores de impedancia desfasados en 90° : la resistencia, R , y la reactancia inductiva, X_L , de la bobina (ambas expresadas en ohms).

$$X_L = 2\pi f L_0 \quad (4.4)$$



Circuito de corriente alterna

Figura 4.20
Esquema del diagrama eléctrico con resistencia R , y reactancia inductiva X_L

En la ecuación 4.4, f es la frecuencia de la corriente alterna en Hertz (Hz); y L_0 la inductancia de la bobina en Henrys. Nótese que X_L depende de los parámetros de la bobina y la frecuencia de prueba.

La magnitud total de impedancia (resistencia a la corriente alterna) está dada por la relación:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (4.5)$$

Cuando aumenta la frecuencia, la impedancia total de la bobina también lo hace, por lo que disminuye la intensidad del campo magnético primario y, en consecuencia, baja la intensidad de la corriente inducida en la pieza que se evalúa. Los voltajes V_X y V_R (figura 4.20) debidos a la reactancia inductiva y la resistencia de la bobina, están desfasados uno respecto al otro en un ángulo de 90° . Como la corriente es la misma en cada instante de tiempo, la reactancia y resistencia también se desfasan en un ángulo α , como en la figura 4.21. Así, ambas impedancias de la bobina se definen como:

$$X_L = \frac{V_X}{i} \quad (4.6)$$

$$R = \frac{V_R}{i} \quad (4.7)$$

En forma esquemática, los dos voltajes e impedancias pueden representarse como vectores en el plano de voltajes e impedancia, como se muestra en la figura 4.21.

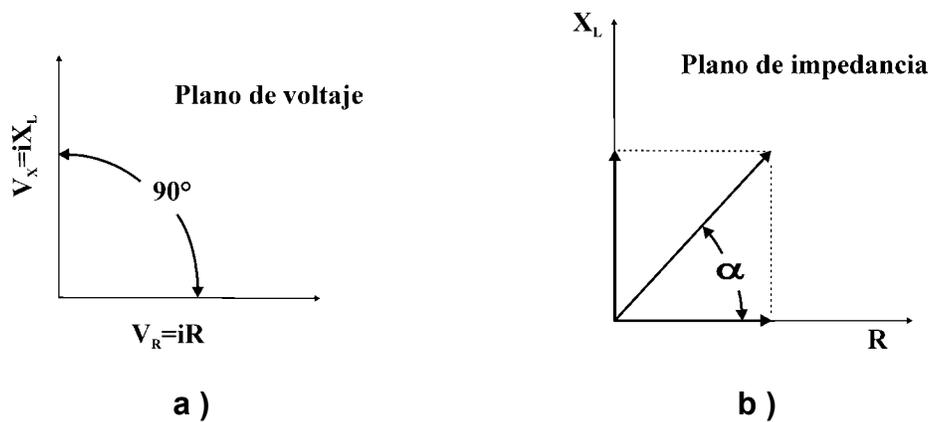


Figura 4.21

Diagramas de voltaje e impedancia mostrando: a) La diferencia de 90° en el ángulo de fase, y b) la relación relativa entre la reactancia X_L y resistencia R

Con base en los principios mencionados, pueden emplearse varios métodos de análisis para relacionar los parámetros de prueba con los cambios en la impedancia de la bobina, que resulta de las corrientes inducidas o corrientes Eddy sobre la pieza que se inspecciona. A continuación se analizarán brevemente algunos aspectos relevantes de estos métodos.

4.3.3.1 Sistemas de medición de impedancias

Los equipos que miden impedancias son capaces de registrar cambios en la impedancia total de la bobina, pero no la información del comportamiento de la relación de las fases de las impedancias (ie ángulo α). Por lo general, se busca que los cambios de impedancia que se van a medir, se deban únicamente a variaciones del único parámetro que interesa, mientras que los demás se mantienen constantes (conductividad, factor de distancia, factor de relleno, conductividad, frecuencia, etc.).

Este método resulta muy efectivo cuando las variaciones en el parámetro de prueba producen cambios significativos en la impedancia, como la presencia de grietas o discontinuidades geométricas. Por el contrario, es poco efectivo ante cambios pequeños o graduales en los parámetros, como conductividad, espesor o dureza, ya que resulta particularmente difícil identificar o aislar la causa, o causas que originen los cambios de impedancia.

4.3.3.2 Sistemas para el análisis de fases

Por lo general, estos sistemas o equipos son capaces de medir simultáneamente las impedancias y los ángulos de fase, y facilitan el análisis para identificar entre todos los parámetros posibles, aquel que presenta la variación más significativa y que causa las variaciones en impedancia o fase registradas. A pesar de que hay varias formas de analizar los datos, en los ejemplos que se mostrarán a continuación, se presenta el formato más común para analizar y aislar las diferentes variables de prueba.

Efecto de la conductividad

Supóngase que se mide el flujo de corriente inducida a varios bloques gruesos iguales, cuya única diferencia es el valor de la conductividad (material). En este caso, la frecuencia, el factor de relleno, la geometría, etc, se mantienen sin cambio y las mediciones se hacen conservando el factor de distancia constante a una distancia cero entre la bobina y la pieza. Al medir la impedancia de la bobina en cada pieza y se grafica en el plano de impedancias el par de valores de reactancia X_L y resistencia R de la bobina, se obtendría una gráfica semejante a la de la figura 4.22. Los resultados muestran dos límites para la conductividad: aire (0% IACS) y cobre revenido (100% IACS). Nótese que los cambios en la conductividad del espécimen producen variaciones en la reactancia y resistencia de la bobina, de tal manera que si aumenta la conductividad del material, la resistencia es mayor, a la vez que disminuye la reactancia.

Efecto de factor de distancia

Si se realizan mediciones de impedancia para un único material, variando únicamente la distancia de la bobina a la superficie de la pieza (es decir, variar el

factor de distancia), los resultados graficados para el caso del cobre serían semejantes a la gráfica de la figura 4.23a, y la familia de curvas para diferentes materiales serían las de la 4.23b. Es importante destacar que a medida que la distancia aumenta, los valores de reactancia y resistencia tienden al valor del aire (0% IACS).

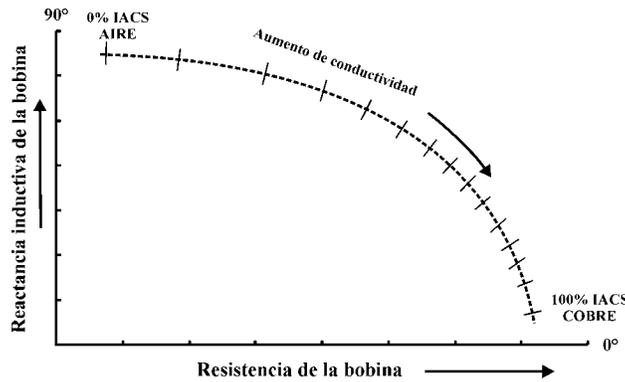


Figura 4.22

Variaciones de reactancia y resistencia como función de la conductividad. Estos resultados son para bloques idénticos con diferentes valores de conductividad (materiales)

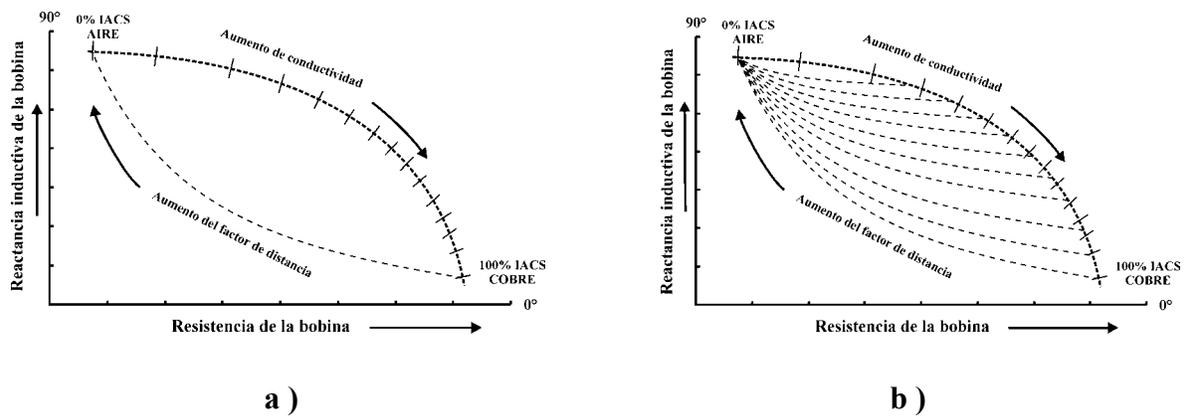


Figura 4.23

Variaciones de reactancia y resistencia por efecto del factor de distancia; a) variaciones para cobre; b) familia de curvas para varios materiales

Efecto de la frecuencia

En las figuras 4.24a y 4.24b se muestra el efecto de la frecuencia sobre los valores de reactancia y resistencia y, por tanto, sobre la curva de conductividad. Nótese que para alta frecuencia hay un corrimiento hacia el valor del cobre, lográndose mayor sensibilidad en materiales poco conductores. Por el contrario, a

baja frecuencia, el corrimiento es hacia el valor del aire, lo que permite tener mejor sensibilidad para los materiales con alta conductividad.

En estas mismas circunstancias, tomando como referencia al bronce se observa la variación en la curva por el efecto del factor de distancia. En este último caso la sensibilidad al factor de distancia es mayor cuando se trabaja con alta frecuencia, mientras que su sensibilidad decrece a medida en que se reduce la frecuencia.

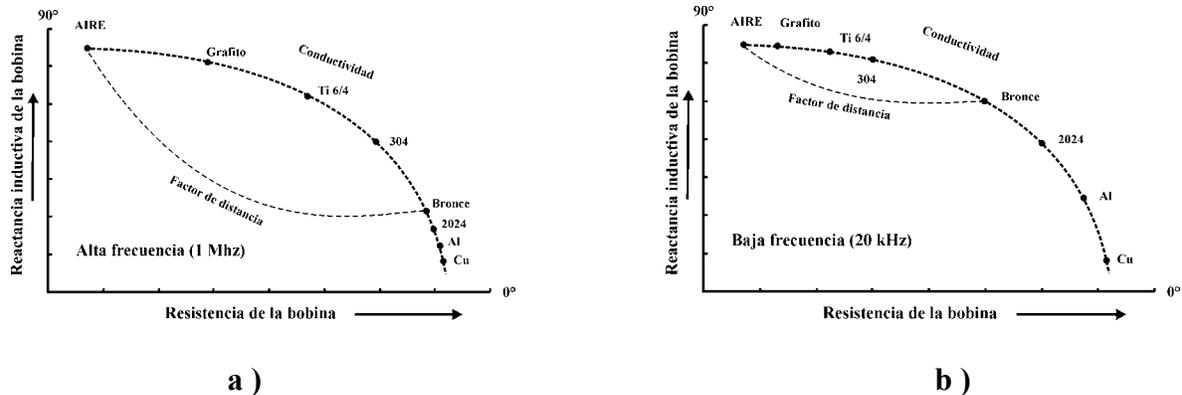


Figura 4.24
Efecto de la frecuencia sobre la conductividad, y el factor de distancia; a) alta frecuencia; y b) baja frecuencia

Efecto del espesor

Determinar el espesor de materiales mediante la inspección por corrientes Eddy se puede realizar con base en una serie de comparaciones con especímenes de varios espesores conocidos. En la figura 4.25a se muestra cómo varían las impedancias en piezas de latón con espesores de 0,0254 mm (0,001 in) a 0,2032 mm (0,008 in). En este caso, para espesores mayores de 0,2032 mm (0,008 in), el efecto del espesor se vuelve poco significativo y se comporta como un material de mucho grosor. De alguna manera, este valor límite puede dar un criterio (al menos para la inspección por corrientes Eddy) para definir una pieza delgada. De igual forma, destaca el hecho de que a medida en que el espesor se reduce, la curva tiende al valor de conductividad del aire (0% IACS).

Como se aprecia en las figuras 4.25b y 4.25c, la posición relativa de los diferentes espesores depende de la frecuencia de prueba. Así, la sensibilidad a piezas de muy poco espesor, aumenta con la frecuencia. Por otro lado, se logra mayor sensibilidad para espesores relativamente grandes con valores de frecuencia menores. De esto último, se puede concluir que existe una frecuencia óptima para cada valor de determinado espesor que se quiera inspeccionar.

El comportamiento de la dependencia de la impedancia al espesor de la pieza se explica por el hecho de que la profundidad de penetración normalizada es inversamente proporcional a la conductividad, frecuencia y permeabilidad magnética, como se observa en la ecuación 4.3. Una vez que el espesor del material supera el valor de 3δ , la técnica es poco sensible a mayores incrementos del espesor.

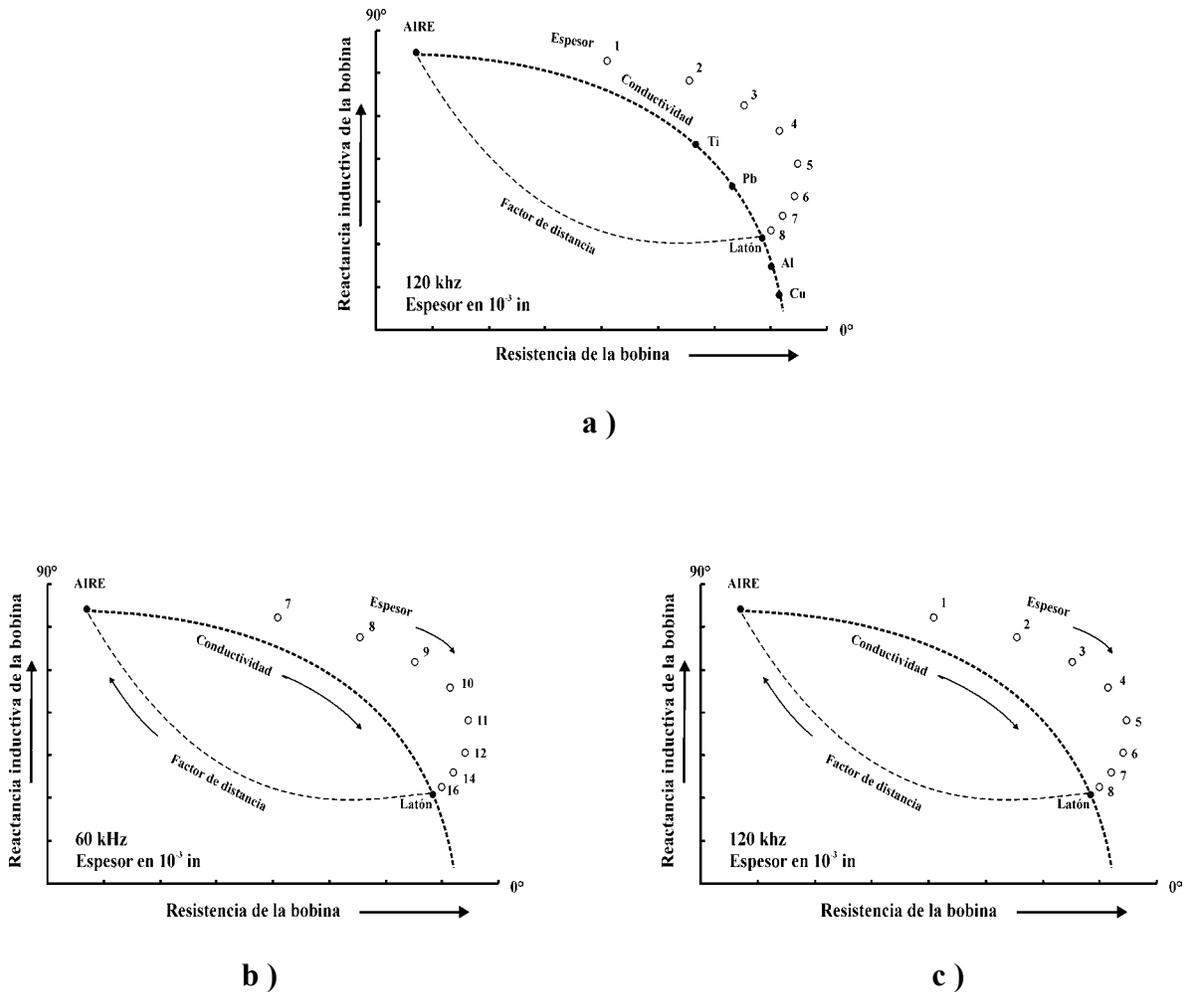


Figura 4.25
Efecto del espesor sobre la conductividad y el factor de distancia;
a) latón; b) y c) comparación de dos frecuencias para el latón

4.3.4 Frecuencia de operación o trabajo

Como se ha analizado, la frecuencia tiene una influencia significativa en la inspección por corrientes Eddy, con valores típicos de inspección que van de 200 Hz a más de 6 MHz. Por lo general, la selección de la frecuencia para un caso específico implica determinado compromiso con alguna de las variables de inspección; así, por ejemplo, la profundidad de penetración aumenta a medida que la frecuencia disminuye; pero por el contrario, la sensibilidad se reduce. Mientras que para la detección de grietas superficiales en materiales no ferromagnéticos se sugieren altas frecuencias (~5 MHz); para materiales ferromagnéticos se requieren frecuencias menores (~1 MHz). Por lo general, el criterio es utilizar la frecuencia más alta posible, pero consistente con la capacidad de penetración requerida.

Las técnicas que utilizan múltiples frecuencias (dos o más frecuencias simultáneas), permiten mayor versatilidad en las inspecciones para evaluar al mismo tiempo varios parámetros, separando la influencia de cada uno (espesor, factor de distancia, cambios dimensionales, etc), de manera sistemática y ordenada. En ocasiones, el uso de filtros variables es muy común para facilitar las inspecciones por corrientes Eddy.

4.3.5 Aplicaciones de las corrientes Eddy

El hecho de que las técnicas de inspección por corrientes inducidas o corrientes Eddy, sean muy sensibles a varios parámetros, propone una gran variedad de aplicaciones. El criterio general es que cualquier factor que afecte el flujo de corriente inducida puede ser evaluado. Algunos de los ejemplos más comunes se mencionan a continuación.

Conductividad eléctrica

La sensibilidad de las corrientes Eddy a la conductividad del material, permite su uso para evaluar aleaciones o composiciones de los diferentes materiales. Igualmente se detectan zonas afectadas por esfuerzos residuales, comparar tratamientos térmicos, o medir dureza. De igual forma, a través de la conductividad se obtienen espesores, tanto de recubrimientos metálicos, como de pinturas.

Permeabilidad magnética

La sensibilidad a la permeabilidad magnética puede ser utilizada para evaluar aleaciones y tratamientos térmicos de materiales magnéticos, medir espesores de capas endurecidas por tratamientos superficiales o para medir espesores de recubrimientos metálicos.

Homogeneidad geométrica y del material

Para placas delgadas se miden espesores a través del efecto de pantalla. De igual forma, variaciones o no homogeneidades en el material, como grietas, segregaciones, inclusiones, picaduras por corrosión, etc, pueden detectarse con las corrientes Eddy.

Acoplamiento magnético

Con los factores de distancia o relleno es factible medir el grado de acoplamiento magnético que se tienen con los materiales para, indirectamente conocer los espesores o recubrimientos de materiales no metálicos o aislantes. Esto mismo puede emplearse en sensores de proximidad, mediciones de diámetros, y determinar el espaciamiento entre placas metálicas.

4.3.6 Ventajas y limitaciones de las técnicas EC

En forma sintética, se puede decir que este tipo de técnica tiene las siguientes ventajas:

- + Es sensible a muchas variables físicas y metalúrgicas, por lo que tiene una amplia variedad de aplicaciones
- + Es una técnica de “no contacto”
- + Proporciona una evaluación instantánea
- + Es portátil
- + Es útil para evaluaciones detalladas o para pruebas “pasa/no pasa”
- + Se aplica para detectar defectos superficiales o muy cercanos a la superficie
- + No requiere preparación superficial, y se puede emplear sobre recubrimientos y pinturas

Las limitaciones mas importantes que se deben tener en cuenta son:

- El material del espécimen debe ser conductor
- Se debe tener acceso a la superficie que se quiere inspeccionar
- Se detectan defectos a profundidades de hasta 6,35 mm (¼ in)
- El inspector debe estar capacitado, y tener experiencia para manejar todas las variables que intervienen
- Los materiales ferromagnéticos pueden presentar problemas, o las superficies rugosas
- Para inspeccionar grandes áreas se requiere mucho tiempo

4.4 Partículas magnéticas (MT)

Las técnicas de inspección por partículas magnéticas (MT) son un subconjunto específico de las técnicas de inspección basadas en el magnetismo. En este caso, una pieza ferromagnética se magnetiza empleando magnetos, o induciendo una corriente eléctrica para que a través de la “observación” del campo magnético se puedan identificar alteraciones en éste, y que a su vez son ocasionadas por la presencia de anomalías: grietas o defectos superficiales, o casi superficiales en la pieza.

Existen varias maneras de observar el campo magnético, pero la más común es mediante las llamadas “partículas magnéticas”, o sea pequeñas partículas que se orientan con el campo magnético y, por ende, con las variaciones o alteraciones del mismo. Hay una gran variedad de partículas magnéticas que se aplican en ambiente seco o húmedo; son de diferentes colores e inclusive, fluorescentes. Además de las partículas magnéticas, se utilizan para hacer “visible” el campo magnético sensores que incluyen pinturas, hules, impresiones, o laminillas magnéticas.

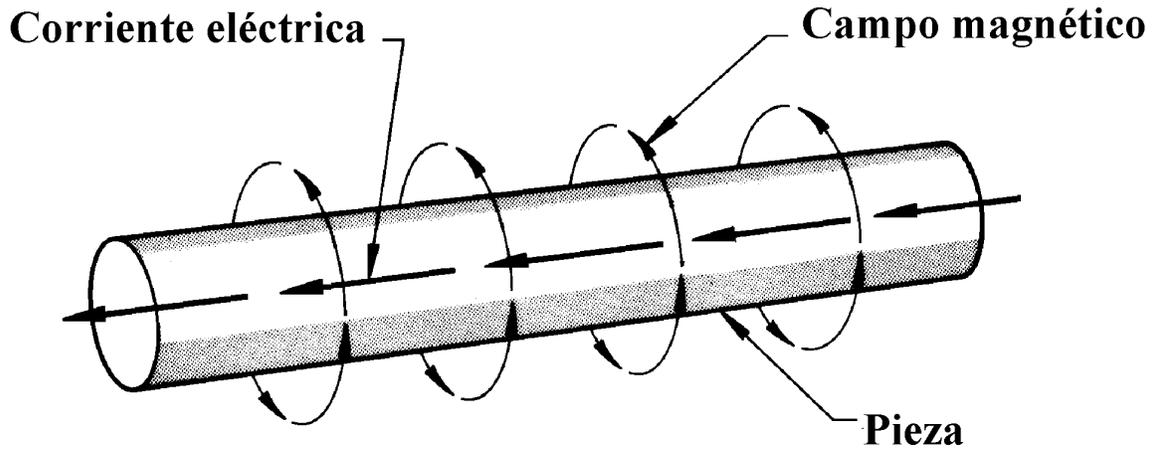
4.4.1 Principios básicos del magnetismo

La teoría del ferromagnetismo se basa en el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld^[20], en el que la partícula magnética más elemental es un electrón que gira sobre su propio eje. En su giro, por tener carga eléctrica genera un momento magnético cuya polaridad se determina por la dirección del giro, y al que se le llama *spin*. Cuando dos electrones giran en direcciones diferentes o *spines* distintos, tienen polaridades contrarias; por tanto, el momento magnético total es cero. Esto último ocurre con los materiales no magnéticos; en cambio, los ferromagnéticos poseen un *spin* no compensado que produce a nivel atómico un momento magnético diferente a cero.

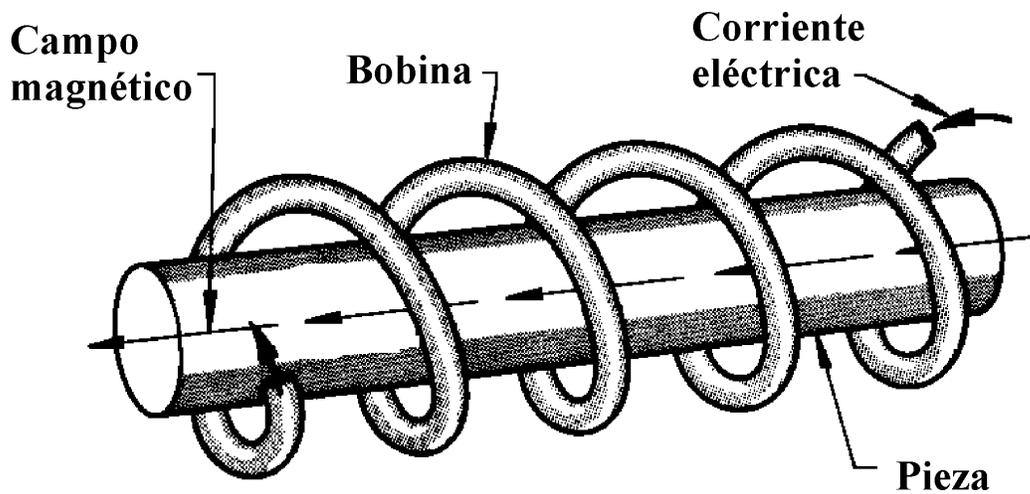
A nivel macroscópico, por lo general los materiales ferromagnéticos tienen un momento magnético cero, ya que cada átomo se orienta en forma aleatoria y la polaridad de uno se cancela con alguno otro. Sin embargo, por pequeñas zonas o regiones, en algunos materiales es posible que los átomos se orienten en una misma dirección, generando un momento magnético. De igual manera, un campo magnético externo llega a forzar la orientación de los átomos para tener un momento magnético residual en el material, aun cuando la fuerza magnética haya sido retirada.

En 1919, Barkhausen demostró que el magnetismo es un proceso discontinuo en el que la magnetización del material se da en pasos repentinos a medida que se aumenta la magnitud de un campo magnético externo. Este comportamiento se aprovecha para desarrollar una metodología de inspección no destructiva muy específica, y que se describe en la referencia 10.

Cuando la magnetización de un material se produce a causa de una corriente eléctrica, se denomina proceso electromagnético. En la figura 4.26a, se aprecia que se produce un campo magnético cuando una corriente fluye por un conductor y, de manera análoga, un campo magnético externo genera una corriente en el conductor (figura 4.26b).



a) Campo magnético externo a la pieza



b) Campo magnético interno a la pieza

Figura 4.26

Métodos de magnetización; a) la corriente eléctrica fluye por la barra metálica para generar el campo magnético; b) la corriente eléctrica en una bobina externa produce el campo magnético en la pieza

La densidad del flujo y la intensidad del campo magnético se relacionan a través de la permeabilidad magnética del material, mediante la ecuación:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4.8)$$

Donde, H es la fuerza de magnetización o intensidad del campo magnético; B la densidad del flujo magnético, y μ la permeabilidad del material, que es una medida de la capacidad de magnetización del mismo.

Se puede afirmar que los circuitos magnéticos y eléctricos son análogos. El eléctrico se rige por la ley de Ohm, definida por la ecuación 4.9, que relaciona la corriente eléctrica I , con el voltaje E , y la resistencia eléctrica R .

$$I = \frac{E}{R} \quad (4.9)$$

La correspondiente relación para los circuitos magnéticos está dada por la ecuación 4.10:

$$B = \frac{H}{R'} \quad (4.10)$$

Donde R' es la reluctancia ($=1/\mu$).

Ambas expresiones (4.9 y 4.10), relacionan la “fuerza” (E ó H) con el flujo de “energía” (I ó B) y la “resistencia al flujo” (R ó R'). Nótese que R y R' son inversamente proporcionales a la conductividad eléctrica y a la permeabilidad magnética, respectivamente.

El término “líneas de campo” es frecuentemente utilizado para identificar indistintamente las líneas de densidad de flujo, B , o el campo magnético, H . En materiales no magnéticos o en el vacío, las líneas de flujo y las del campo magnético coinciden totalmente. En la figura 4.27 se muestran los campos magnéticos producidos por imanes; nótese como las discontinuidades en el circuito magnético conllevan a perturbaciones en el campo magnético (conocidas también como fugas de flujo magnético). La medición de respectivas perturbaciones y su relación con las anomalías o defectos, son el fundamento para la inspección no destructiva por partículas magnéticas (figura 4.28).

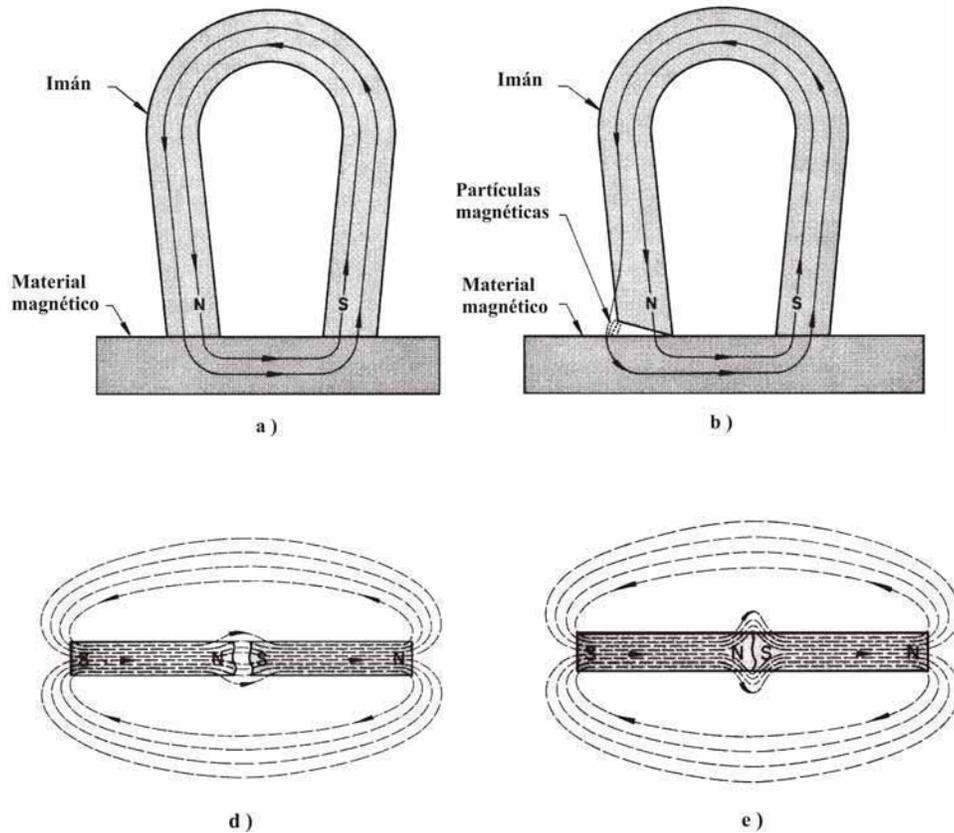


Figura 4.27
Diagramas esquemáticos de las líneas de campo magnético en diferentes tipos de imanes. Nótese la alteración de las líneas de campo ante discontinuidades

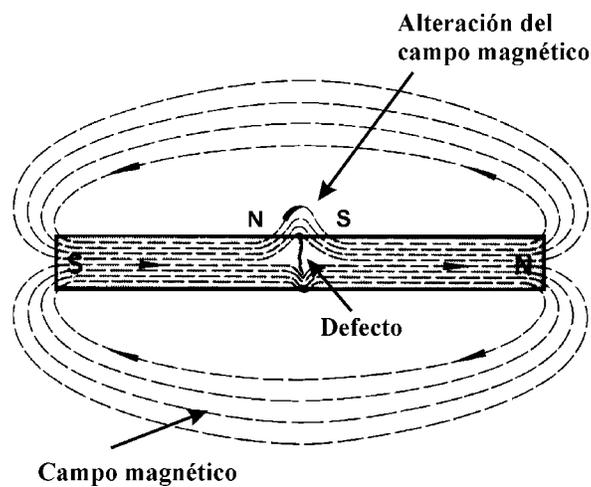


Figura 4.28
Esquema que muestra el comportamiento del campo magnético ante un defecto o anomalía superficial

4.4.2 Generación del campo magnético

Como ya se indicó, las perturbaciones en el campo magnético se deben a la presencia de defectos o anomalías en el material que se inspecciona. Así, un aspecto importante es determinar cómo se induce y orienta el campo magnético en la pieza, ya que de esto dependerá la sensibilidad de detección de las anomalías.

Existen dos formas de inspección según se aplique el campo magnético; la forma continua, en la cual el campo magnético se mantiene constante en la inspección; y el método por campo residual, que consiste en aplicar un campo magnético y después de que se retira, se mide la magnetización residual en el material. Este segundo método se aplica en materiales que tienen alta capacidad para retención del campo magnético. Adicionalmente a la forma de aplicación del campo magnético, en algunos casos es necesario un proceso de desmagnetización después de concluida la inspección. A continuación se detallan los métodos de magnetización más utilizados en la inspección no destructiva.

4.4.2.1 Yugos

Una pieza que se va a inspeccionar mediante partículas magnéticas se puede magnetizar con un magneto denominado yugo; al colocarlo sobre un área uniforme, se genera un campo magnético cuyas líneas conectan los dos polos del magneto, y como el yugo se puede girar, es posible tener diferentes orientaciones del campo magnético sobre una misma superficie.

Cuando un defecto está orientado en dirección de las líneas del campo magnético, produce una perturbación difícil de observar; por el contrario, cuando se orienta perpendicularmente, la perturbación es significativa y resulta fácilmente observable. Por tanto, el empleo de yugos desarrolla procedimientos de inspección muy versátiles, principalmente por la posibilidad de modificar la orientación del campo magnético. En estos casos, la limitante más importante es el tamaño del área que se quiere inspeccionar, particularmente si la pieza es muy grande.

Existen dos tipos de yugos: los electroimanes y los imanes permanentes. Los permanentes tienen la forma de herradura, y no requieren energía externa para trabajar, por lo que pueden ser usados cuando no se tiene acceso a una conexión eléctrica. Los imanes permanentes no son capaces de cubrir grandes áreas; son de baja potencia y no varía la intensidad del campo magnético. En algunos casos, separar el imán de la pieza inspeccionada resulta ser un problema y es común que pequeñas partículas magnéticas se queden adheridas al yugo después de que se termine una inspección, causando problemas de limpieza.

Los electroimanes son yugos de hierro en forma de herradura que se envuelven con una bobina eléctrica para inducirle el campo magnético. En este caso, el tamaño del yugo suele ser variable y utilizarse con corriente alterna o directa,

según convenga en la inspección. Como regla general, la corriente directa proporciona mayor capacidad de penetración en el material; en tanto que la corriente directa concentra el flujo del campo magnético sobre la superficie. Los electroimanes tienen la ventaja de que se pueden encender y apagar, así como variar la intensidad del campo magnético con cambios en la corriente eléctrica, y su orientación también puede cambiar; además, no se afecta la pieza inspeccionada ya que la corriente eléctrica no se aplica directamente a ésta. Cuando la pieza queda magnetizada después de una inspección, se puede utilizar un yugo de corriente alterna y desmagnetizarla. La mayor desventaja es su poca capacidad de penetración al material, y la inspección de piezas grandes que llega a ser un proceso lento.

4.4.2.2 Bobinas

Pueden usarse bobinas electromagnéticas para producir en una pieza colocada en su interior, un campo magnético longitudinal a lo largo del eje de la misma bobina. La magnitud de la corriente eléctrica en la bobina determina la intensidad del campo magnético que es proporcional a la corriente, I , y al número de espiras de la bobina, N . Nótese que para obtener la mayor sensibilidad de detección, un defecto debe estar orientado perpendicular a la dirección del campo magnético, es decir al eje de la bobina.

La intensidad del campo magnético depende de la longitud, L , y el diámetro, D , de la pieza inspeccionada. Una relación empírica para determinar la intensidad de corriente para una adecuada inspección no destructiva se determina por la ecuación:

$$NI = \frac{45000}{(L/D)} \quad (4.11)$$

La cual se aplica cuando la pieza queda totalmente dentro de la bobina y si la relación $L/D \geq 10$. Cuando $L/D < 10$, hay un efecto de desmagnetización en los extremos, por lo que es conveniente considerar bobinas de mayor longitud.

Las bobinas son una forma muy simple para inducir y controlar el campo magnético sobre una pieza que se va a inspeccionar, y no involucra contacto directo con la misma. Como desventaja está que es necesario que la pieza se ubique en el centro de la bobina para asegurar la uniformidad del campo magnético. Con piezas de geometría variable o con formas complejas el centrado no es posible y se requiere de ajustes en la bobina. Como ya se comentó, la relación longitud/diámetro puede ser un problema en piezas pequeñas.

4.4.2.3 Conductores centrales

Cuando se van a inspeccionar tubos, anillos o piezas con agujeros, el campo magnético se puede inducir mediante una corriente eléctrica (directa o alterna) que

fluye a través de un conductor que pase por el centro del tubo, anillo o agujero. En este caso, la intensidad del campo magnético es inversamente proporcional a la distancia del objeto al eje del conductor (figura 4.29).

En dicha figura se muestra cómo la intensidad del campo magnético es mayor en el interior de la sección tubular o anular, por lo que este método tiene mayor sensibilidad para la inspección de interiores. De igual forma, se logra mayor sensibilidad en una región del anillo si el conductor se aproxima a la misma (figura 4.30). En este segundo caso, el campo magnético no es uniforme y si es necesario inspeccionar todo el anillo, hay que rotarlo 360°.

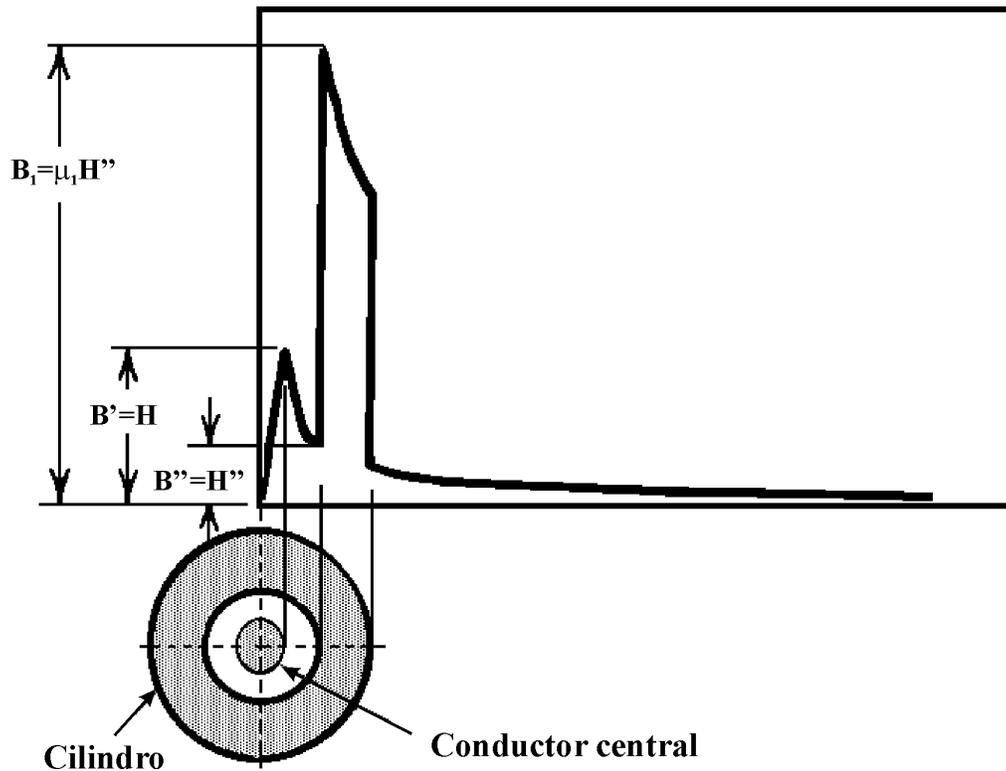


Figura 4.29
Intensidad del flujo magnético como función de la distancia radial al eje del conductor con corriente directa

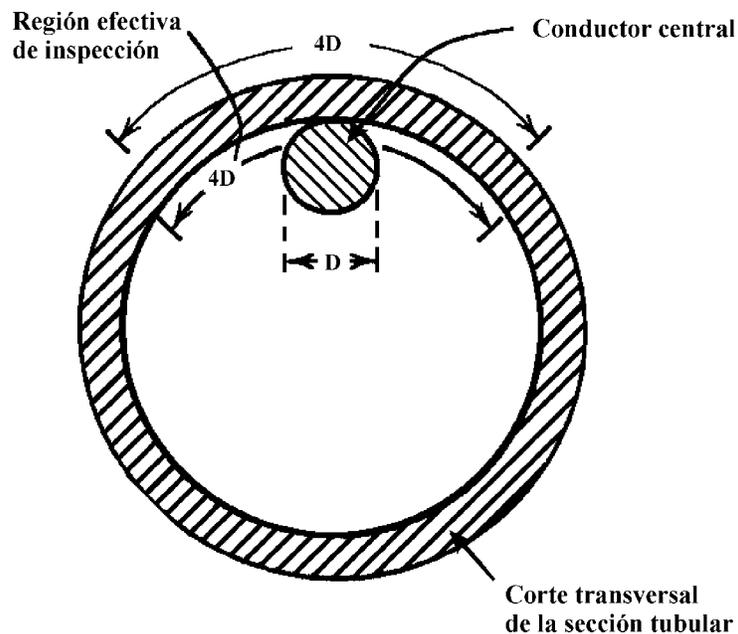


Figura 4.30
Esquema indicando la zona efectiva de inspección cuando se desplaza del centro el conductor central

La mayor ventaja que se obtiene con los conductores centrales es que no hay contacto directo con la pieza inspeccionada, con lo que se reduce el riesgo de dañarla con un impacto o una chispa por descarga eléctrica. Aunque con esta técnica se consigue una alta sensibilidad para identificar anomalías en superficies internas, en superficies externas no es así y el método tampoco es sensible a defectos cuya orientación sea paralela al eje del conductor central. Otro inconveniente es que el conductor debe tener capacidad de permitir el flujo de corriente eléctrica que se requiere para generar un campo magnético con la intensidad necesaria de inspección, que por lo general, debe ser muy grande.

4.4.2.4 Contacto directo

Para generar el campo magnético es posible aplicar directamente la corriente eléctrica a la pieza que se va a inspeccionar. En estos casos, la pieza se fija a los contactos eléctricos en ambos extremos para magnetizarla toda ella, aunque la uniformidad del campo magnético depende de su forma. Una ventaja del procedimiento es que la inspección suele ser rápida.

Las desventajas de utilizar el contacto directo es la alta corriente eléctrica que se debe aplicar (8000-20000 A de corriente directa). Dependiendo del tamaño de la pieza, se limita a defectos superficiales con orientación perpendicular a las líneas del campo magnético, y existe el riesgo de dañar la pieza con una chispa por descarga eléctrica.

4.4.2.5 Puntas de contacto

Cuando se emplean las puntas de contacto (figura 4.31), el campo magnético se induce a través de una corriente eléctrica que fluye por las puntas y el material inspeccionado. En este caso, el campo magnético forma círculos alrededor de los puntos de contacto, logrando mayor sensibilidad a discontinuidades que resultan perpendiculares a las líneas de campo magnético.

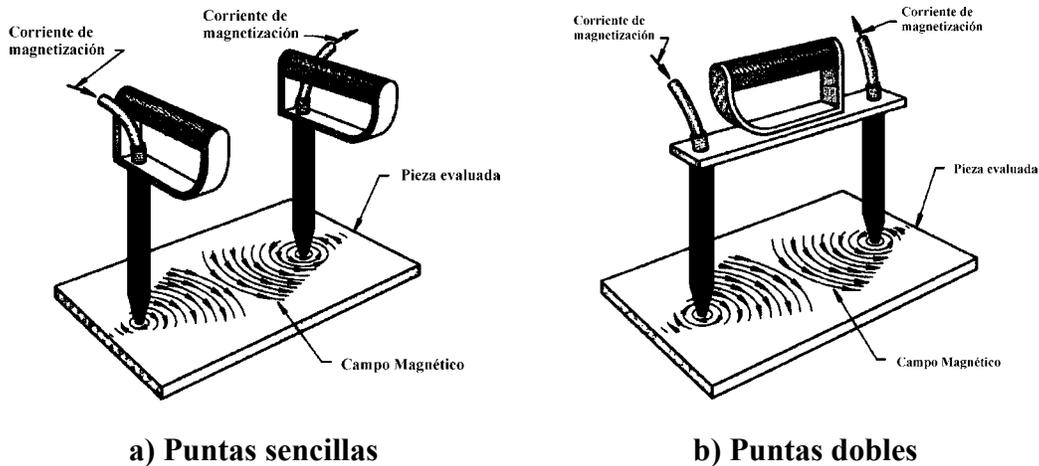


Figura 4.31

Tipos de puntas de contacto para inspección no destructiva por partículas magnéticas

Dichas puntas se emplean ampliamente gracias a su movilidad y fácil empleo para la inspección no destructiva de grandes estructuras y superficies. Adicionalmente, su versatilidad permite variar la magnitud y orientación del campo magnético, facilitando la detección de defectos, independientemente de su orientación o localización. En general, la distancia entre las puntas de contacto es menor de 0,3 m, lo que permite inspeccionar en un momento un área relativamente pequeña. Cuando es necesario inspeccionar grandes áreas, su uso suele consumir mucho tiempo. Otras desventajas son la interferencia del campo magnético que se puede producir por la corriente en el material, y el riesgo de daño al material por una chispa por descarga eléctrica.

4.4.2.6 Corriente inducida

En caso de inspeccionar piezas en forma de anillo, es factible recurrir a la técnica de partículas magnéticas, induciendo una corriente eléctrica a la pieza que a su vez produce un campo magnético. Para lograrlo se utiliza un anillo externo que genere un campo magnético primario mediante una corriente eléctrica de magnetización que fluye por el mismo (figura 4.32a). A su vez, el campo

magnético primario induce en la pieza que se va a inspeccionar una corriente eléctrica que provoca un campo magnético toroidal secundario (figura 4.32b). La homogeneidad del campo magnético secundario permite detectar los defectos en dirección circunferencial al anillo. Otra gran ventaja, es que no existe contacto eléctrico directo sobre la pieza, reduciendo el riesgo de daño.

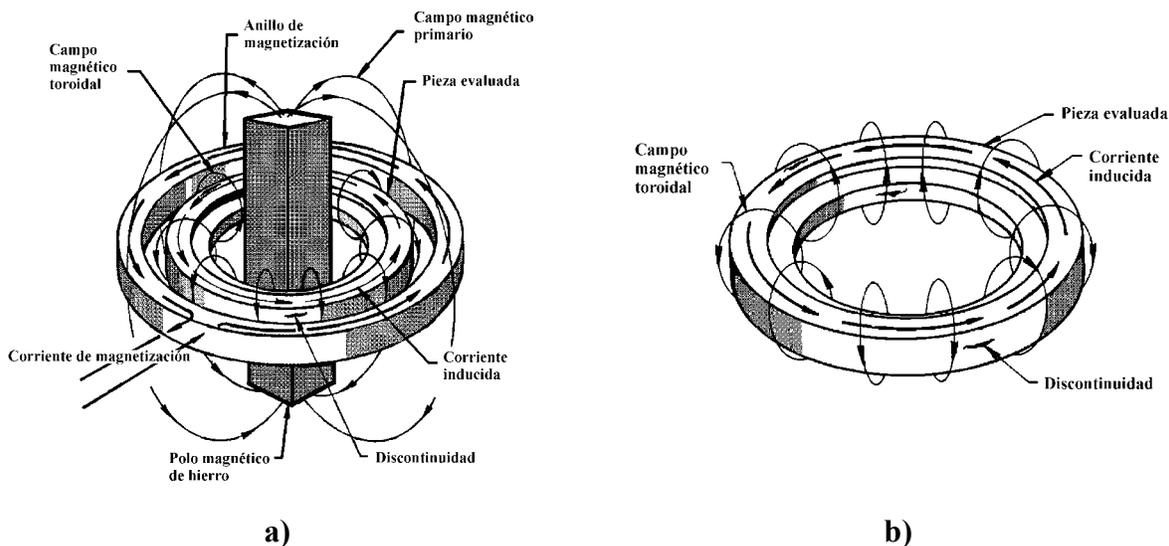


Figura 4.32
Método de inducción eléctrica para la magnetización de un anillo; a) forma de magnetización; b) corriente inducida, y campo magnético toroidal resultantes

4.4.3 Histéresis magnética y desmagnetización

Muchos materiales ferromagnéticos tienen la propiedad de mantenerse magnetizados después de suprimir el campo magnético externo que se utiliza para una inspección por partículas magnéticas. En muchos casos, el magnetismo residual representa un problema, y es necesario llevar a cabo un proceso de desmagnetización.

4.4.3.1 Histéresis magnética

Supóngase que una pieza de material magnético se somete gradualmente a un campo magnético externo, H , y durante el proceso se mide la densidad del flujo magnético, B , (figura 4.33). Inicialmente, la intensidad de B aumenta rápidamente a medida que se incrementa H , hasta alcanzar un valor de saturación a partir del cual ya no aumenta (figura 4.33a). En esta situación, se lleva a cero el valor de la fuerza de magnetización, H , por lo que la densidad de flujo magnético, B , disminuye, pero siguiendo un comportamiento diferente al inicial (curva ab , figura 4.33b). En el momento que se llega al valor de $H=0$, se tiene que un flujo

magnético residual, B_r . A medida en que sigue disminuyendo el valor de H (es decir, se aplica una H negativa), eventualmente el flujo magnético, B , llega a cero (punto **c**, figura 4.33c) con una fuerza magnética coercitiva, $-H_c$, diferente de cero y que es la que hace que la pieza quede desmagnetizada. Si continúa disminuyendo el valor de H , se logra un efecto de saturación negativa del flujo magnético, B , equivalente al que se obtuvo en el primer paso. Finalmente, si se incrementa nuevamente el valor de H hasta el valor máximo del paso inicial, se llega exactamente al mismo punto de saturación inicial (figura 4.33d).

El proceso cíclico en el que los valores de H varían en sentido positivo y negativo a los valores de saturación del flujo magnético, B , genera una curva de comportamiento llamado de histéresis (figura 46d), que es análogo al comportamiento cíclico esfuerzo-deformación encontrado en la fatiga de los materiales. Nótese que si la magnitud de H es lo suficientemente grande, la saturación de B ocurre para los valores pico de $\pm H$. Adicionalmente, el flujo magnético residual de $\pm B_r$, se presenta con $H=0$; y la fuerza coercitiva de magnetización $\pm H_c$ existe cuando $B=0$. El ancho del ciclo de histéresis magnética depende de la suavidad o dureza de los aceros; así, los aceros suaves tienen una histéresis angosta (figura 4.33e), y los duros una histéresis ancha. Este último comportamiento de la histéresis magnética, puede ser empleado para medir indirectamente la dureza del acero [22].

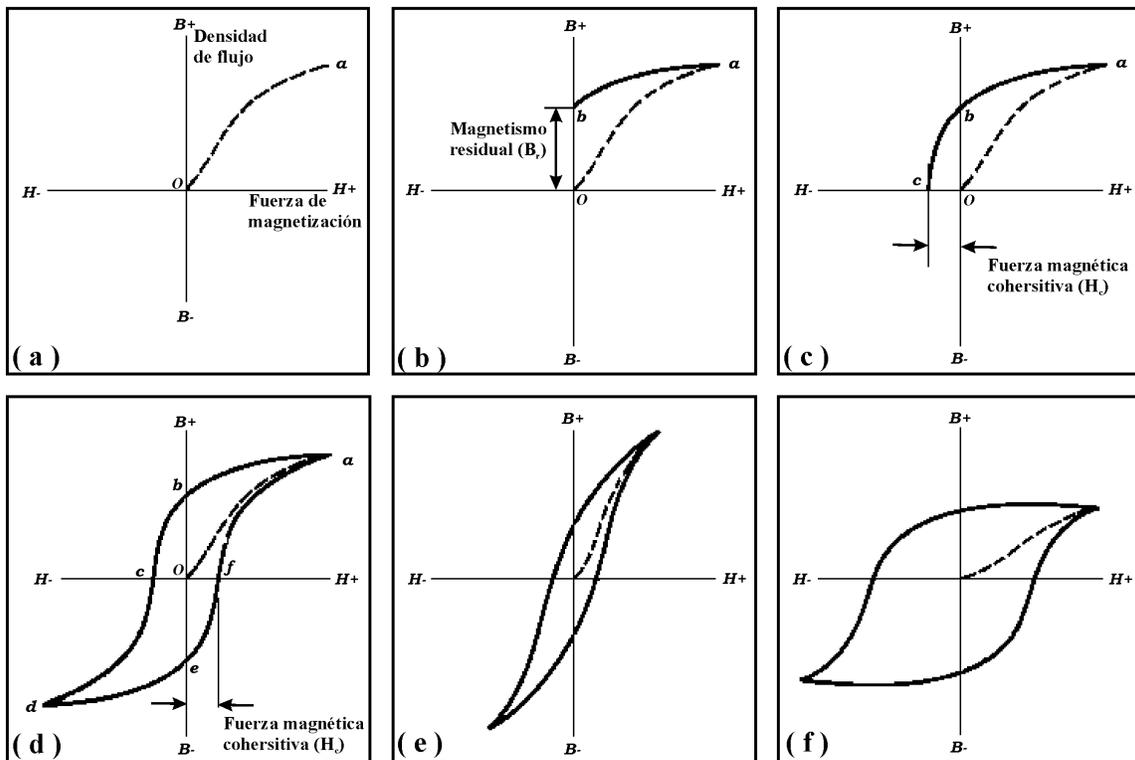


Figura 4.33
Curvas típicas de histéresis magnética

4.4.3.2 Desmagnetización

En algunos casos es necesario desmagnetizar una pieza después de que se le haya practicado una inspección por partículas magnéticas, como es generalmente el caso de los aceros de alta resistencia que tienen mayor retención magnética. Al respecto, el proceso adicional de desmagnetización representa un costo extra que debe ser considerado como parte de la inspección.

El proceso de desmagnetización es necesario cuando la magnetización residual afecta el desempeño de la pieza en servicio; por ejemplo, si se afecta el funcionamiento de sistemas electrónicos o se atraen partículas que atrapen orificios o causen desgaste excesivo con piezas que estén en contacto. Otro problema típico de la magnetización residual es cuando una pieza inspeccionada requiere un proceso de maquinado en el que el material removido se adhiere a la pieza, interfiriendo la operación de la maquinaria, provocando excesivo desgaste de las herramientas, o un acabado superficial defectuoso. Otros problemas son cuando la pieza inspeccionada se va a soldar o se le va a aplicar una capa de pintura, o algún tipo de recubrimiento. Finalmente, la magnetización residual puede afectar subsiguientes inspecciones no destructivas.

No siempre la desmagnetización es necesaria, pero siempre es necesario evaluar los posibles efectos que el campo magnético puede causar durante las subsecuentes etapas del proceso de fabricación, montaje, o puesta en servicio de la pieza. Así, por ejemplo, cuando a las piezas inspeccionadas se les aplica un proceso de tratamiento térmico, se puede evitar la desmagnetización si la temperatura excede al punto de Curie.

El proceso de desmagnetización es relativamente simple y se logra a través de aplicar una fuerza magnética, H , en forma cíclica decreciente hasta llevar el flujo magnético, B , a cero cuando $H=0$ (figura 4.34). En estos casos, el parámetro crítico es la frecuencia, la cual puede ser de 60 Hz en piezas pequeñas, pero a medida en que el tamaño aumenta, se recomiendan frecuencias más bajas. El campo magnético externo se aplica siguiendo los mismos procedimientos, o técnicas de magnetización ya discutidas anteriormente. Cabe mencionar que es muy difícil desmagnetizar totalmente una pieza con geometría irregular, por lo que en estos casos se debe considerar siempre una pequeña magnetización residual.

4.4.4 Detectores de la pérdida de flujo magnético

En las secciones anteriores, se ha descrito el principio básico del magnetismo para la inspección no destructiva; las técnicas y métodos de generación del campo magnético; el efecto de la magnetización residual, y la desmagnetización. Ahora, corresponde tratar las diferentes para “observar” o identificar las pérdidas de flujo magnético que los defectos, grietas o anomalías producen. En forma detallada se analizará el empleo de las partículas magnéticas, y se discutirán brevemente otras técnicas de detección visual y no visual.

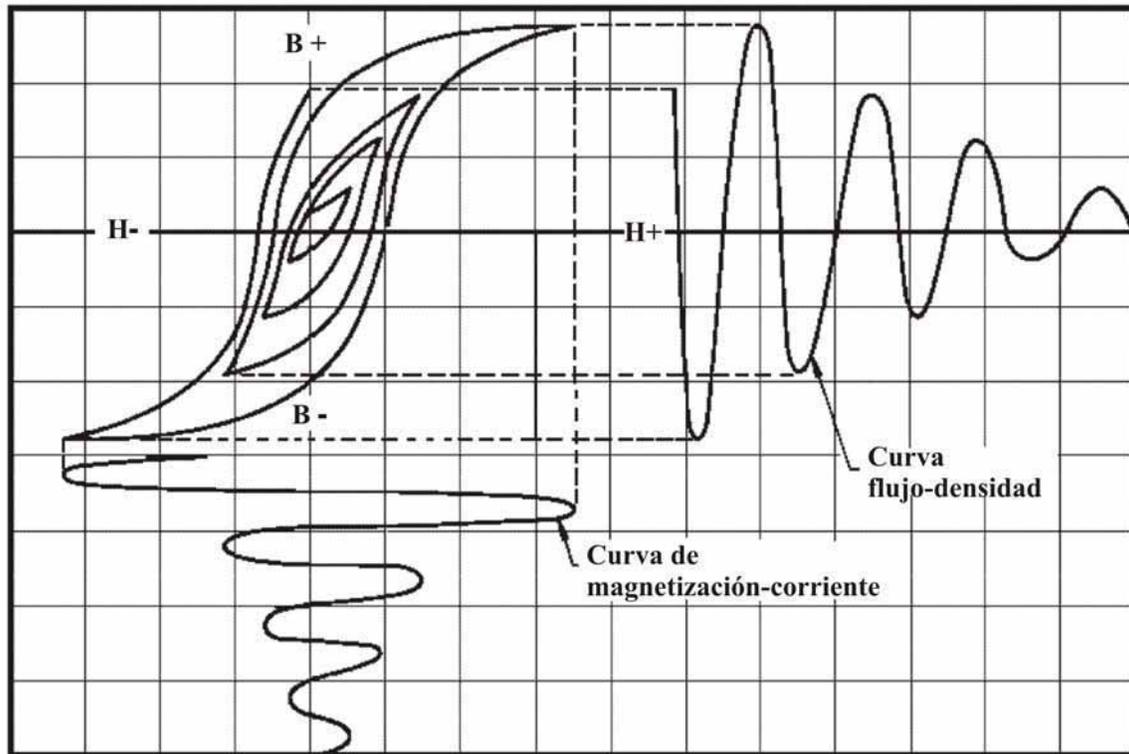


Figura 4.34
Proceso típico de desmagnetización

4.4.5 Partículas magnéticas

Esta técnica se considera como un método de detección visual, que esencialmente consiste en dispersar partículas magnéticas sobre la pieza en inspección para que se orienten en dirección del campo magnético. De esta forma, se hacen visibles las alteraciones o perturbaciones del campo magnético que producen. La aplicación de las partículas magnéticas se puede realizar en vía húmeda o seca, y para su observación pueden o no ser fluorescentes.

Las partículas deben ser ferromagnéticas con una alta permeabilidad magnética para ser sensibles a campos magnéticos de baja intensidad. De igual forma, deben tener baja retención magnética (magnetismo residual) para reutilizarse y no se adhieran a las piezas antes de que se les aplique el campo magnético.

El tamaño y forma de las partículas resultan de especial importancia ya que si son muy grandes, la sensibilidad al campo magnético se reduce; por el contrario, si son muy pequeñas, se pierde la capacidad para identificar las discontinuidades.

La mezcla ideal debe incluir partículas de formas globulares y alargadas, pues las de forma alargada se alinean en forma natural con la dirección del campo, con el inconveniente de que no fluyen fácilmente sobre la superficie del material. Por otro lado, las de forma globular fluyen fácilmente pero tienden a aglomerarse. Así también, se ha encontrado que las partículas globulares alargadas son una buena alternativa de selección.

Como las partículas deben ser visibles, su color y el contraste con el fondo son muy importantes. En este sentido, las partículas por vía seca tienen una muy amplia gama de colores que se seleccionan considerando el color de la pieza inspeccionada para encontrar un adecuado contraste. En el caso de las partículas para vía húmeda, su color se limita al negro y rojo óxido. Las fluorescentes se utilizan para aplicaciones vía húmeda o seca, aunque su aplicación es más común por vía húmeda.

Las partículas por vía seca son típicamente de 150 μm de tamaño, y se aplican con un sistema neumático para formar una pequeña nube con poca movilidad sobre la superficie de la pieza. Este tipo de partículas es muy sensible en superficies rugosas y para detectar defectos bajo la superficie, pero tienen poca sensibilidad a grietas muy finas. La mejor forma de aplicación es colocando la pieza en forma vertical para que la fuerza de gravedad facilite que éstas fluyan sobre la superficie de la misma, lo cual no se tiene si se hiciera en posición horizontal.

En contraparte, el tamaño típico de las partículas por vía húmeda es de 1 a 25 μm , siendo el tamaño promedio de 6 μm . Se aplican con diferentes tipos de líquidos como el agua o los destilados del petróleo. Aunque el uso de agua es de bajo costo, es necesario cuidar que no se establezca un contacto eléctrico a tierra a través de ésta. Si se aplica en tinajas de baño uniforme, se debe tener un sistema de agitación para mantener una mezcla uniforme, y es igualmente importante mantener al líquido libre de impurezas. Este tipo de partículas resultan adecuadas para detectar grietas muy finas y pequeñas, por ejemplo, las que se producen por fatiga. De igual manera poseen un mejor desempeño en superficies lisas, además de la ventaja de que se pueden aplicar en condiciones bajo el agua.

4.4.6 Otros detectores visuales

Si bien es cierto que las partículas magnéticas son el medio más común para la inspección no destructiva con estas técnicas, existen otros tipos de técnicas visuales de detección, los cuales se describirán brevemente.

Los hules magnéticos se utilizan para una impresión de las líneas del campo magnético, que se puede analizar después de concluida la inspección, e inclusive,

bajo un microscopio. Consiste en dispersar partículas magnéticas sobre la superficie de la pieza y cubrirla con hule hasta que endurezca; después de una hora aproximadamente, la capa se retira y se analiza. Como el hule tiende a contraerse, el análisis debe hacerse de forma casi inmediata, aunque en general se ha encontrado que esto puede llegar a ampliarse a 72 h después de que el hule se haya endurecido.

Los hules magnéticos tienen ventajas, como que proporcionan un registro permanente de la inspección, pueden inspeccionarse superficies con geometrías muy complejas, y son muy útiles cuando es necesario hacer ampliaciones de las zonas inspeccionadas. La principal desventaja es el tiempo que se requiere para aplicar la técnica.

Otro tipo de técnica es la pintura magnética, la cual tiene un color que contraste claramente con el de las partículas magnéticas que se encuentran en suspensión en ésta. Una vez que se magnetiza la pieza a inspeccionar, se aplica la pintura hasta que seque para proporcionar un registro que se puede mantener durante un tiempo razonable. Existen pinturas que no se secan y el viento o agentes externos llegan a alterar las observaciones. Las pinturas son muy buenas en aplicaciones en el campo, e inclusive bajo el agua, pero en muchos casos requieren una preparación superficial.

También existen las llamadas impresiones magnéticas, que es una forma de obtener registros permanentes o impresiones de una inspección. Consiste en un recubrimiento plástico de color blanco a la pieza para que luego se apliquen las partículas magnéticas secas sobre el recubrimiento. Posteriormente, se aplica una bobina plana que produce pulsaciones magnéticas para provocar impresiones de las partículas en el recubrimiento. Se ha encontrado que esta técnica es muy sensible a grietas muy pequeñas, pero su aplicación resulta ser compleja.

4.4.7 Otros detectores magnéticos

Adicionalmente a los detectores visuales están los magnéticos, que pueden medir las fugas de campo magnético ocasionadas por defectos, discontinuidades o grietas; sólo que con estos detectores no se observan directamente las líneas de campo magnético y, por ende, tampoco los defectos; sin embargo, se pueden ubicar los defectos e inferir su tamaño de acuerdo con la medición de la magnitud de la fuga del campo magnético. Existen dos tipos de detectores, los pasivos y los activos. Los pasivos son aquellos que por si mismos permiten la identificación del defecto, como es el caso de las impresiones magnéticas. En cambio, los activos requieren algún tipo de excitación externa adicional para funcionar.

Dentro de los detectores magnéticos se cuentan los llamados elementos de Hall, los magnetodiodos, las cintas magnéticas, las bobinas de inducción, y los microprobadores. Una descripción detallada de este tipo de detectores y técnicas, se encuentran en la referencia 10.

4.4.8 Ventajas y desventajas

Las ventajas más significativas en la técnica de inspección por partículas magnéticas son:

- + Se aplica a la inspección de piezas con geometría compleja
- + La técnica es relativamente portátil y de bajo costo
- + Es un método rápido y sencillo
- + Requiere poca capacitación, que se adquiere fácilmente
- + Es un método muy sensible a los defectos superficiales, o de poca profundidad
- + Se adapta a piezas pequeñas o grandes
- + Las indicaciones se producen inmediata y directamente en la superficie de la pieza inspeccionada, indicando el tamaño de los defectos

En contraparte, las limitaciones a las que un inspector se enfrenta son:

- Está limitada a la inspección de materiales ferromagnéticos
- Se debe tener acceso directo al componente que se desea inspeccionar
- La intensidad de corriente eléctrica es proporcional al tamaño de la pieza, por tanto, las inspecciones de piezas grandes utilizan mucha corriente
- En ocasiones es necesario desmagnetizar las piezas después de una inspección
- Está limitada a la inspección de defectos superficiales, o casi superficiales
- La rugosidad superficial puede ser causa de problemas
- Los acabados superficiales o recubrimientos deben ser removidos antes de la inspección
- La técnica es sensible a la orientación relativa entre el defecto y el campo magnético

5 Técnicas de inspección volumétrica

Como se planteó en el capítulo anterior, el objeto fundamental de las técnicas de inspección superficial es destacar en una forma u otra, los defectos o grietas superficiales para que sean visibles y detectables. Por el contrario, las técnicas volumétricas tienen como finalidad identificar y localizar defectos internos en el material de manera indirecta haciendo fluir energía (acústica, electromagnética, mecánica, etc) a través de la pieza que se quiere inspeccionar, y midiendo la respuesta que resulta de la interacción energía-defecto. Los cambios más comúnmente registrados son en intensidad y en tiempo, a partir de los cuales es posible localizar y estimar el tamaño de los defectos.

La energía aplicada puede ser de diferentes tipos, entre las cuales destaca el ultrasonido y los rayos X; cuyas técnicas se describirán en este capítulo. Otra más la de emisiones acústicas, que consiste en aplicar energía mecánica de deformación al material para que la concentración de esfuerzos en los defectos ocasione microgrietamientos, los cuales emiten energía acústica que se puede “escuchar”.

5.1 Inspección por ultrasonido

Es una de las técnicas de inspección no destructiva más poderosas, ya que permite localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes tipos de geometrías y materiales. En general, el procedimiento es relativamente sencillo, y no representa riesgo para el inspector o para el material. Existe una diversidad de técnicas que se pueden adaptar a cada aplicación en particular.

La inspección por ultrasonido mide en varios puntos el efecto del paso de las ondas acústicas de alta frecuencia a través del material de la pieza que se evalúa. Dicha propagación se controla electrónicamente por pulsos que un transductor convierte en energía acústica que se aplica en puntos específicos. Posteriormente, el mismo transductor u otro similar, recibe el reflejo de esa onda acústica y la convierte nuevamente en una señal eléctrica. La interpretación del reflejo de dicha onda sonora permite inferir información sobre discontinuidades en el material. Debido a que las ondas sonoras viajan en casi todos los materiales, esta técnica es una de las más empleadas en la identificación de defectos internos.

Típicamente, las frecuencias de inspección por ultrasonido son de 200 kHz a 25 MHz, que no son audibles para el ser humano por estar limitado a frecuencias entre 20 y 20,000 Hz. Por lo anterior, las ondas de ultrasonido no representan riesgo alguno para la salud del inspector, a diferencia de los rayos X que se considerarán adelante. Adicionalmente, como las señales acústicas de respuesta se convierten en señales electrónicas, existen muchas posibilidades de análisis mediante el procesamiento mismo de dichas señales.

Un ejemplo de la técnica pulso-eco de ultrasonido se encuentra en la figura 5.1. Si bien se discutirá más detalladamente, es importante destacar que la onda de ultrasonido reflejada se altera por la presencia de discontinuidades y ambas, la existencia y su localización, pueden determinarse. De igual forma, nótese que la mayor sensibilidad de detección se logra cuando la orientación del defecto es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, que resulta ser lo contrario a las técnicas de inspección por rayos X que se discutirán posteriormente.

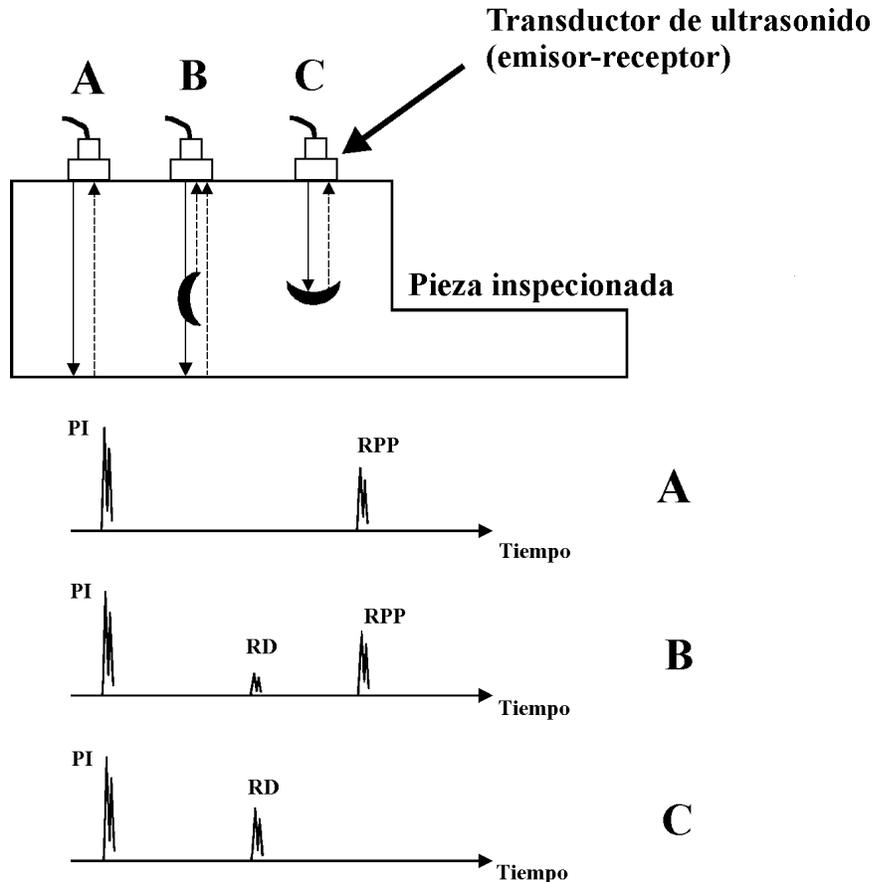


Figura 5.1

Representación esquemática de la inspección por ultrasonido.

A) Pulso inicial (PI), y reflejo de la parte posterior (RPP)

B) Pulso inicial, reflejo del defecto (RD), y reflejo de la parte posterior (el defecto deja pasar parcialmente la onda de ultrasonido)

C) Pulso inicial, y reflejo del defecto (el defecto no deja pasar la onda de Ultrasonido)

5.1.1 Propiedades de las ondas sonoras

Las ondas sonoras son vibraciones mecánicas que se propagan en casi todos los materiales. Su velocidad depende fundamentalmente de la densidad y las propiedades elásticas del medio en el que se propagan. Pueden ser reflejadas y refractadas, y ser enfocadas en zonas o puntos específicos. Las ondas de ultrasonido son generadas y detectadas generalmente por transductores piezoeléctricos que se acoplan a la pieza en inspección [10]. El efecto piezoeléctrico fue descubierto por Curie en 1880; consiste en la conversión de una señal eléctrica en mecánica y viceversa. De esta manera, un transductor piezoeléctrico convierte una señal eléctrica en una señal mecánica de alta frecuencia que se manda al material inspeccionado y; posteriormente, convierte la respuesta reflejada en una señal eléctrica con el mismo transductor.

La velocidad, V , a la que viaja el sonido depende de la longitud de onda, λ , y la frecuencia de vibración, f , y está dada por la siguiente relación:

$$V = \lambda f \quad (5.1)$$

Típicamente, para la evaluación no destructiva, la longitud de onda de una señal de ultrasonido es de 1 mm (comparada con la de la luz visible que es de 10^{-3} mm, y la de los rayos X que es de 10^{-6} a 10^{-9} mm). Las ondas sonoras se propagan en la materia en diferentes modos u ondas: longitudinal, transversal, superficial, ondas de Lamb, y ondas estáticas.

Ondas longitudinales

Las ondas sonoras longitudinales, también llamadas ondas de compresión, se propagan de tal manera que las moléculas del material vibran en forma paralela a la dirección de propagación (figura 5.2). Las ondas longitudinales son las más comunes en la IND y se presentan cuando el haz de ultrasonido penetra casi perpendicular a la superficie del objeto inspeccionado. Son fácilmente generadas y detectadas, y viajan a través de materiales sólidos, líquidos o gaseosos. La velocidad de las ondas de compresión V_c , en un medio suficientemente grande, está dada por la ecuación 5.2.

$$V_c = \left[\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

Donde:

V_c	=	velocidad de la onda de compresión
E	=	módulo de elasticidad del medio
ν	=	razón de Poisson del material
ρ	=	densidad del material

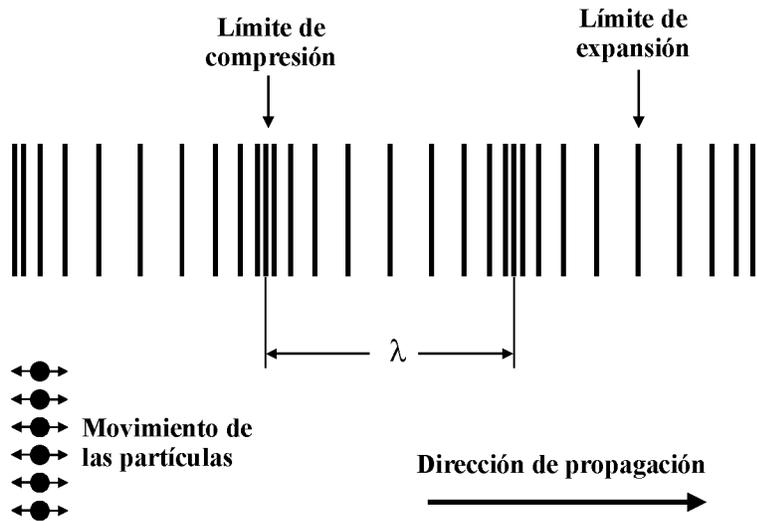


Figura 5.2
Esquema representativo de las ondas longitudinales o de compresión

La ecuación 5.2 supone que el medio es isotrópico y que la onda se propaga en un medio elástico infinito. En el caso de una barra delgada con un diámetro muy pequeño respecto a la longitud de onda, la velocidad de propagación de las ondas de compresión está dada por la ecuación 5.3.

$$V_c = \left[\frac{E}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

Ondas transversales

También llamadas cortantes, se propagan de manera que la vibración de las moléculas es perpendicular a la dirección de propagación de la (figura 5.3). Las ondas transversales son características de los materiales sólidos, pero pueden presentarse en líquidos de muy alta viscosidad; se forman cuando el sonido entra en la superficie del material con un ángulo moderado. La velocidad V_s de las ondas transversales, está dada por la ecuación:

$$V_s = \left[\frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5.4)$$

Donde G es el módulo de elasticidad cortante

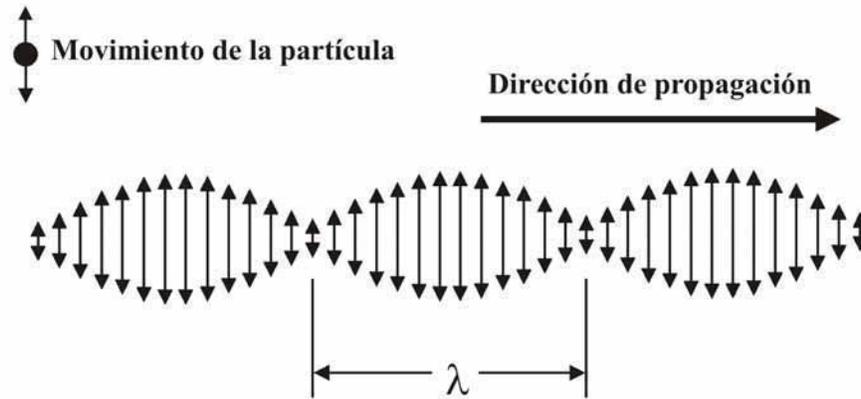


Figura 5.3
Representación esquemática de las ondas transversales o de corte

Nótese que en la ecuación 5.4, la velocidad de las ondas transversales es aproximadamente la mitad de la velocidad de las longitudinales (ecuación 5.3). Los valores típicos para las velocidades longitudinal y transversal de varios materiales configuran la tabla 5.1 ^[20]. Como la longitud de las ondas transversales son más pequeña que la de las longitudinales a determinada frecuencia, es más sensibles a defectos pequeños. Por lo anterior, las ondas transversales son más sensibles a la dispersión, y tienen una menor capacidad de penetración en los materiales.

Tabla 5.1
Velocidades del sonido longitudinal y transversal para diversos materiales

Material	Densidad relativa	Velocidad del sonido (m/s)	
		Longitudinal	Transversal
Aluminio	2,70	6 300	3 80
Acero	7,85	5 900	3 230
Magnesio	1,70	5 770	3 050
Cobre	8,90	4 700	2 260
Titanio	4,51	6 000	3 000
Polietileno	1,20	2 000	540
Plexiglás	1,18	2 700	1 300
Agua	1,00	1 490	---
Aire	---	344	---

Ondas superficiales

Las ondas superficiales o de Rayleigh se propagan en forma tal que el movimiento de las moléculas sigue un patrón elíptico manifestando ambos movimientos longitudinal y transversal (figura 5.4). Las ondas superficiales se presentan cuando el haz de sonido incide en el sólido con un ángulo muy inclinado, y su velocidad de propagación es aproximadamente el 90% de la velocidad de propagación transversal.

Las ondas de Rayleigh viajan prácticamente sobre la superficie del material, y su energía decrece muy rápidamente hacia el interior de la pieza, siendo cero a una distancia dos veces la longitud de onda (2λ) bajo la superficie. A pesar de que las ondas superficiales se desplazan por contornos circulares y alrededor de curvaturas, se reflejan en la presencia de esquinas. Una característica muy importante de esas ondas es que son muy sensibles a los cambios de dureza; esfuerzo residual; recubrimientos; grietas superficiales, e impurezas presentes en la superficie de la pieza.

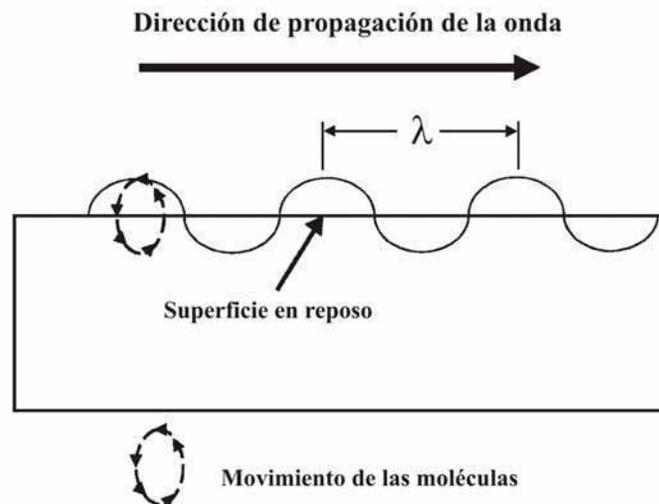


Figura 5.4

Esquema representativo de las ondas superficiales cuya característica fundamental, es que prácticamente viajan sobre la superficie del material. Nótese el movimiento elíptico compuesto de ondas transversales y longitudinales

Ondas de Lamb

Las ondas de Lamb, también conocidas como ondas guiadas u ondas de placa, son una combinación de ondas transversales y longitudinales que concurren sólo en placas muy delgadas (del orden de varias longitudes de onda del sonido). Su comportamiento depende de la densidad del material, y de sus propiedades: elástica, de la geometría de la placa, su espesor y la frecuencia del ultrasonido.

Las ondas de Lamb son altamente dispersivas y son de dos tipos: simétricas (dilatación), o antisimétricas (flexión), como se muestra en la figura 5.5. Las ondas de Lamb se pueden propagar a varias velocidades en determinado material, y son particularmente útiles para detectar laminaciones o la separación de placas en metales y materiales compuestos.

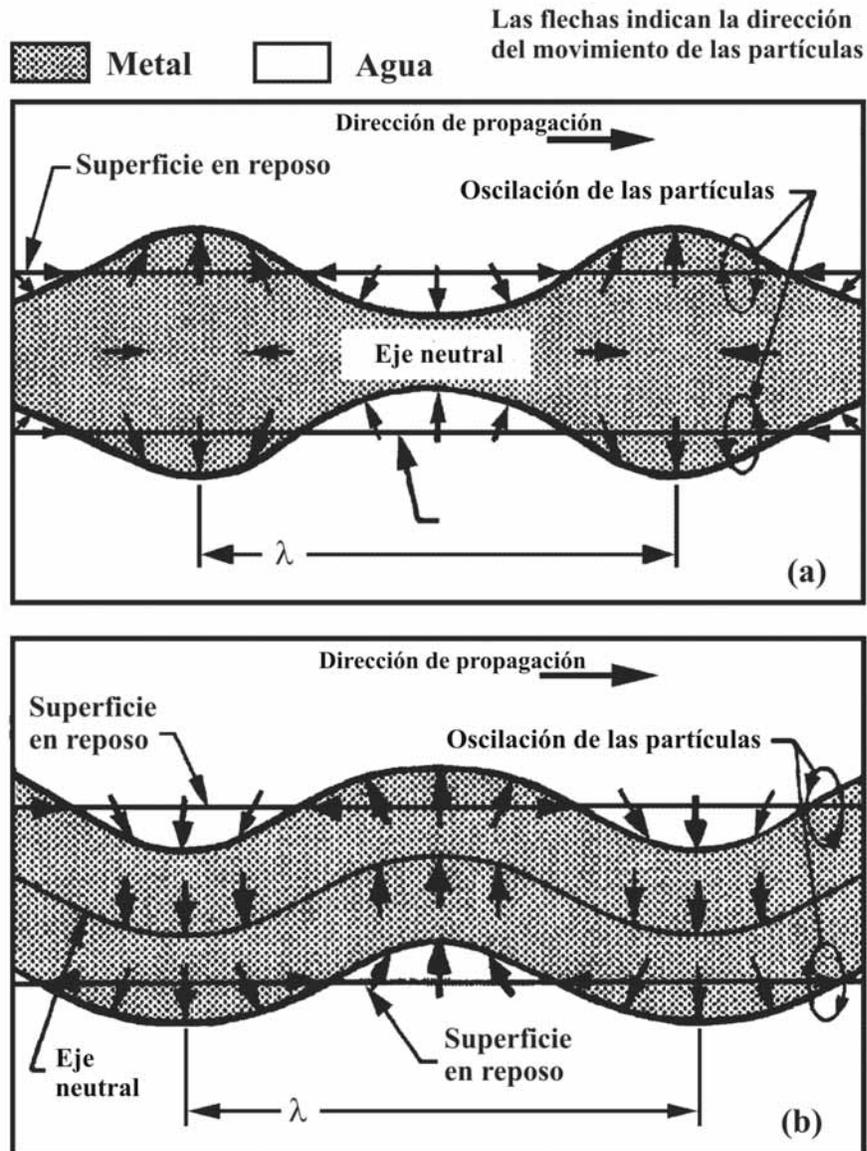


Figura 5.5
Esquema de las ondas de Lamb
 a) Simétricas o de dilatación
 b) Antisimétricas o de flexión

Ondas estacionarias

Las ondas estacionarias resultan de la interferencia de unas ondas con otras que tienen la misma frecuencia con diferente origen y dirección de propagación. Bajo ciertas circunstancias, es posible que las partículas se mantengan en reposo una vez que interfieren las ondas, produciendo nodos estacionarios. Como el análisis de estas ondas estacionarias puede ser muy complejo, ya que comprende fenómenos de propagación de ondas continuas e interferencia, la evaluación no destructiva con estas ondas se aplica con pulsos cortos de ultrasonido. La figura 5.6 muestra la formación de ondas estacionarias como resultado de la interferencia de una onda incidente y otra reflejada.

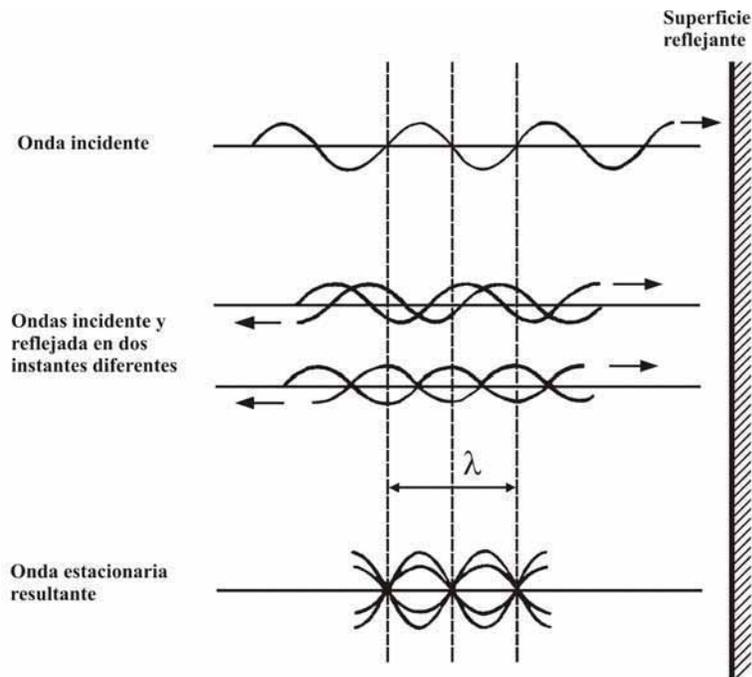


Figura 5.6

Formación de ondas estacionarias por efecto de la interferencia de una onda incidente, con su correspondiente onda reflejada

5.1.2 Interacción con las fronteras

La evaluación no destructiva mediante las técnicas de ultrasonido se basan en la interpretación de las ondas de ultrasonido que se reciben después de que el pulso emitido se refleja, y refracta en las fronteras y discontinuidades del material inspeccionado. Por tanto, es muy importante describir la forma en que interactúan las ondas de ultrasonido con dichas fronteras y discontinuidades para dar una adecuada interpretación de lo medido.

5.1.2.1 Impedancia acústica

La impedancia acústica específica, Z , está dada por la ecuación 5.5.

$$Z = \rho V \quad (5.5)$$

Donde ρ es la densidad del material, y V la velocidad del sonido.

Cuando una onda sonora choca con la frontera superficial de dos materiales, el porcentaje de energía transmitida, E_t , y la energía reflejada, E_r , están dadas por las ecuaciones 5.6 y 5.7.

$$\% \text{ de energía transmitida} \quad E_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \times 100 \quad (5.6)$$

$$\% \text{ de energía reflejada} \quad E_r = \left[\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right]^2 \times 100 \quad (5.7)$$

Aquí, Z_1 y Z_2 representan las impedancias de los materiales 1 y 2, y que se calculan con la ecuación 5.5. Las expresiones 5.6 y 5.7 son válidas cuando la onda acústica, ya sea transversal o longitudinal, incide en dirección normal a la frontera del material. Debido a que las ondas transversales no ocurren en un medio líquido o gaseoso, el 100% de la energía acústica se refleja en una frontera sólido/líquido, o sólido/gas. La tabla 5.2 presenta los valores típicos de la densidad relativa, velocidades del sonido para las ondas de compresión, y las impedancias acústicas para varios materiales.

Tabla 5.2
Impedancias acústicas para las ondas de compresión de varios materiales

Material	ρ	V_c (m/s)	$Z=\rho V$
Agua	1,00	1 490	1 490
Acero	7,85	5 900	46 315
Aire	0,00	344	0
Aluminio	2,70	6 300	17 010
Plexiglás	1,18	2 700	3 186

Como se mostrará adelante, para los materiales que más comúnmente se inspeccionan, las impedancias acústicas se emplean para calcular la energía acústica de transmisión o reflexión en las fronteras o interfases.

Interfase acero/agua

De acuerdo con las ecuaciones 5.6 y 5.7, la energía transmitida, E_t , y reflejada, E_r , en una interfase acero/agua son las siguientes:

$$E_t = \frac{4(46315)(1490)}{(46315+1490)^2} \times 100\% = 12,1\%$$

$$E_r = \left(\frac{46315-1490}{46315+1490} \right)^2 \times 100\% = 87,9\%$$

Otros casos de interés se incluyen en la tabla 5.3. Nótese que en la interfase metal/aire existe una reflexión total del 100%, mientras que la transmisión total de 100% resulta cuando la interfase es del mismo material. La interfase agua/metal son de particular interés, ya que es la que se presenta en las técnicas de inspección por inmersión. Obsérvese que en condiciones ideales, sólo el 12,1% de la energía acústica es transmitida en la frontera agua/acero, y únicamente el 29,6% para el caso de agua/aluminio.

La interfase plexiglás/metal aparece típicamente en las técnicas por contacto cuando el transductor se encapsula. En estos casos, la energía de transmisión ideal es mayor que en la interfase agua/metal (24,1% para el acero, y 53,2% para el aluminio); sin embargo, tales valores raramente se obtienen en la práctica por la rugosidad de los materiales. En este último caso, para mejorar las condiciones de prueba se recomienda el uso de fluidos acopladores (normalmente aceites) para asegurar un mejor contacto acústico entre el transductor y la superficie de prueba.

Tabla 5.3
Energía acústica de transmisión y reflexión para diferentes tipos de interfase con incidencia normal

Interfase	Energía transmitida	Energía reflejada
Acero/agua	12,1 %	87,9 %
Aluminio/agua	29,6 %	70,4 %
Acero/plexiglás	24,1 %	75,9 %
Aluminio/plexiglás	53,2 %	46,8 %
Acero/aire	0 %	100 %
Acero/acero	100 %	0 %

5.1.2.2 Incidencia oblicua

Mientras que en la sección anterior se consideraron las energías acústicas de transmisión y reflexión en la interfase de un material cuando ésta incide en dirección normal a la superficie, en la presente sección se discutirá el caso en que dicha energía incide en dirección oblicua a la misma superficie.

Como se muestra en la figura 5.7, ambas ondas: reflejada y refractada (transmitida), son el resultado de una onda sonora que incide en dirección oblicua sobre la superficie de interfase de dos materiales diferentes. En este caso particular, una onda sonora que viaja a velocidad V_A en el material **A**, y que incide en ángulo oblicuo sobre la interfase de los materiales **A** y **B**, produce en el material **A** una onda reflejada y en el **B** una onda refractada, ambas con el mismo modo; es decir, si la onda incidente es longitudinal, la reflejada y la refractada son igualmente longitudinales y similares para una onda transversal.

La onda reflejada tiene la misma velocidad, V_A , e igual ángulo, α , que la onda incidente; mientras que la refractada tiene una velocidad, V_B , y el ángulo de refracción, β , está dado por la ley de Snell (ecuación 5.8), la cual se aplica indistintamente para ondas longitudinales o transversales.

$$\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\beta)} = \frac{V_A}{V_B} \quad (5.8)$$

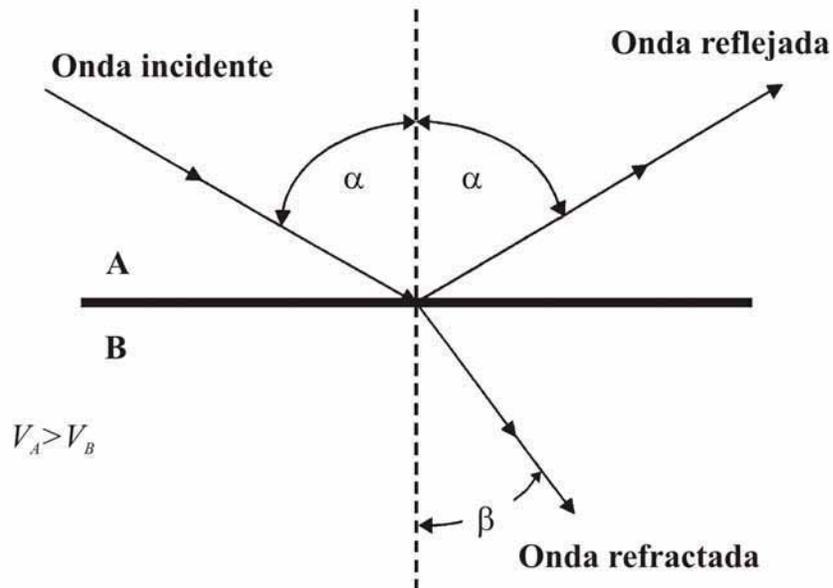


Figura 5.7

Ondas reflejada y refractada de una onda sonora incidente en el material **A**, ante una interfase con el material **B**

5.1.2.3 Conversión de modos

Las ondas acústicas reflejadas o refractadas también pueden cambiar de modo; es decir, pasar de onda longitudinal a transversal y viceversa, dependiendo de la velocidad de la onda incidente, el material y el ángulo de incidencia. Para analizar la conversión de modo, considérense varios casos, que a continuación se describen.

Onda incidente de compresión, o longitudinal

En la Figura 5.8, se muestra el esquema de una onda de compresión que viaja en el material A con una velocidad V_{CA} y ángulo de incidencia i , respecto a la perpendicular del plano de interfase. Cuando la velocidad del sonido es mayor en el material A, es decir, $V_A > V_B$, al incidir en la interfase de los materiales, parte de la energía acústica se refleja, y otra se refracta. Como resultado, se obtienen cuatro diferentes tipos de ondas acústicas:

- ~ Onda de compresión reflejada que viaja a una velocidad V_{CA} , y con ángulo de reflexión $r_C = i$
- ~ Onda cortante reflejada que viaja a una velocidad V_{SA} , y con ángulo de reflexión r_S
- ~ Onda de compresión refractada que viaja a velocidad V_{CB} , y ángulo de transmisión R_C
- ~ Onda cortante refractada con velocidad V_{SB} , y ángulo R_S

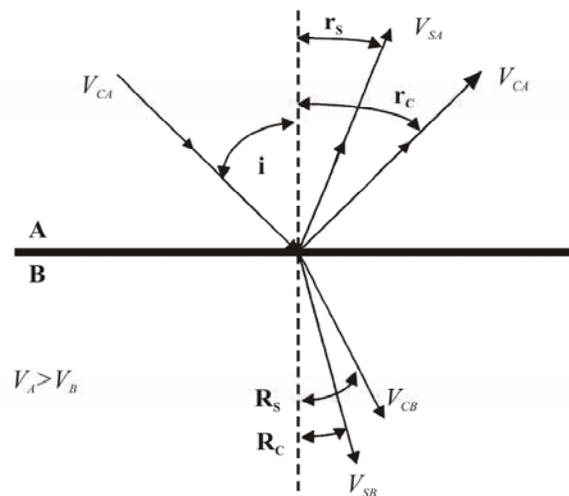


Figura 5.8
Conversión de modos de una onda acústica de compresión incidente en el material A, ante una interfase con el material B

Los ángulos de las diferentes ondas resultantes se rigen por la ley de Snell, que está dada por la ecuación:

$$\frac{\text{sen}(\mathbf{i})}{V_{CA}} = \frac{\text{sen}(\mathbf{r}_S)}{V_{SA}} = \frac{\text{sen}(\mathbf{r}_C)}{V_{CA}} = \frac{\text{sen}(\mathbf{R}_S)}{V_{SB}} = \frac{\text{sen}(\mathbf{R}_C)}{V_{CB}} \quad (5.9)$$

Donde el ángulo de incidencia es \mathbf{i} ; los ángulos reflejados son \mathbf{r}_C y \mathbf{r}_S , y los de refracción son \mathbf{R}_C y \mathbf{R}_S . En este caso, los subíndices \mathbf{C} y \mathbf{S} corresponden a las ondas de compresión y cortante, respectivamente. Para las velocidades, los subíndices \mathbf{A} y \mathbf{B} , se refieren al material.

Onda incidente cortante o transversal

En forma equivalente al caso anterior, en la figura 5.9 se insertó el esquema de la conversión de modos, cuando la onda acústica incidente es del tipo cortante, o transversal. En este caso se supone que $V_B > V_A$ y se tiene que el ángulo de incidencia es \mathbf{i} ; los ángulos de reflexión son \mathbf{i} y \mathbf{r}_C ; y los de refracción son \mathbf{R}_C y \mathbf{R}_S . Así, en esta situación la relación entre los ángulos se describe mediante la ley de Snell a través de la ecuación:

$$\frac{\text{sen}(\mathbf{i})}{V_{SA}} = \frac{\text{sen}(\mathbf{r}_C)}{V_{CA}} = \frac{\text{sen}(\mathbf{R}_S)}{V_{SB}} = \frac{\text{sen}(\mathbf{R}_C)}{V_{CB}} \quad (5.10)$$

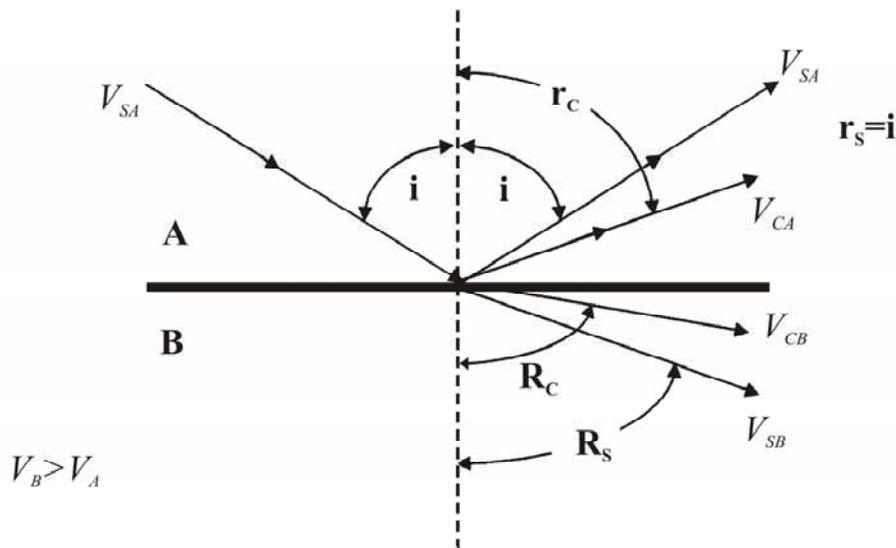


Figura 5.9
Conversión de modos de una onda acústica cortante incidente en el material A, ante una interfase con el material B

5.1.2.4 Ángulos críticos

Dependiendo del ángulo de incidencia, la velocidad del sonido y las propiedades de los materiales **A** y **B**, es factible que un modo o los dos modos de las ondas refractadas en el material **B**, no se presenten. En las figuras 5.10 y 5.11, se muestran los dos casos de ángulo crítico cuando $V_B > V_A$; el primer caso (figura 5.10) es aquel en el que el ángulo de refracción de la onda de compresión es de 90° , y el segundo (figura 5.11) es cuando la onda cortante es la que tiene el ángulo de refracción de 90° .

Cuando el ángulo de incidencia de la onda acústica se mantiene entre los dos valores críticos, se simplifica el proceso de inspección al utilizar un sólo modo de onda (ya sea longitudinal o transversal), y anulando el otro. Lo anterior depende de los métodos de inmersión en los que se tiene la interfase agua/metal, o los métodos de contacto con zapata angular que tienen la interfase plexiglás/metal, ambos muy comunes en la inspección no destructiva por ultrasonido.

Primer ángulo crítico

La figura 5.10 representa el caso de una onda de compresión que incide con el primer ángulo crítico, i_1 . En esta situación, cuando $V_B > V_A$, el ángulo de refracción de compresión, R_C , es de 90° , y se presenta cuando se cumple la relación:

$$\text{sen}(i_1) = \frac{V_{CA}}{V_{CB}}$$

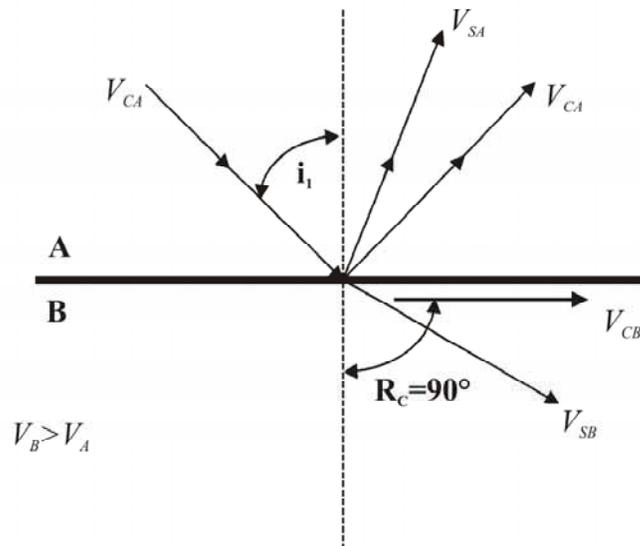


Figura 5.10

Onda de compresión que incide con el primer ángulo crítico con el que la onda de compresión refractada se propaga sobre la interfase

Segundo ángulo crítico

Una situación similar a la anterior corresponde a la figura 5.11 y corresponde al caso en el que el ángulo de incidencia, i_2 , es tal que $R_s=90^\circ$, es decir, la onda cortante refractada se propaga a través de la interfase de los materiales A y B. Para $V_B > V_A$, el segundo ángulo crítico se presenta si se cumple la relación:

$$\text{sen}(i_2) = \frac{V_{CA}}{V_{SB}}$$

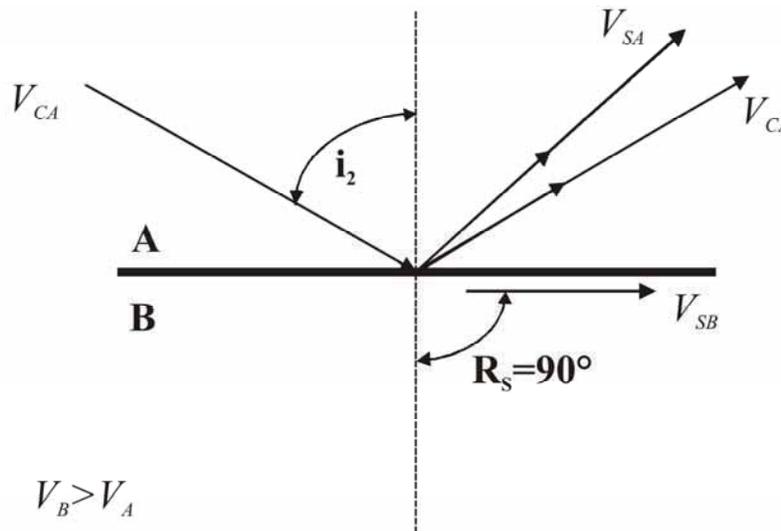


Figura 5.11

Onda de compresión que incide con el segundo ángulo crítico, con el que la onda cortante refractada se propaga sobre la interfase

En general, cuando el ángulo de incidencia, i , es mayor al segundo ángulo crítico i_2 , las ondas superficiales (ondas de Rayleigh) son las únicas que pueden existir, y se propagan por la superficie de B. Los valores de los dos ángulos críticos se calculan a partir de los valores de las velocidades del sonido en los diferentes materiales de la tabla 5.1. Estos valores se presentan en la tabla 5.4 para ondas incidentes de compresión y para los casos más comunes empleados en la inspección no destructiva.

Conocer estos valores, permite diseñar zapatas de acoplamiento que transmitan modos particulares de onda en la pieza que se desea inspeccionar; en particular, cuando $V_B > V_A$, ángulos de incidencia mayores a i_1 , sólo transmiten ondas cortantes en el material B. De manera similar, las ondas cortantes no se transmiten cuando el ángulo de incidencia rebasa el segundo ángulo crítico.

Tabla 5.4
Primer y segundo ángulo crítico para ondas incidentes de compresión

Materiales	1 ^{er} ángulo crítico i_1	2° ángulo crítico i_2
Agua/acero	14,6°	27,5°
Agua/aluminio	13,7°	28,9°
Plexiglás/acero	27,2°	56,7°
Plexiglás/aluminio	25,4°	61,2°

La energía de una onda acústica incidente se distribuye entre las diferentes ondas reflejadas y refractadas en forma compleja, que dependen del ángulo de incidencia y las propiedades de los materiales involucrados. Si se supone que no hay pérdidas de energía acústica en una interfase en la que una onda incide en dirección normal al plano, las energías transmitida y reflectada se derivan de las impedancias acústicas de las ecuaciones 5.6 y 5.7.

Para una onda que incide en forma angular, el cálculo de las energías transmitida y reflejada para cada modo es muy complejo; por ejemplo, para una onda incidente de compresión, las amplitudes de las ondas de compresión y cortantes transmitidas del plexiglás al aluminio, dependen del ángulo de incidencia (figura 5.12) ^[23]. Nótese que las ondas de compresión no se transmiten para ángulos mayores de 25,4°, y las ondas cortantes no existen si el ángulo de incidencia es mayor de 61,2°. Así, para ángulos mayores de 61,2°, toda la energía acústica incidente se refleja en el aluminio y se transmite al aluminio. Retomando los datos de la tabla 5.3 cuando $i=0$, las ecuaciones 5.6 y 5.7 indican que el 53,2% de la energía de la onda de compresión se transmite y el 46,8% se refleja en una interfase plexiglás/aluminio. Estos mismos valores corresponden a los de la figura 5.12 para el ángulo de incidencia cero.

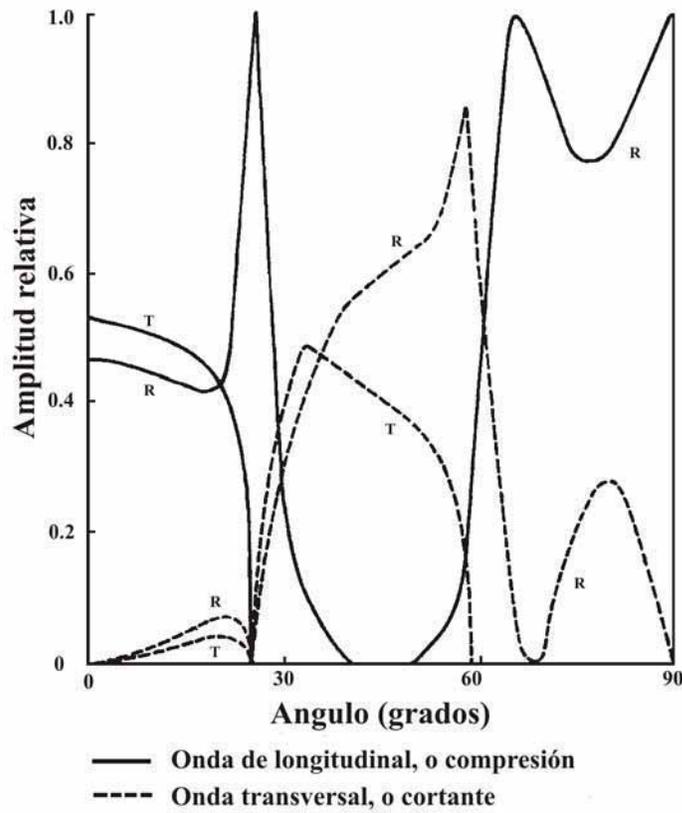


Figura 5.12

Amplitud relativa de las ondas acústicas cortante y de compresión, transmitidas y reflejadas, para ángulos de incidencia de 0° a 90°

5.1.2.5 Doble interfase

De acuerdo con la sección anterior, cuando una onda sonora pasa por la interfase de dos materiales se presentan los fenómenos de reflexión, transmisión, y/o conversión de modos; por ejemplo, en la figura 5.13 se trata el caso de una onda que incide en forma angular sobre la interfase de dos materiales A/B, y se refleja y transmite. En esta situación, ambas ondas llegan a presentar una conversión de modos, por lo que las ondas resultantes pueden ser de compresión y/o cortantes. Por otra parte, las ondas que pasan al material B, interactúan con una segunda interfase formada por los materiales B/C, donde nuevamente la onda incidente se refleja y transmite con posible conversión de modos. La onda reflejada en el interfase con el material C, regresa a la interfase B/A, donde puede pasar al material A, o reflejarse para retornar a la interfase B/C.

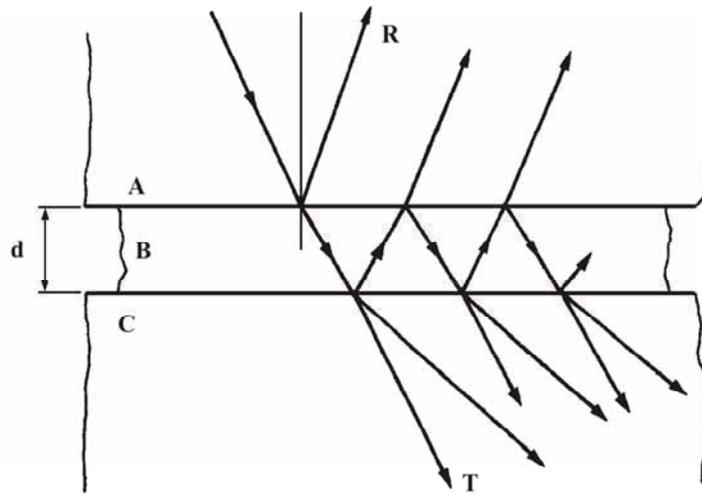


Figura 5.13

Comportamiento de una onda de ultrasonido transmitida del material A al C, con una región intermedia de un material B de poco espesor. Las ondas transmitidas y reflejadas se denotan por las letras T y R, respectivamente

Como la transmisión y reflexión de las ondas sonoras se pueden presentar en varias ocasiones entre las dos interfases de los tres materiales, existen múltiples reflexiones y refracciones que siguen varias trayectorias a través de ambas interfases. Así, la suma total de la energía transmitida a los materiales A y C por las distintas trayectorias, directas e indirectas, deben considerar la fase de cada onda individual, de tal manera que se suman si están en fase, y se cancelan si están defasadas por un ángulo de 180° .

La magnitud del ángulo de desfase depende del espesor del material B (denotado como "d" en la figura 5.13). Cuando el espesor, d, es un múltiplo par de $\lambda/2$ (λ es la longitud de onda del sonido), las diferentes ondas están en fase, y se obtiene máxima energía transmitida o reflejada. Cuando d es un múltiplo non de $\lambda/4$, las ondas están fuera de fase, y se cancelan de tal manera que se tiene un mínimo de energía, transmitida o reflejada.

Los fenómenos de transmisión y reflexión son particularmente importantes cuando se diseña el material acoplador buscando que el espesor sea un múltiplo par de $\lambda/2$. Como la longitud de onda $\lambda=V/f$, el grosor del acoplador depende inversamente de la frecuencia, f , y la velocidad del sonido, V (que a su vez depende del material). Es importante notar que si el material B es una grieta llena de aire, es posible que la energía sonora se propague totalmente a través de la grieta (en vez de reflejarse), y ésta no sea detectada. Esa situación se presenta cuando la separación de una grieta es muy pequeña y, aunque no representa un gran problema en la práctica, las grietas apretadas pueden transmitir las ondas sonoras en vez de reflejarlas.

5.1.2.6 Reflexión en esquinas

Cuando un haz de ultrasonido incide en una esquina, la reflexión y refracciones en las dos superficies de la esquina conllevan una compleja conversión de modos y una pérdida importante de energía. Considérese, por ejemplo, la reflexión y refracción de una onda de compresión que incide en una cara de la esquina (figura 5.14). Nótese que la reflexión, refracción y conversión de modos se pueden presentar en cada una de las superficies. En la superficie 1, ocurren ondas de reflexión y transmisión, longitudinales y transversales. En la superficie 2, las dos ondas reflejadas producen cada una de las ondas transversales y longitudinales de reflexión.

En una esquina de 90° , la onda de compresión que se refleja sin que haya ocurrido cambio de modo, tiene la misma dirección de la incidente; sin embargo, existe una segunda onda de compresión (resultante del cambio de modo de la onda cortante en el segundo plano) que tiene un ángulo diferente a la incidente.

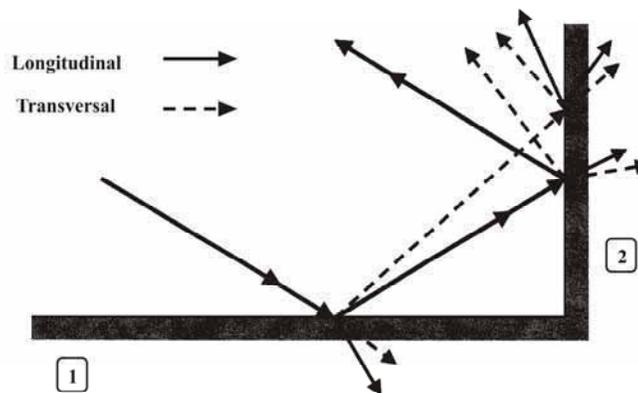


Figura 5.14

Onda de compresión que incide sobre una esquina, reflejando dos ondas de compresión y dos cortantes en ángulos diferentes. Ondas de compresión y cortantes se transmiten a través de las superficies 1 y 2, resultando en pérdidas de energía ultrasónica

La intensidad de las ondas reflejadas por una esquina depende significativamente del ángulo de incidencia, presentando en particular poca energía de reflexión los ángulos de 30° y 60° [20]. Por tanto, las reflexiones en esquinas son de particular interés, y deben ser analizadas detalladamente en cualquier inspección no destructiva; en especial, para identificar aquellas reflexiones “no esperadas”, o por la muy alta pérdida de energía que se presenta. Siguiendo un razonamiento similar al anterior, la orientación de un defecto influye significativamente en la señal de ultrasonido reflejada.

5.1.3 Atenuación de las ondas de ultrasonido

La energía de ultrasonido se atenúa a medida que atraviesa la pieza que se inspecciona, por lo que es más importante conocer la intensidad sonora de transmisión o reflexión que se va a medir, que la del pulso emitido. La pérdida de energía acústica depende de muchas variables, entre las que destacan el material y la geometría de la pieza inspeccionada; la frecuencia del sonido, el acoplamiento con el transductor; la geometría del defecto, etc. En general, la atenuación de una onda de ultrasonido ocurre por las siguientes causas:

- ~ Disipación
- ~ Absorción
- ~ Colisión
- ~ Impedancia acústica

Disipación de la energía acústica

Como una onda sonora se disipa a medida que se aleja de su fuente, su energía se distribuye en un área cada vez mayor, reduciendo su intensidad por unidad de área. La disminución de intensidad o pérdida por disipación, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del punto de medición a la fuente.

Absorción

La absorción de la energía acústica ocurre cuando ésta energía mecánica se convierte en calor. Esta pérdida de calor es permanente, independientemente de factores geométricos o defectos, por lo que no se puede utilizar como información para una IND. La pérdida de calor es anisotrópica con respecto a la dirección de propagación de la onda, y para la mayoría de los materiales se incrementa proporcionalmente con la frecuencia.

Colisión

La colisión de las ondas acústicas ocurre en las fronteras de grano, pequeñas grietas y, en general, en cualquier falta de homogeneidad del material. Cuando el tamaño de grano, g,s , del material es menor al 1% de la longitud de onda del ultrasonido, λ , las pérdidas por colisión son del mismo orden; en cambio, si excede el 10% de λ , las fugas por colisión son del orden del cubo del tamaño de grano $(\sim(g.s)^3)$ [23]. En este caso, la pérdida de energía puede servir para identificar tamaños de grano no aceptables en un material.

Impedancia acústica

Las pérdidas por impedancia acústica se presentan entre el transductor y la pieza que se inspecciona durante la emisión y la recepción de la onda sonora. En las

técnicas de inmersión (que se discutirán más adelante) el agua se utiliza como medio de acoplamiento entre el transductor y el objeto, ocurriendo pérdidas por impedancia en las interfases agua/metal, tanto en la onda emitida, como en la recibida. En una técnica de contacto es común encapsular al transductor en plexiglás y emplear un fluido (típicamente aceite) como medio de acoplamiento con la pieza. Las pérdidas por impedancia son comunes en cualquiera de las interfases transductor/plexiglás/fluido/objeto; pueden ser reducidas, con una adecuada selección del acoplador y dependiendo del material del objeto.

5.1.3.1 Atenuación de la intensidad

De manera general, la atenuación de la energía acústica se puede expresar mediante la relación:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (5.11)$$

Donde:

I_0 = intensidad inicial de la onda acústica

I = intensidad de la onda acústica a una distancia x

α = coeficiente de atenuación

El coeficiente de atenuación α , se expresa generalmente en decibeles por unidad de longitud y los decibeles son una unidad con base logarítmica del bel; es decir, 1 decibel = 0,1 bel. Así, dos potencias o intensidades acústicas difieren en n bel si:

$$I_1/I_2 = 10^n$$

ó

$$n = \log_{10}(I_1/I_2) \text{ bel}$$

Como la potencia acústica, I es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda sonora, A , se tiene que

$$n = 2 \log_{10}(A_1/A_2)$$

Valores típicos para los coeficientes de atenuación ^[23]:

$\alpha < 10$ dB/m para aceros perlíticos, rolados en caliente

$\alpha \sim 100$ dB/m para algunos aceros inoxidables, y aleaciones de aluminio

$\alpha > 300$ dB/m para polímeros

De acuerdo con lo anterior, la inspección por ultrasonido de materiales con altos coeficientes de atenuación como los polímeros, materiales compuestos, maderas y concreto, puede resultar complicada. En general, esta atenuación suele ser mayor a medida en que se incrementa la frecuencia, y ser más significativa para las ondas cortantes que para las de compresión.

5.1.4 Técnicas de inspección por ultrasonido

La evaluación no destructiva por ultrasonido es un método versátil que permite aplicar técnicas que se pueden adaptar en la inspección de un problema particular; por ejemplo, son factibles de emplear los diferentes tipos de ondas para evaluar la respuesta de una señal. Más aún, como se discutirá más adelante, la señal de ultrasonido puede ser transmitida, recibida, interpretada y mostrada en varias formas.

5.1.4.1 Métodos de inmersión y contacto

Es frecuente que las técnicas de ultrasonido se clasifiquen en dos grupos: a) técnicas de inmersión y, b) técnicas de contacto. Las de contacto son aquellas en las que el transductor se pone en contacto con el objeto a través de una película de material acoplador en cambio, las de inmersión utilizan una capa gruesa de un fluido (generalmente agua) para acoplar al transductor con el objeto de prueba. Las ventajas de las técnicas de inmersión son la rapidez de la inspección, la facilidad de controlar y dirigir el haz de ultrasonido, y la posibilidad de automatizar el procedimiento de prueba. Existen tres tipos diferentes de técnicas de inmersión: convencional de inmersión, columna de agua, y transductor giratorio o de rueda.

Método convencional de inmersión

En este caso, ambos, el transductor y el objeto de prueba, están sumergidos en un fluido como se muestra en la figura 5.15; se pueden apreciar los dos tipos de ondas (compresión o cortante) en haz recto; así como la incidencia del haz angular para utilizar únicamente las ondas cortantes en la inspección de la pieza (ver 5.1.2.4). La distancia entre el transductor y el objeto es de particular importancia para suprimir señales no deseadas o confusas. El tiempo durante el cual la onda sonora viaja por el fluido (i.e., la distancia de recorrido en el agua), debe exceder el lapso de recorrido en el objeto de prueba para evitar que aparezca el pico de un segundo reflejo de la onda en el agua. Una regla muy común es sumarle 0,25 pulg a la distancia que recorrida por la onda en el agua en el mismo tiempo que tarda en recorrer el objeto de prueba. Así, si la velocidad en el agua es un cuarto de la velocidad en el aluminio; la distancia del transductor al objeto es un cuarto del tamaño de la pieza, más 0.25 pulg^[23].

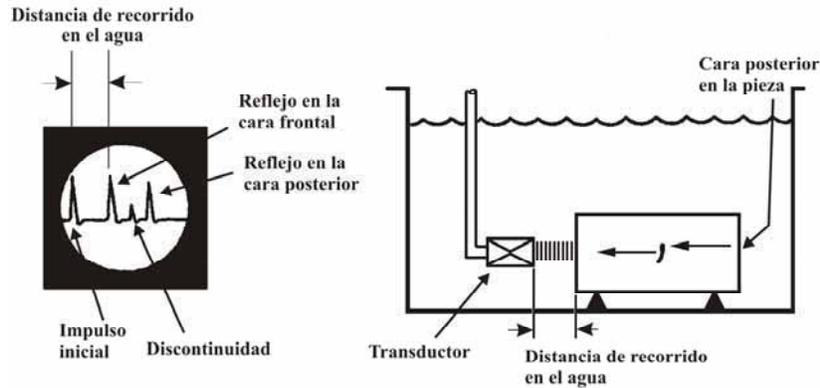


Figura 5.15

Técnica de ultrasonido por inmersión, mostrando la distancia de recorrido en el agua por la onda acústica

Método de columna de agua

También conocido como de rociado o aspersión, el método de columna de agua es una variante de la técnica de inmersión, y se aplica en condiciones en las cuales el objeto de prueba no puede ser sumergido en agua. En la figura 5.16, el ultrasonido se produce en el transductor y viaja al objeto de prueba por la columna de agua que fluye por el dispositivo hasta el objeto. En este caso, también se aplican ondas de compresión en haz recto o en haz angular para generar ondas cortantes o de compresión en el material de la pieza que se va a inspeccionar.

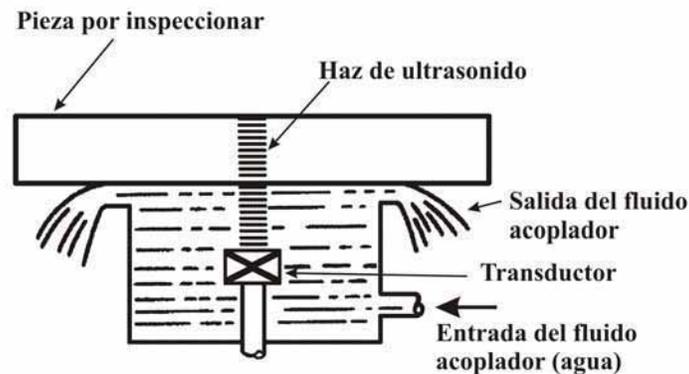
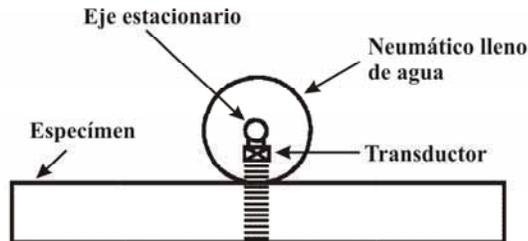


Figura 5.16

Técnica de chorro o columna de agua utilizada para la inspección de piezas en campo

Transductor giratorio o de rueda

El transductor giratorio utiliza una rueda de hule llena de agua, que sirve de medio para transmitir la onda acústica del transductor a la pieza de prueba (figura 5.17). En este caso, el transductor se localiza fijo al eje estacionario de la rueda y se encuentra sumergido en el agua; por su parte, el hule actúa como contacto entre el agua y el objeto. Como se muestra en la figura mencionada, la rueda se coloca en diferentes ángulos, y el transductor orientar en varias formas, de manera que se pueden utilizar las técnicas de haz recto o haz angular, y hacer inspecciones en varias direcciones sobre la pieza.



Técnica de inspección con rueda-transductor

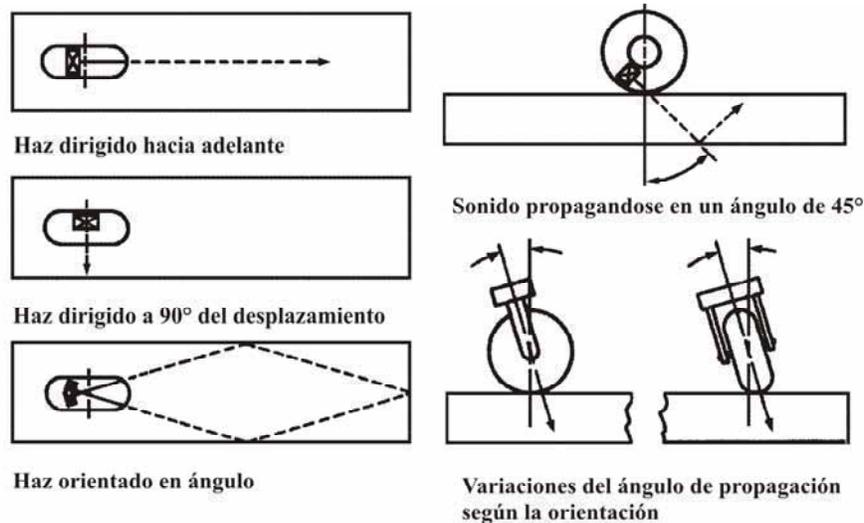


Figura 5.17

Arreglo de un transductor acoplado a una rueda llena de agua, que gira sobre la pieza de prueba. Esta técnica tiene variantes que permiten modificar los ángulos de incidencia, según se muestra

Contacto directo

En las pruebas por contacto directo, el transductor se coloca sobre la pieza de prueba mediante una película de acoplamiento. La sonda de ultrasonido puede ser sostenida directamente por el inspector, o utilizar un sistema automático. Las técnicas de haz recto y angular se emplean para lograr ondas longitudinales, transversales o superficiales en la pieza. El ángulo de incidencia puede, por ejemplo, seleccionarse con el propósito de eliminar las ondas de compresión y recurrir únicamente a ondas cortantes. Las ondas superficiales (Rayleigh) son el resultado de ángulos de incidencia muy grandes (mayores que el segundo ángulo crítico), y ser empleadas en la detección de pequeños defectos superficiales.

5.1.4.2 Técnicas de pulso-eco

En las inspecciones pulso-eco, generalmente se utilizan transductores que son simultáneamente emisores y receptores de ultrasonido. Con ellos, se genera un pulso que se transmite al objeto de prueba, y se recogen tanto el pulso inicial (**PI**) como el reflejo de la parte posterior del objeto (**RPP**), (figura 5.1, caso **A**). Cuando se detecta un defecto, éste genera un reflejo (**RD**), cuya magnitud depende del tamaño (figura 5.1, caso **B**), llegando en ocasiones a obstruir el paso de la onda de ultrasonido con lo cual se impide el reflejo de la parte posterior (figura 5.1, caso **C**).

Esta técnica y sus variantes son las de mayor uso, ya que sólo requieren del acceso a un lado del objeto de prueba. Transductores simples o dobles pueden emplearse; en el primer caso, el transductor sirve como emisor y receptor; mientras que en el segundo, un transductor es el emisor y el segundo es el receptor. La ventaja de los transductores dobles es que cada uno se optimiza para una función específica; el uso de estos sistemas duales incrementa la sensibilidad y la resolución, especialmente para defectos cercanos a la superficie. La técnica de pulso-eco puede emplear ondas sonoras de compresión, cortantes, superficiales o de Lamb en métodos directos o de inmersión.

5.1.4.3 Técnicas de transmisión

Son aquellas en las cuales en un punto de la pieza, se aplica una onda de ultrasonido, y en un punto opuesto se recibe la respuesta de la señal inducida (figura 5.18). Nótese que en este caso sólo se mide la atenuación de la señal pues no hay reflejo proveniente del defecto. Así, la presencia del defecto produce una reducción en la señal recibida en el sensor, pero su localización no puede ser determinarse.

Como la técnica de transmisión consiste en emitir una señal que pasa a través de la pieza que se inspecciona y se recibe en el otro extremo, resulta ser un procedimiento particularmente adecuado para materiales con un alto coeficiente de atenuación, como son los polímeros o materiales compuestos. De igual forma, las técnicas de transmisión son buenas para detectar grietas superficiales, o bien,

para evitar el pulso inicial (PI), y los efectos causados por la dispersión del haz. Las dos principales desventajas de este método son dar la alineación correcta entre los transductores emisor y receptor, y garantizar su acoplamiento con el objeto de prueba.

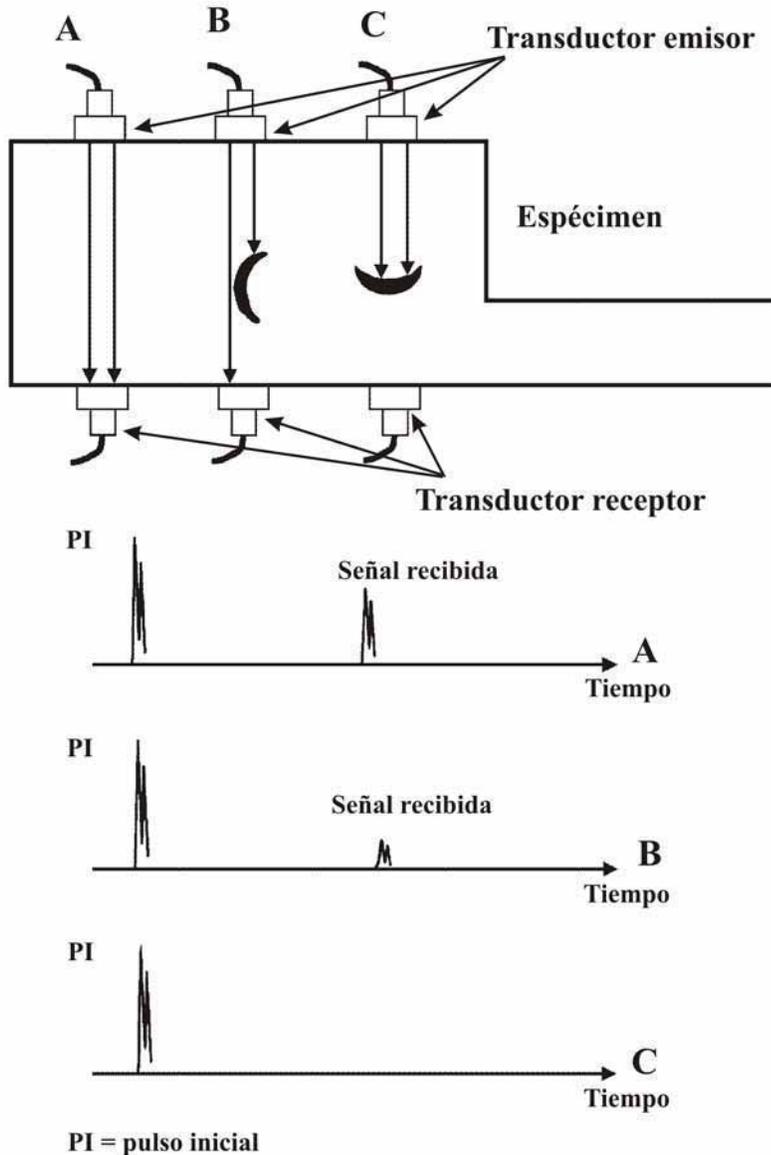


Figura 5.18

Esquema que representa la técnica de transmisión, y la respuesta según la presencia de un defecto. En este caso, el pulso inicial se muestra únicamente como referencia para la escala en el tiempo, ya que éste no se detecta en el transductor receptor

5.1.4 4 Técnicas de contacto angular

Por lo general, las grietas con orientación normal a la superficie de la pieza inspeccionada, son difíciles de detectar con la técnica de haz recto (figura 5.1); sin embargo, cuando éstas llegan hasta la superficie se identifican mediante las ondas superficiales de Rayleigh. Cuando esas grietas se encuentran en el interior del material, se emplean técnicas de haz angular en las cuales el ángulo se orienta buscando la mayor reflexión de la grieta al transductor. Como se indica en la figura 5.19, las ondas de ultrasonido pueden tener varios reflejos en la cara posterior antes de llegar a la grieta, y lograr el ángulo óptimo de detección. Nótese que la localización del transductor receptor resulta ser más complicada cuando la señal llega y se refleja de la posible grieta, siguiendo una trayectoria indirecta y compleja. Adicionalmente, la ausencia de un reflejo en la cara posterior hace que estos métodos sean más complicados y no resulte fácil verificar la correcta calibración y operación del equipo.

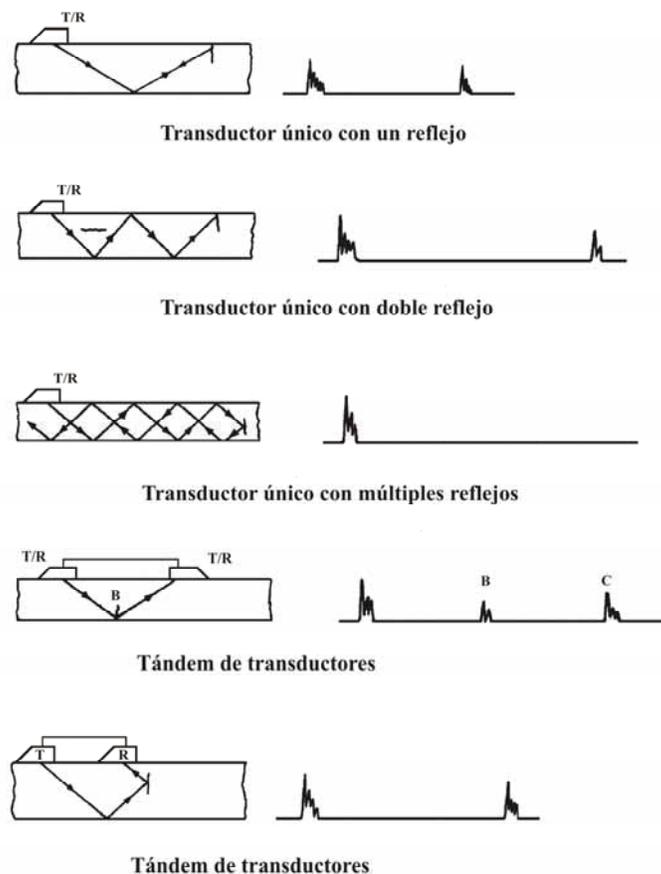


Figura 5.19

Ejemplo de técnica de contacto angular, y el efecto de diferentes ángulos en la detección de grietas normales a la superficie de la pieza inspeccionada

Los transductores en tándem como los de la figura 5.19 son una variante de los transductores duales con los cuales uno emite la señal de ultrasonido y el otro la recibe, ambos en dirección angular. En este caso, tanto el ángulo como la distancia entre los transductores se pueden variar para lograr una emisión, recepción y/o detección óptimas.

Como se hace ver en la figura 5.20, se puede programar una inspección para aprovechar el efecto de conversión de modos, y utilizar determinado tipo de onda de ultrasonido. Lo anterior permite varias posibilidades de inspección y ajustarlas a problemas particulares; sin embargo, la interpretación de señales que cambian de modo, son especialmente difíciles de interpretar en objetos con geometrías complejas, y en las que el reflejo de una grieta tiene que ser diferenciado de los diferentes reflejos de onda en las diversas caras del objeto. Nótese, por ejemplo, de la figura 5.21 que en un estudio detallado de la señal que se mide es posible conocer el origen de cada una e identificar la que corresponde a una grieta.

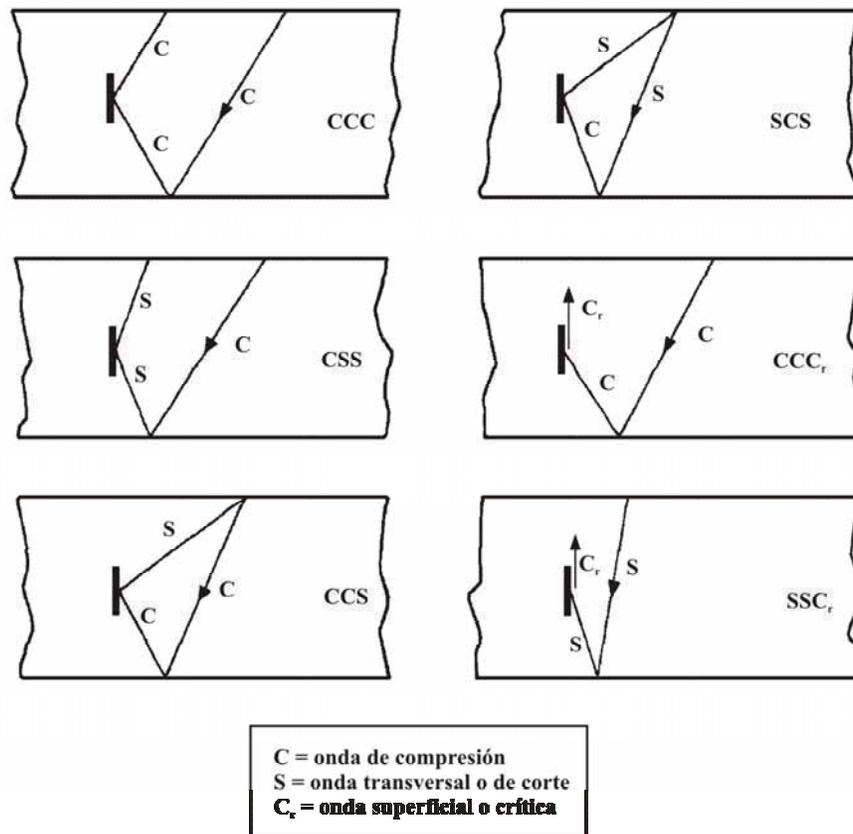


Figura 5.20
Diferentes posibilidades de inspección, según la conversión de modos en la cara posterior o en el defecto en la pieza

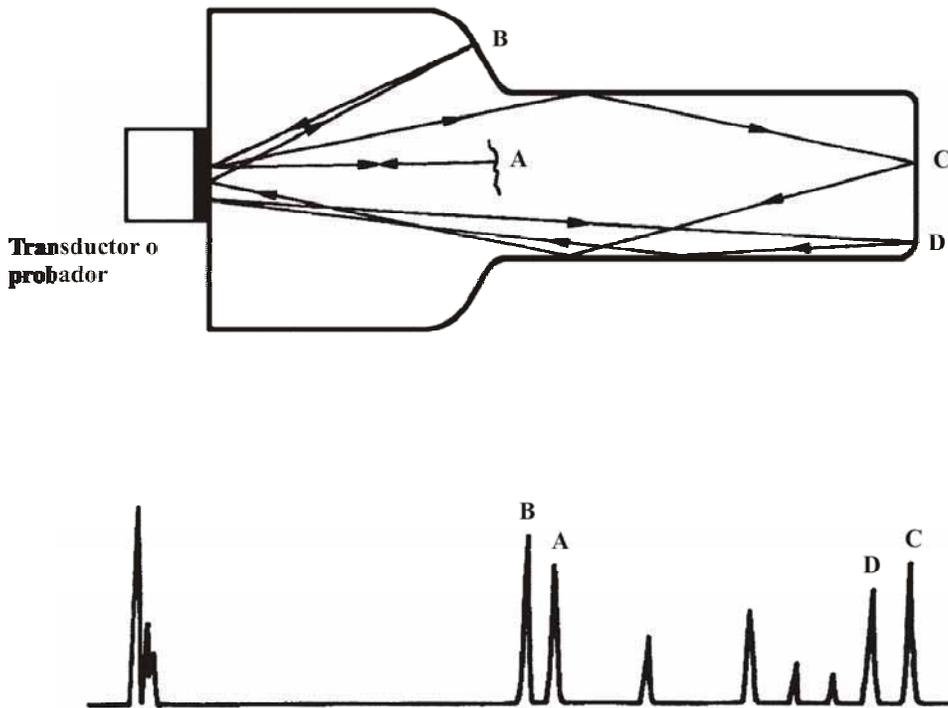


Figura 5.21
Señal típica con múltiples reflejos obtenidos de una pieza con un defecto, y geometría compleja

5.1.4.5 Técnicas de ángulo crítico

Se emplean particularmente para explotar los efectos de reflexión y refracción que ocurren en determinados ángulos de incidencia (ver 5.1.2.4). En la figura 5.12, se observa que cambios pequeños en el ángulo de incidencia, generan variaciones significativas en las ondas transmitidas o reflejadas. Pudiéndose presentar con pequeñas variaciones de la frecuencia, ya que la velocidad del sonido depende de ésta.

Es factible calibrar un procedimiento de inspección a la frecuencia y ángulos críticos para, por ejemplo, producir una reflexión total de una onda sonora, de tal manera, que es posible analizar variaciones en las propiedades de materiales, tamaños de grano, grado de atenuación del ultrasonido o microestructura. La velocidad de las ondas longitudinales es especialmente sensible al nivel de esfuerzos a los que se somete un material, por lo que resulta adecuada para detectar esfuerzos residuales. La refracción crítica de ondas cortantes,

longitudinales o de Rayleigh, es ampliamente usada para localizar defectos cercanos a la superficie.

5.1.4.6 Inspecciones con onda continua

Para este tipo de inspecciones se utiliza una fuente continua de frecuencia constante con objeto de generar la señal de prueba. Se emplea ampliamente para medir espesores, adherencia entre capas de materiales compuestos, y evaluar propiedades de los materiales; sin embargo su limitación principal es que no determina la ubicación o el tamaño de los defectos.

Hay procedimientos especiales para las inspecciones con onda continua que incluyen pruebas de resonancia, inducción sónica o impedancia. En las pruebas de resonancia, la frecuencia natural de una pieza se mide y calibra para identificar diferentes propiedades del material. En una prueba de inducción sónica se induce una corriente eléctrica en una pieza de metal para generar y recibir ondas sonoras que son utilizadas como ondas de prueba. Esta última técnica es muy común en la evaluación la adherencia de placas de materiales compuestos con recubrimientos de metal, ya que las vibraciones en el objeto de prueba dependen del espesor de la pieza; una mala adherencia entre capas produce vibraciones anormales fácilmente detectables.

Aunque las pruebas de impedancia son por contacto, complementan las inspecciones de inducción sónica, ya que se aplican en materiales metálicos y no metálicos. En este caso, con una fuente en resonancia se genera una señal que mide un transductor de vibraciones, lo cual sirve para medir el comportamiento del material como conductor de ultrasonido. Los cambios o variaciones en la frecuencia de resonancia indican anomalías. La falta de adherencia de capas en un material compuesto, por ejemplo, puede ser detectada como variaciones en la impedancia acústica del sistema resonante.

5.1.5 Generación y detección del ultrasonido

Se va a presentar una descripción resumida de los diferentes métodos que se utilizan para generar las ondas de ultrasonido. Los más comunes incluyen transductores piezoeléctricos, electromagnéticos o láser para inducir el ultrasonido en una pieza de inspección.

5.1.5.1 Transductores piezoeléctricos

Son los más comunes para señales de ultrasonido. Los materiales piezoeléctricos tienen la característica de convertir una señal eléctrica en deformaciones mecánicas y viceversa. En el modo de emisor, una señal eléctrica oscilatoria induce vibraciones de alta frecuencia en el transductor, las cuales se transmiten como ondas de ultrasonido en el material a inspeccionar. Como receptor, las vibraciones sonoras se envían del objeto al transductor, transformándose en una

señal eléctrica que puede ser almacenada y analizada. Como se presenta a continuación, existen varios materiales que presentan comportamiento piezoeléctrico, por lo que se emplean como transductores de ultrasonido.

Materiales piezoeléctricos

Cristal de cuarzo. Se puede encontrar en forma natural, y fue el primero en utilizarse como transductor de ultrasonido. Sus propiedades piezoeléctricas son altamente anisotrópicas, por lo que dependen de la orientación con la que se corte el cristal. Un cristal cortado en dirección x vibra principalmente con tendencia perpendicular al corte, por lo que produce ondas de compresión cuando se acopla al objeto de inspección. Un cristal cortado en la dirección y , oscila en la dirección transversal, por lo que genera ondas cortantes sin necesidad de la conversión de modo.

Estos cristales empleados como transductores de ultrasonido tienen la ventaja de ser electrónica y térmicamente estables; son insolubles en casi cualquier líquido; tienen una alta resistencia mecánica, y una alta tolerancia al desgaste y envejecimiento. La principal desventaja es su baja eficiencia de conversión electromecánica, la conversión de modo afecta su desempeño, y que requieren un alto voltaje para excitar vibraciones de baja frecuencia.

Sulfato de litio. Es otro material monocristalino que se utiliza ampliamente como transductor de ultrasonido, y resulta ser un excelente transductor receptor; además de tener aceptable eficiencia de conversión; no se afecta por la interacción entre modos, y posee buena resistencia al envejecimiento. Sus desventajas principales son su alta fragilidad, poca tolerancia a la temperatura (hasta 74°C), y ser un material soluble en agua.

Cerámicos polarizados. Son materiales sintéticos que se fabrican con procesos sintetizables y generalmente tienen muy alta eficiencia electromagnética. Incluyen el titanato de bario, el plomo-zirconio-titanio (PZT), y el plomo-magnesio-niobio (PMN). El titanato de bario es mecánicamente disparejo y sus propiedades pueden variar por envejecimiento; sin embargo, es ampliamente usado como elemento de filtrado. El plomo-zirconio-titanio (PZT) es el mejor emisor o transmisor de ultrasonido, pero su desempeño como receptor no es tan bueno. El PZT es mecánicamente heterogéneo y posee buena resistencia a la alta temperatura y al envejecimiento. El plomo-magnesio-niobio (PMN) es de muy alta tolerancia a la temperatura (hasta 500°C) y presenta poco amortiguamiento mecánico; no obstante, su constante dieléctrica es muy alta, por lo que es un transductor de alta capacitancia.

En la siguiente tabla se sintetizan las características de cada uno de los diferentes materiales, y su uso como transductores de ultrasonido.

Tabla 5.5
Comparación de materiales para transductores de ultrasonido

Aplicación	Elemento piezoeléctrico				
	Cuarzo	Sulfato de litio	Titanato de bario (BaTiO ₃)	Plomo-Zirconio-Titanio (PZT)	Plomo-Magnesio-Niobio (PMN)
Transmisor	Malo	Regular	Bueno	Excelente	Bueno
Receptor	Bueno	Excelente	Malo	Regular	Regular
Acoplamiento con agua	Bueno	Excelente	Bueno	Regular	Bueno
Acoplamiento con metal	Regular	Malo	Bueno	Excelente	Excelente
Tolerancia a alta temperatura	Bueno	Malo	Malo	Excelente	Excelente
Capacidad de amortiguamiento	Regular	Excelente	Malo	Regular	Excelente
Modos no deseados (ruido inherente)	Bueno	Excelente	Malo	Malo	Bueno
Inspecciones con haz recto	Bueno	Malo	Bueno	Excelente	Excelente
Inspecciones con haz angular	Regular	Regular	Bueno	Excelente	Excelente
Inspecciones por inmersión	Bueno	Excelente	Regular	Regular	Bueno

Tipos de transductores

Existe una amplia gama de posibilidades y configuraciones para los transductores piezoeléctricos que, como haz recto, o angular pueden introducir modos específicos de ondas de ultrasonido. Una onda de compresión se forma cuando el transmisor vibra en dirección perpendicular a la superficie del objeto en inspección, y si el transductor se coloca en una zapata en ángulo, la onda de ultrasonido incide en forma angular sobre la superficie del material que se va a evaluar. La selección adecuada del ángulo de incidencia, como ya se vio, selecciona o elimina determinados modos de onda. El diseño mismo del transductor varía para diferentes aplicaciones, como el caso del tipo “lápiz”, que genera un haz muy angosto de alta intensidad para inspeccionar materiales de gran espesor y con buena resolución espacial.

Los transductores dobles incorporan en forma separada un emisor y un receptor en una sola sonda. El transmisor y el receptor pueden colocarse juntos, pero requieren una barrera aislante de sonido para evitar interferencia entre ellos. Es posible variar los materiales para optimizar su aplicación, ya sea como emisor o receptor, o bien en la generación de una haz recto o angular.

Los transductores de contorno, o de placa frontal tienen varias aplicaciones. Por ejemplo, las placas de desgaste sirven para proteger a los cristales piezoeléctricos, mientras que las de contorno permiten que las ondas sonoras lleguen perpendicularmente sobre superficies curvas.

Hay transductores enfocados, que hacen converger al haz de ultrasonido como lo hace un lente con la luz. Estas aplicaciones son frecuentemente empleadas en inspecciones por inmersión, y a pesar de que los cristales piezoeléctricos se pueden fabricar con perfiles específicos, es preferible utilizar un material polimérico como lente de ultrasonido. Enfocar un haz de ultrasonido permite inspeccionar zonas pequeñas, reduce el efecto de la rugosidad superficial y mejora la sensibilidad de detección. Por otra parte, esta técnica limita el intervalo de inspección a una zona restringida, por lo que se aplica en piezas de poco espesor (0,01 a 2 pulgadas). Existen transductores que emplean arreglos específicos que enfocan electrónicamente al haz de ultrasonido (figura 5.22). En este último caso, varios cristales emiten selectivamente pulsos en determinada secuencia, y con un retardo variable en tiempo para dirigir al haz en un determinado ángulo, o enfocarlo a la distancia focal deseada.

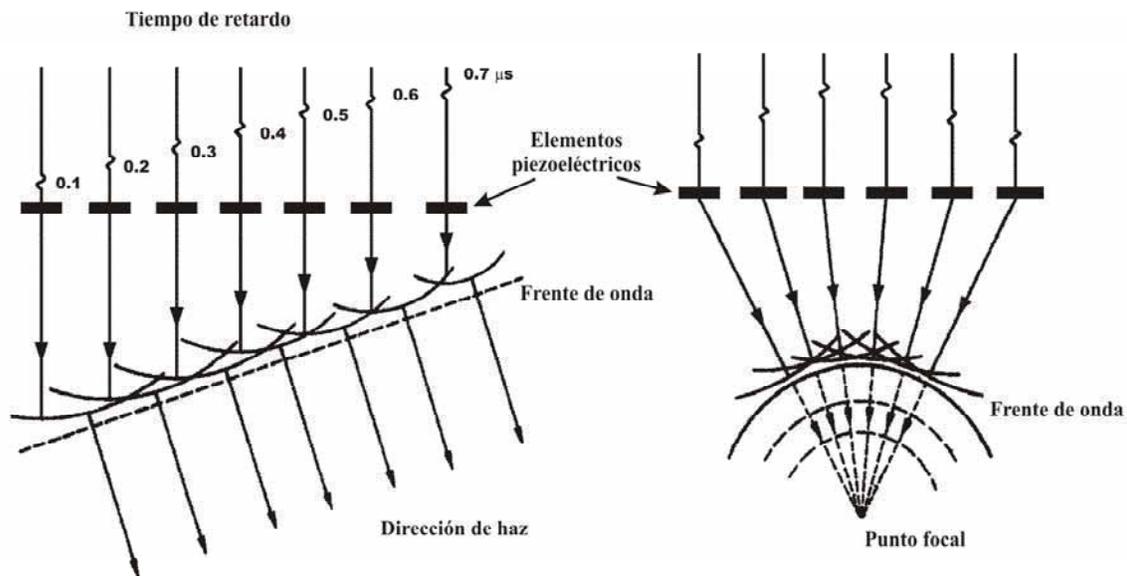


Figura 5.22

Esquema que muestra el método de pulsos desfasados en el tiempo, el cual permite reorientar o enfocar una onda de ultrasonido en un material

5.1.5.2 Transductores electromagnéticos-acústicos (EMAT)

Los transductores EMAT son de no-contacto y emplean principios físicos de electromagnetismo y acústica para generar y recibir las ondas de ultrasonido. En este caso, las ondas de ultrasonido se generan por la vibración de las fuerzas de Lorentz que se producen por la interacción de un campo magnético estático y las corrientes inducidas a través de una bobina alimentada por corriente alterna de alta frecuencia. La fuerza magnética ejercida sobre el espécimen de prueba vibra a la misma frecuencia y dirección que le produce la bobina, por lo que se pueden producir ondas de compresión o cortantes. Para recepción, la vibración del espécimen actúa como un conductor en movimiento en un campo magnético, generando la fuerza electromagnética, que se mide con una bobina.

Como los transductores EMAT son de no-contacto, ya sean emisores o receptores, resultan especialmente adecuados para inspecciones a alta temperatura, o en aplicaciones a superficies rugosas o en movimiento. Adicionalmente, su versatilidad permite generar ondas de compresión, cortantes, superficiales o de Lamb. Como desventaja está su alta sensibilidad al ruido, tanta que se requieren imanes muy grandes, y manejar altos límites de probabilidad.

5.1.5.3 Ondas de ultrasonido producidas por láser

Cuando un haz de un láser incide en forma de pulsos, produce ciclos de calentamiento/enfriamiento que generan ondas de ultrasonido por la consecuente expansión-contracción del material en el punto en el que incide el haz. Para niveles bajos de energía del láser, el calentamiento directo induce ciclos mecánicos de contracción-expansión, lo cual supone un comportamiento termo-elástico. Por otra parte, cuando se trata de un haz de alta energía, el calor puede hacer que una pequeña capa superficial de material se vaporice, ocasionando un rompimiento dieléctrico entre el aire y la pieza, generando ondas de ultrasonido por el llamado método de plasma. Aunque desde el punto energético, el uso del láser de alta energía es muy eficiente, el daño superficial en el material representa una desventaja muy grande.

La principal ventaja del uso del láser para generar ondas de ultrasonido es que no hay necesidad de tener contacto directo con el objeto de prueba, evitando problemas de acoplamiento o de forma. Adicionalmente, se pueden inspeccionar objetos a muy altas temperaturas o hacer un muestreo rápido sobre una superficie. Las desventajas son el riesgo de daño a la pieza, sólo se utiliza para generar las ondas de ultrasonido, requiere otro tipo de transductor para la medición de las respuestas, produce únicamente ondas de alta frecuencia, y el costo asociado es generalmente muy alto.

5.1.6 Parámetros para la selección del ultrasonido

Se analizan los parámetros más significativos en la inspección no destructiva por ultrasonido, y se evalúa la relación que tienen con el desempeño o capacidad de los métodos.

Frecuencia

Por lo general, es el parámetro principal que determina el método de inspección por ultrasonido para valores de frecuencia entre 200 kHz a 25 MHz. Algunos materiales compuestos por ejemplo, atenúan las señales de sonido de alta frecuencia, por lo que se requieren frecuencias bajas para obtener una señal satisfactoria de ultrasonido. Adicionalmente, si otros métodos aplican la técnica de pulso-eco, no pueden emplear baja frecuencia por limitaciones en el ancho del pulso y el tiempo que tarda en llegar la onda reflejada.

En general, las pruebas de ultrasonido se dividen en dos grandes categorías:

- La de alta frecuencia, que comprende desde 1 MHz hasta 10 MHz, y que es el intervalo de frecuencia más común en la evaluación no destructiva
- La de baja frecuencia, que corresponde a valores menores de 1 MHz, y que se utiliza para materiales tales como madera, concreto y metales con tamaños de grano muy grandes

La capacidad de penetración de una onda ultrasónica decrece a medida que la frecuencia aumenta, siendo este efecto más pronunciado cuando el material tiene una microestructura con granos de tamaño grande (i e, mayor dispersión). Por lo general, en una aplicación específica se recomienda la mayor frecuencia posible que tenga la capacidad de penetración requerida en la inspección, ya que hay otras consideraciones adicionales a la penetración, tales como la sensibilidad, la resolución, y la dispersión del haz.

La sensibilidad es la habilidad para detectar pequeñas discontinuidades, y se incrementa proporcionalmente con la frecuencia; es decir, a menor longitud de onda, mayor sensibilidad. Por otro lado, la resolución es la habilidad para distinguir dos discontinuidades cercanas una de la otra, y ésta se incrementa con la frecuencia y el ancho de banda, pero decrece con la permanencia del pulso de ultrasonido. Finalmente, la dispersión del haz (que es la divergencia del haz con respecto al eje central) disminuye cuando la frecuencia aumenta.

Transductor piezoeléctrico

Seleccionar un transductor apropiado para una aplicación específica requiere varias consideraciones, que normalmente deben balancear las ventajas con las desventajas que tienen. El tipo de transductor, como se discute en la sección 5.1.5.1, es muy importante y determina en gran parte su desempeño; pero,

adicionalmente a ahí analizado, es necesario considerar el área efectiva del transductor (relacionado con la potencia del sonido emitido) y la divergencia. Transductores de gran tamaño propician mayor penetración para determinada frecuencia, a la vez que proporcionan menor divergencia del haz, pero por el contrario, pierden sensibilidad.

Cuando la frecuencia de trabajo de un transductor corresponde a su frecuencia de resonancia, resulta ser más eficiente, tanto como emisor, como receptor. En este caso, el material y el espesor del cristal piezoeléctrico determinan la frecuencia natural y, a menor espesor, mayor es la frecuencia de resonancia. Por bajo tanto, es común que los transductores de alta frecuencia sean cristales de muy poco espesor; sin embargo, pocos casos presentan problemas ya que típicamente las inspecciones por ultrasonido están por debajo del valor de 10 MHz.

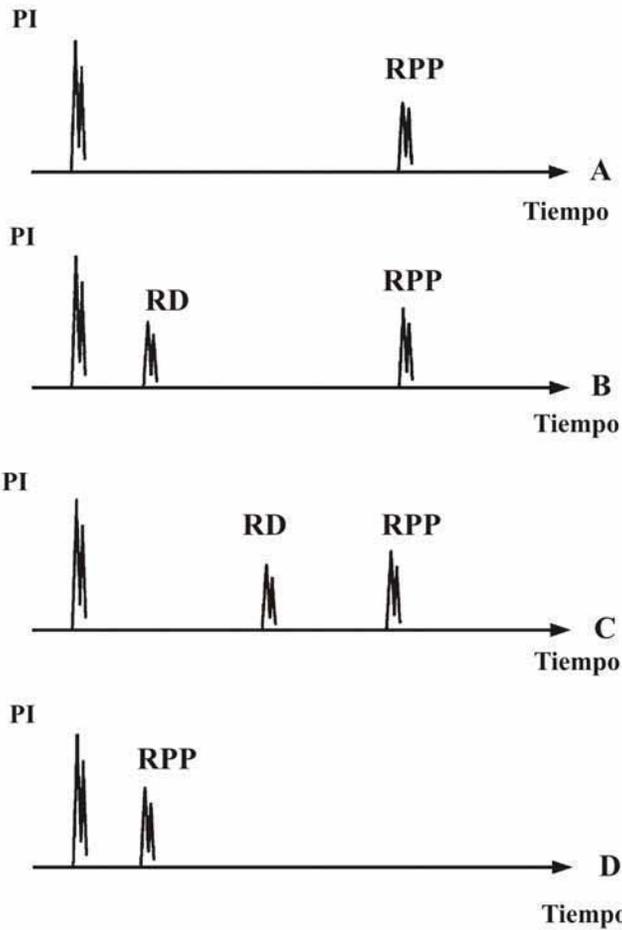
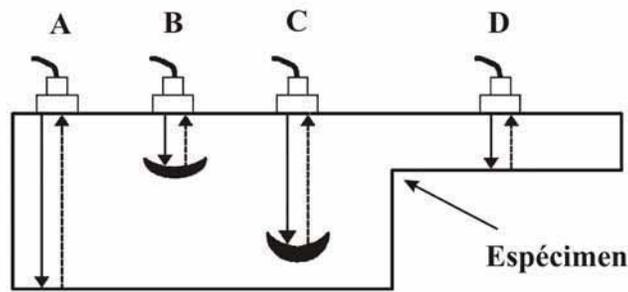
El amortiguamiento del material de soporte del cristal del transductor, determina el ancho de banda de la señal de ultrasonido (es decir, la dispersión de la frecuencia que emite el transductor con determinado tipo de distribución y cuyo valor promedio es la frecuencia de resonancia). Un ancho de banda pequeño, proporciona una buena penetración y sensibilidad, pero poca resolución. Por el contrario, un ancho de banda muy amplio logra buena resolución con poca sensibilidad y penetración.

5.1.7 Formatos para la presentación de datos

Las señales de ultrasonido pueden desplegarse en varios barridos (scans), o formatos que ofrecen alternativas para la interpretación de los resultados. Existen tres tipos de barridos (scans), o formatos para la presentación de resultados: Barrido-A (A-Scan), Barrido-B (B-Scan), y Barrido-C (C-Scan).

Barrido-A

El formato de despliegue de información más conocido o utilizado es el llamado Barrido-A; consiste en la simple presentación de la señal de ultrasonido que se recibe, como una función del tiempo (figura 5.23). Con el formato de Barrido-A un defecto se localiza por la indicación en el eje del tiempo que produce el reflejo de la onda sonora. En la figura 5.23 (caso D), se nota que cuando el defecto es suficientemente grande, el reflejo de la onda sonora es completo y se pierde la referencia del reflejo en la cara posterior. En este tipo de formato, el tamaño del defecto se estima en función del tamaño del reflejo que éste produce.



PI = pulso inicial
 RD = reflejo por el defecto
 RPP = reflejo en parte posterior

Figura 5.23
 Respuestas típicas del sondeo, tipo A (Scan-A) para diferentes posiciones.
 Nótese que se muestra la respuesta en el transductor como función del tiempo.

Barrido-B

Permite un formato de presentación en el cual se sincroniza el tiempo de retorno de la señal con la posición geométrica del transductor en un eje determinado (figura 5.24). En este caso, se grafica el tiempo de reflexión como función de la posición; por tanto, permite localizar un defecto por su profundidad respecto al espesor de la pieza. Aunque la intensidad del reflejo de un defecto no se mide como en el Barrido-A, su tamaño se puede inferir a través de la resolución del pico recibido con este tipo de formato.

El Barrido-B equivale a un corte transversal de la pieza en el cual se muestra el perfil del espesor entre las superficies frontal y posterior, y los defectos se manifiestan como cambios en dicho perfil. La principal ventaja radica en la facilidad para conocer la distribución geométrica de los (figura 5.24), por lo que resulta ser el más adecuado para aplicaciones médicas.

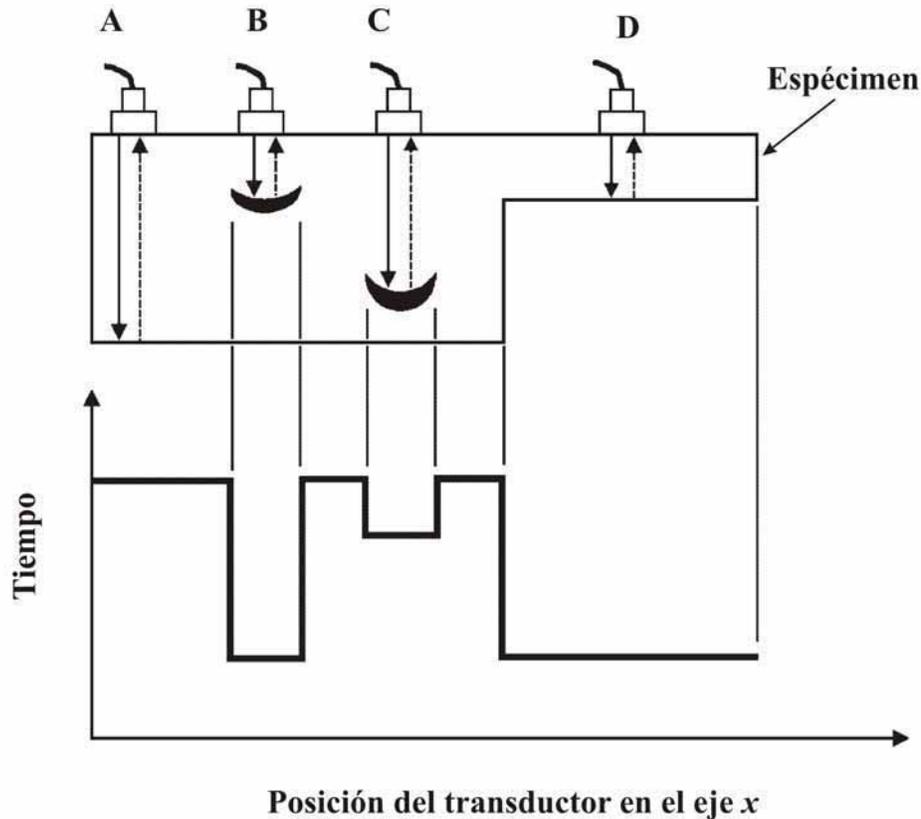


Figura 5.24

Respuesta típica del sondeo, tipo B (Scan-B). Nótese que se muestra la respuesta del transductor como función de una coordenada espacial (eje x)

Barrido-C

En la figura 5.25 se muestra el tipo de despliegue que se obtiene con este tipo de barrido; básicamente consiste en una grafica del tiempo de reflejo de la señal sonora en un plano coordenado de dos dimensiones. Así, la magnitud del tiempo se relaciona con una escala de colores, y los defectos se manifiestan por los cambios en éstos. Una aplicación ventajosa es cuando se relaciona con planos o dibujos de las piezas que se inspeccionan, facilitando la interpretación y análisis de resultados. En la figura 5.25, se indica la profundidad relativa, forma, tamaño y localización de los defectos en una pieza. Nótese, por ejemplo, que la grieta A se presenta en un diferente plano que la B, y su longitud es mucho mayor.

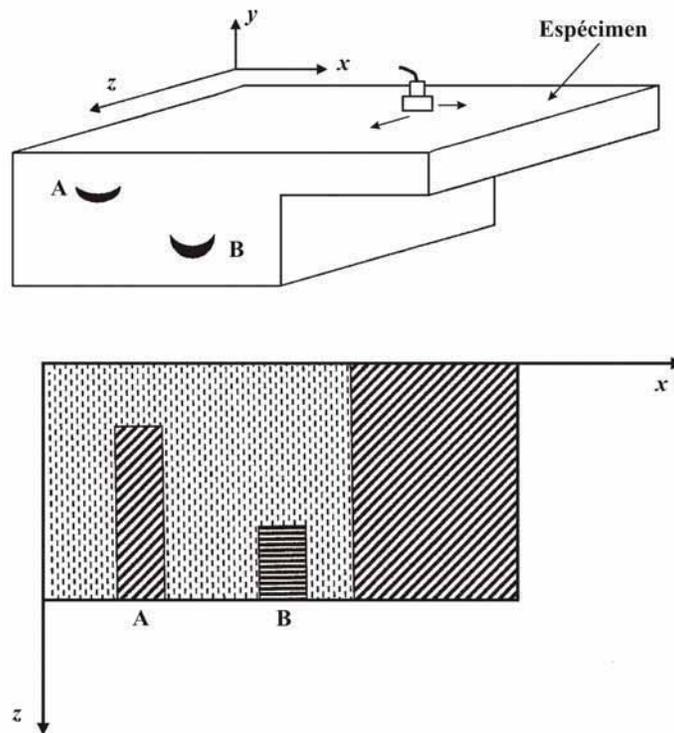


Figura 5.25

Respuesta típicas del sondeo, tipo C (Scan-C). Nótese que se muestra la respuesta del transductor como función del espacio en dos dimensiones(x,y)

5.1.8 Ventajas y desventajas del ultrasonido

A continuación se enlistan las principales ventajas y desventajas que tiene la inspección no destructiva por ultrasonido.

5.1.8.1 Ventajas

- + Los defectos superficiales e internos pueden detectarse en objetos de tamaño relativamente grandes
- + Una amplia gama de materiales metálicos y no metálicos con diferentes espesores, pueden ser inspeccionados
- + Se puede obtener información detallada de los defectos (tamaño, orientación y localización)
- + Las dimensiones del objeto se pueden medir por medio del ultrasonido
- + Existe muy amplia variedad de técnicas para obtener y presentar los resultados que se puedan adecuar a una aplicación particular
- + El método es portátil, y se puede utilizar en campo
- + Los resultados se obtienen en tiempo real, y ser almacenados por medios electrónicos
- + Permite la automatización de inspecciones rutinarias
- + Son inspecciones de bajo costo
- + El ultrasonido tiene muy alta sensibilidad para detectar defectos relativamente pequeños
- + Únicamente se necesita tener acceso a una superficie de la pieza
- + Requiere poca preparación previa a la inspección, aunque la superficie debe estar limpia

5.1.8.2 Desventajas

- Al menos, una superficie de la pieza debe estar accesible
- Las superficies rugosas presentan problemas de inspección
- Se requiere un material acoplador entre el transductor y la pieza
- Las inspecciones son muy sensibles a la dirección del haz de ultrasonido con la orientación del defecto
- Las grietas muy cerradas pueden ser difíciles de detectar
- El inspector debe contar con un nivel de entrenamiento y capacitación relativamente alto para manejar el equipo, e interpretar los resultados
- Aunque se puede obtener una imagen del defecto, la técnica para ello es sumamente compleja
- Para inspeccionar grandes superficies es necesario contar con sistemas especiales
- La inspección de geometrías complejas puede ser impráctica o imposible

5.2 Radiografía Industrial

Una de las primeras técnicas de inspección no destructiva que tuvo un amplio y rápido desarrollo es la radiografía industrial, que a partir del descubrimiento de los rayos X por Pierre y Marie Curie, ha encontrado varias aplicaciones en diferentes campos, entre los cuales la medicina es uno de los más importantes, junto con el desarrollo de la tecnología y el descubrimiento de otros tipos de radiación, como la gamma, los neutrones o las partículas alfa

Actualmente la radiografía industrial no sólo se refiere a los rayos X, sino a cualquier tipo de radiación. Hoy por hoy, estas técnicas se utilizan en diferentes ramas de la industria por su amplia versatilidad y fácil aplicación, aunque los requerimientos de seguridad son muy estrictos.

El principio básico de la radiografía se apoya en que la radiación pasa a través de un material y ésta se absorbe según su densidad, tipo o estructura. Se pueden distinguir dos materiales con diferentes densidades o características, al igual que identificar la presencia de porosidades o huecos en un material sólido. Las variaciones de espesor y cambios geométricos son detectables con estas técnicas, y la radiación se mide en forma indirecta mediante una placa fotosensible cuya intensidad de impresión es proporcional a la intensidad de la radiación que llega a pasar.

Existen varias formas para generar la radiación, siendo las más comunes el tubo de rayos catódicos, los isótopos radiactivos o las fuentes de neutrones. En general, la radiografía industrial es una técnica muy apropiada para identificar defectos volumétricos, tales como las porosidades o los huecos; en cambio, los defectos superficiales, como las grietas o capas de adherencia, son difíciles de detectar o identificar.

5.2.1 Principios básicos

Un esquema del espectro electromagnético y de relación con los parámetros de longitud de onda, λ , frecuencia, f , y energía, E , se muestra en la figura 5.26; las relaciones entre esos parámetros están dadas por las ecuaciones 5.12 y 5.13.

$$c = \lambda f \quad (5.12)$$

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (5.13)$$

Donde: λ = longitud de onda de la radiación (m)
 f = frecuencia de la radiación (Hz)
 E = energía del fotón (Joules)
 c = velocidad de la luz (3.0×10^8 m/s)
 h = constante de Planck (6.624×10^{-32} Joules-s)

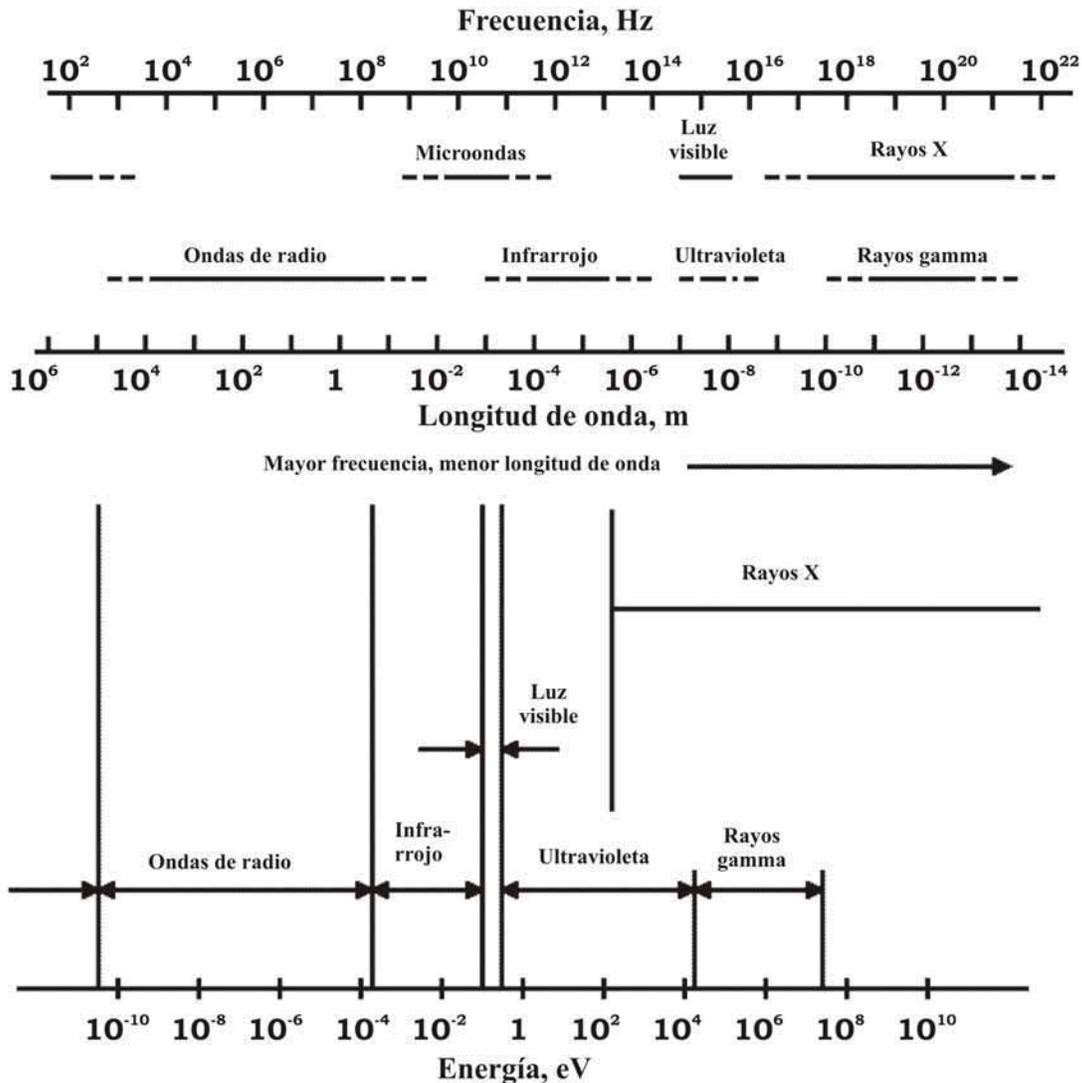


Figura 5.26
Espectro electromagnético en términos de la frecuencia, longitud de onda, y energía

En 1895 Guillermo Conrado Roentgen ^[24,25] descubrió que los rayos X son capaces de atravesar objetos sólidos, por lo que de alguna manera permiten “ver” su interior. Esta capacidad de pasar a través de la materia se debe a que la radiación X y gamma tienen una longitud de onda muy pequeña (10^{-9} – 10^{-14} m) con una energía electromagnética muy alta.

En la figura 5.27 se muestra un diagrama del principio básico sobre el cual se basa la inspección por rayos X; como se puede apreciar, la radiación pasa a través del objeto que se desea inspeccionar y llega a una película sensible a la radiación en la que se imprime una imagen cuyos contrastes de intensidad dependen de la

cantidad de radiación que haya llegado a ésta; la variación de intensidad en esta película es proporcional al espesor del material y la atenuación que sufre la radiación por atravesar al mismo y que depende de sus características intrínsecas (principalmente la densidad). Como los defectos dentro del material (huecos, grietas, heterogeneidades) influyen en la absorción de radiación, su presencia detecta a través de las variaciones de intensidad en la placa fotosensible. Nótese en la figura 5.27 que los cambios más significativos se presentan cuando la dimensión mayor del defecto se orientada en dirección paralela al haz de los rayos X.

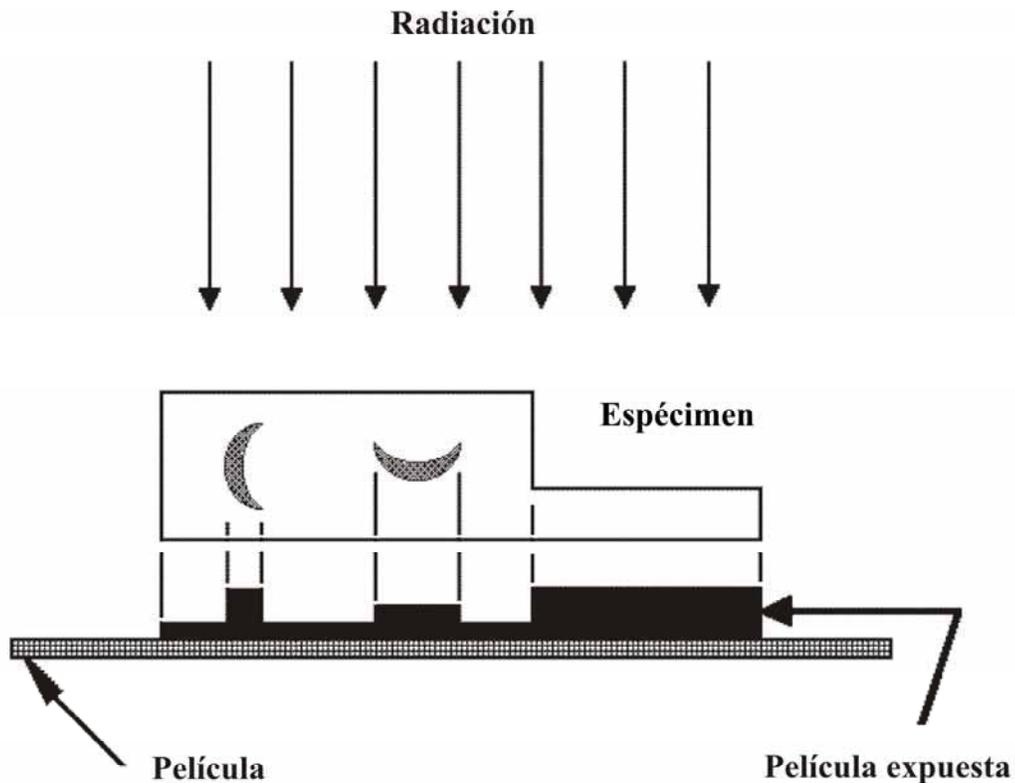


Figura 5.27
Esquema representativo de la formación de imágenes en una placa por radiografía industrial

La inspección por rayos X involucra varias etapas, entre las que destacan las siguientes: 1ª etapa. Exposición del objeto de prueba a la radiación; 2ª etapa. Procesamiento de la imagen obtenida por un sensor sensible a la radiación, y que se coloca en el extremo opuesto del objeto, respecto a la fuente radioactiva; 3ª etapa. Interpretación de la imagen; y 4ª etapa. Elaboración del reporte en el que se presentan los resultados en forma clara y concisa. Para lograr todo lo anterior, además de la pieza que se va a inspeccionar se requiere una fuente de radiación y

del material de registro o sensor. Como se discutirá adelante, las fuentes radioactivas pueden ser de rayos X (producidos por un tubo de rayos catódicos), rayos gamma (generados por el decaimiento de materiales radioactivos), o partículas subatómicas que resultan de las reacciones nucleares, o del decaimiento nuclear (tales como neutrones, partículas alfa, partículas beta, etc). Los sistemas de registro, generalmente se componen de una película fotográfica, pantallas fluorescentes o dispositivos electrónicos sensibles a la radiación. Estos sistemas de registro se clasifican en tres tipos principales:

1er tipo: Películas o papel radiográfico

En estos casos la información se registra en una película que necesita de un revelado para obtener la imagen que va a ser analizada.

2º tipo: Radiografía en tiempo real o radioscopia

En estos casos, la imagen se registra en una pantalla y se observa en tiempo real, permitiendo manipular la pieza durante la inspección y lograr una mejor orientación respecto al tamaño y localización de los defectos observados.

3er tipo: Tomografía computarizada (CT)

Este proceso involucra la exposición del objeto desde varios ángulos para obtener una imagen del corte transversal del mismo, y poder ubicar perfectamente un defecto y conocer su orientación y tamaño.

5.2.2 Absorción y dispersión

El fenómeno físico que hace posible la inspección por rayos X es el que la radiación se absorbe o dispersa en diferente forma cuando atraviesa materiales diversos. Así, la intensidad de la radiación que llega a la placa depende de las propiedades del material que hacen que tenga un mayor o menor grado de atenuación. Estas variaciones en la absorción son las que propician una imagen que puede servir para la inspección no destructiva.

La intensidad de la radiación que viaja en vacío decrece inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente, es decir:

$$I_x \sim \frac{I_0}{r^2} \quad (5.14)$$

Adicionalmente al efecto de disminución por la distancia, la intensidad de la radiación disminuye cuando pasa a través de la materia por efecto de la dispersión o absorción que resulta de la interacción de ésta con la materia. En general, el modelo matemático que describe la interacción se expresa mediante la fórmula:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (5.15)$$

Donde,

I_0 = intensidad inicial de la radiación en la superficie del objeto

I_x = intensidad de la radiación a una distancia x de la superficie

μ = coeficiente de absorción lineal (m^{-1})

Los valores del coeficiente de absorción como función de la energía incidente de rayos X para el plomo, hierro y aluminio se muestran en la figura 5.28 [20]. Es importante destacar que el coeficiente de absorción depende de la radiación y del material, por lo que para un mismo tipo de radiación el plomo absorbe más que el aluminio. Al despejar la incógnita x de la ecuación 5.15, ésta puede ser utilizada para determinar el espesor de un material si se miden las intensidades incidente y saliente de la radiación, es decir:

$$x = \frac{1}{\mu} \left[\ln \left(\frac{I_0}{I_x} \right) \right] \quad (5.16)$$

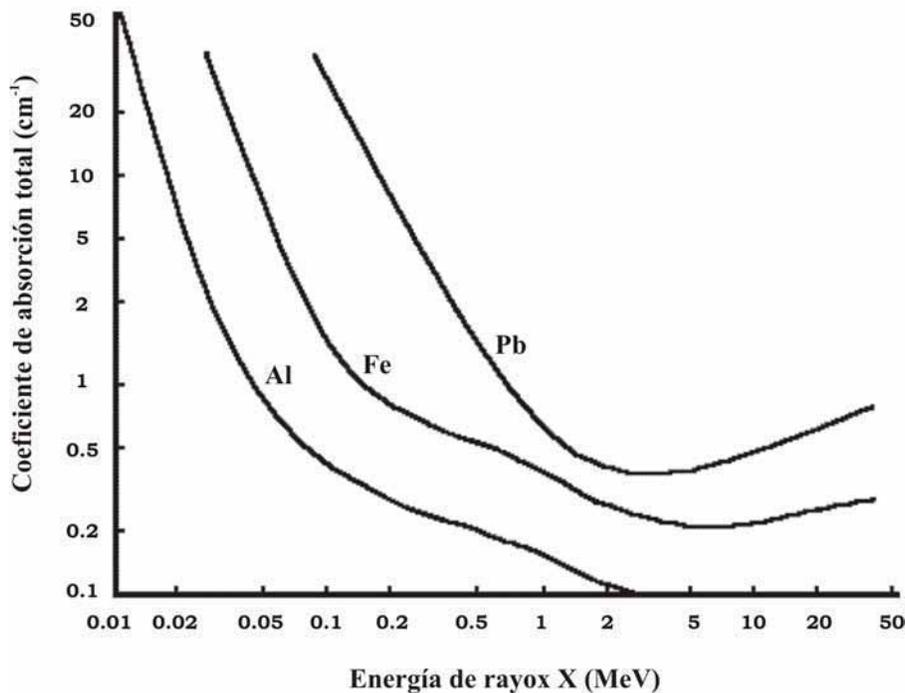


Figura 5.28
Coeficientes de absorción total en función de la energía para plomo, hierro y aluminio

Al espesor de un material que hace que la intensidad de la radiación disminuya un 50% respecto a la intensidad incidente, se le llama espesor de decaimiento medio, o HVT (por sus siglas en inglés). Así, de la ecuación (5.16) se tiene que el espesor x_{HVT} es:

$$\text{HVT} = x_{\text{HVT}} = \frac{1}{\mu} \ln \left[\frac{1}{0,5} \right] = \frac{1}{\mu} 0,693$$

De la figura 5.28, se obtiene que una radiación de 0,5 MeV pierde el 50% de su intensidad al atravesar una placa de plomo con un espesor de $\frac{0,693}{1,7} = 0,4$ cm. En comparación con el espesor anterior, si esa misma radiación atraviesa una placa de aluminio, el HVT es de $\frac{0,693}{0,23} = 3,0$ cm; es decir, casi ocho veces mayor que el espesor del plomo.

Al igual que el espesor de decaimiento medio (HVT), se puede definir el de decaimiento al 10% o TVT (Tenth Value Thickness), y cuyo valor se obtiene a partir de la ecuación 5.16; corresponde a:

$$\text{TVT} = x_{\text{TVT}} = \frac{2,303}{\mu}$$

De manera similar, los valores TVT del plomo y aluminio para una radiación incidente de 0,5 MeV, son de 1,4 y 10 cm respectivamente.

A pesar de que la interacción de la radiación con la materia es muy compleja, es factible describirla de manera general a partir de cuatro diferentes procesos de interacción que se describirán adelante y que dependen fundamentalmente de la energía, E , de la radiación, o de los fotones.

Dispersión Rayleigh

Este mecanismo de interacción de la radiación con la materia ocurre cuando la radiación es de baja energía ($E < 0,1$ MeV), y su efecto es poco relevante en el análisis de la radiografía industrial. En general, en este proceso ocurre un cambio de dirección del fotón incidente, sin que haya intercambio o pérdida de energía. En este caso, el fotón es ligeramente dispersado con dirección hacia delante.

Efecto fotoeléctrico

Es el mecanismo predominante con radiación de baja energía ($E < 0,5$ MeV); ocurre cuando el fotón incidente interactúa con la capa externa de electrones de un átomo. Al ocurrir el efecto fotoeléctrico, toda la energía del fotón se transforma en energía cinética de los electrones generando una corriente eléctrica y, por tanto, la radiación es totalmente absorbida por el material.

Dispersión Compton

Es la forma de interacción más importante para energías intermedias ($0,1 < E < 3,0$ MeV), y se presenta cuando la radiación interactúa con la capa exterior de electrones de un átomo. En esta situación, la radiación no se absorbe totalmente; sólo pierde parcialmente su energía y cambia de dirección. La radiación saliente se denomina radiación secundaria, y por lo general el cambio de dirección es significativo, así que cuando ésta atraviesa el material del objeto que se inspecciona y llega a la placa fotosensible, produce una imagen difusa que se interpreta como ruido aleatorio. Cabe destacar que este tipo de interacción puede ocurrir varias veces dentro de la pieza antes de que el fotón salga.

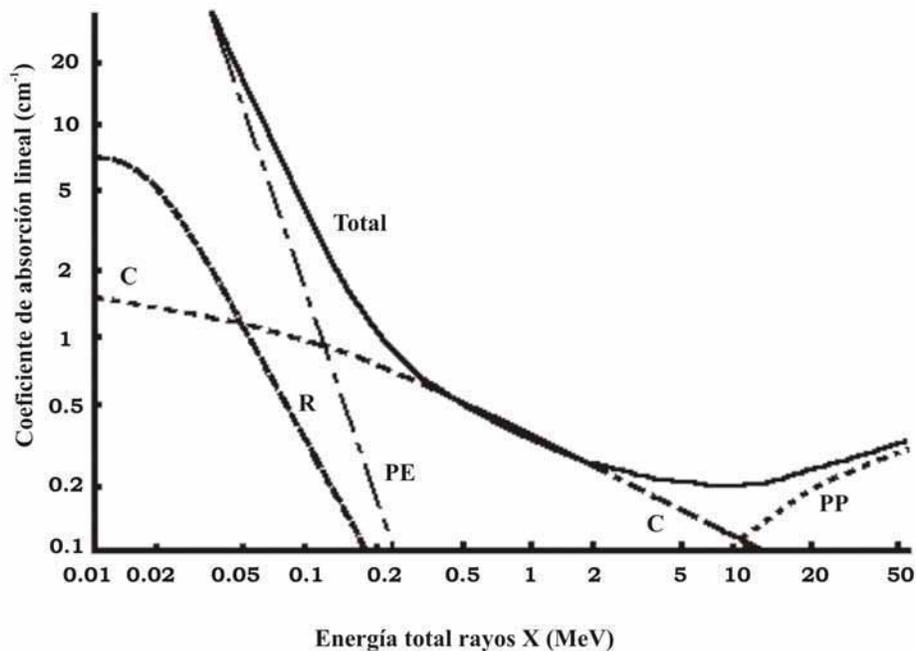


Figura 5.29

Componentes del coeficiente de absorción para el hierro, como función de la energía: C por dispersión Compton; R por dispersión Rayleigh; PE por efecto fotoeléctrico, y PP por producción de pares

Producción de pares

Cuando la radiación tiene una energía mayor de 1.02 MeV, su interacción con la materia puede ser de tal manera que ocurra el fenómeno llamado producción de pares, que es cuando la radiación interactúa con el núcleo de un átomo, y toda su energía se transforma para producir dos partículas, un electrón y un positrón. El electrón queda libre en el material, pero el positrón es una partícula de vida muy

corta, ya que en forma casi inmediata interactúa con algún otro electrón para producir dos fotones de energía $E=0,51$ MeV cada uno y que viajan en direcciones opuestas. Esta radiación de menor energía es factible que siga interactuando con la materia para ser absorbida o dispersada siguiendo alguno de los mecanismos descritos.

La figura 5.29 muestra una gráfica típica del coeficiente de absorción, μ , del hierro y la contribución individual de la dispersión Rayleigh; la dispersión Compton; el efecto fotoeléctrico, y la producción de pares. Es importante destacar que existe un nivel de energía para el cual el coeficiente de atenuación tiene un valor mínimo; por tanto, es la radiación con mayor penetración en el material.

5.2.3 Fuentes de radiación

Se describirán en forma detallada las fuentes de radiación más utilizadas en la radiografía industrial. De manera general, las fuentes se clasifican en tres grupos: fuente de rayos catódicos; isótopos radiactivos, y fuentes de neutrones.

5.2.3.1 Fuentes de Rayos X

Los rayos X se producen en un tubo de vacío cuando un haz de electrones de alta energía, se impacta en un blanco de alta densidad (ánodo), (figura 5.30).

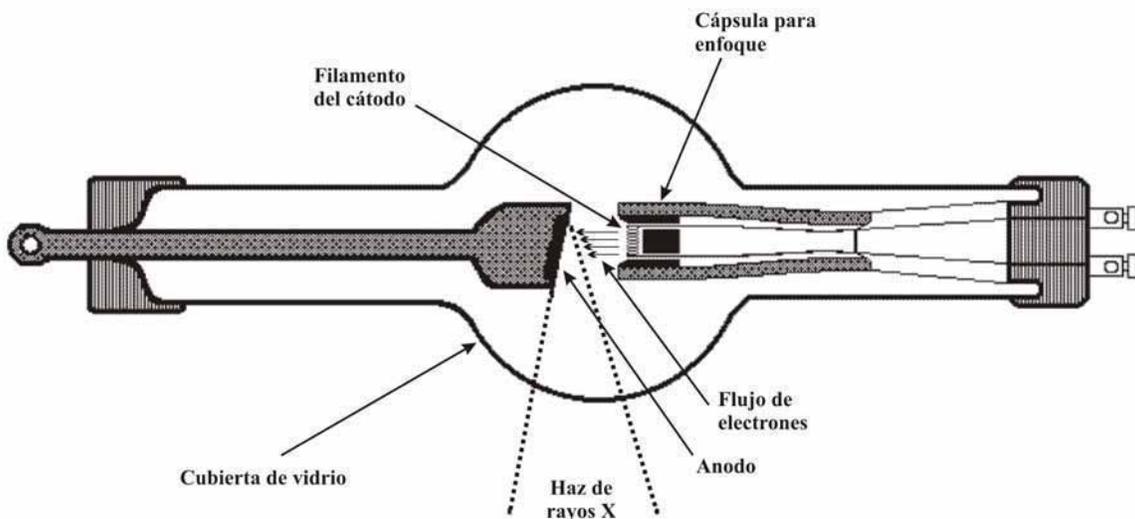


Figura 5.30
Diagrama de una fuente de rayos X de tubo catódico

En este tipo de fuentes, el blanco es generalmente de tungsteno, pero inclusive oro y platino pueden emplear si se dispone de un sistema de enfriamiento adecuado. La corriente eléctrica en el filamento (cátodo) controla el flujo de electrones emitidos, las temperaturas en el cátodo y el ánodo, y la intensidad del haz de rayos X; por tanto, también controla indirectamente el tiempo de exposición para obtener una radiografía. El voltaje entre el ánodo y cátodo rige la energía del haz de electrones y, por ende, la energía subsecuente del haz de rayos X.

La reacción a nivel atómico para generar rayos X ocurre cuando los electrones chocan con el núcleo de los átomos del blanco y lo llevan a un nivel de energía de rápido decaimiento, que resulta en la emisión de la radiación X. Algunos electrones, sin embargo, chocan primero con la capa exterior de electrones del átomo y pierden energía antes de chocar con el núcleo para generar una radiación de menor energía, con lo que resulta un espectro de mayor amplitud en energía con varios picos específicos (figura 5.31).

Los picos característicos de energía están asociados con los cambios de órbita de los electrones que ocurren para llenar los huecos que dejan aquellos que salen despedidos por efecto de la colisión inicial, y corresponden normalmente a las capas L y K del átomo. La radiación asociada con los picos característicos es lo suficientemente adecuada para los estudios de difracción y espectrometría, pero no muy útil en la radiografía industrial. Por otro lado, el amplio espectro de la radiación con un extenso rango de longitudes de onda o energía, se denomina “radiación blanca” o “bremsstrahlung” y se emplea en la inspección no destructiva.

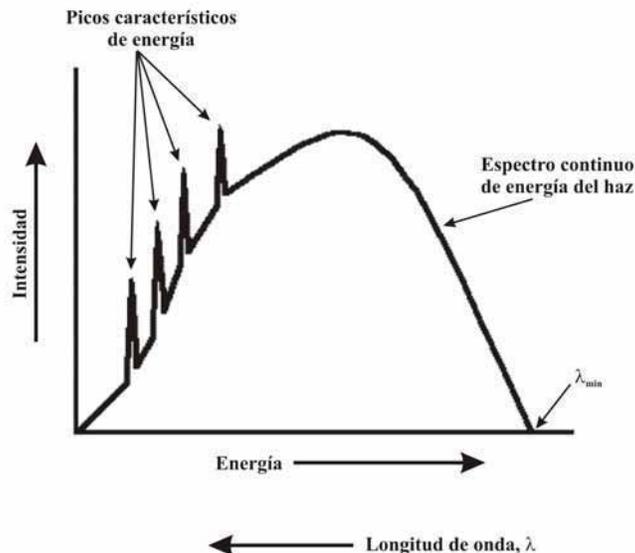


Figura 5.31
Densidad de distribución de la intensidad de rayos X como función de la longitud de onda o voltaje

Como ya se mencionó, la intensidad de los rayos X depende del flujo de electrones que impactan el material utilizado como blanco, y éste último de la corriente que fluye por el filamento. A pesar de que la radiación emitida por un tubo de rayos catódicos tiene un amplio espectro de longitudes de onda, típicamente se caracteriza a través de su longitud de onda mínima λ_{\min} (o máximo nivel de energía).

Dado que el voltaje que acelera los electrones determina la energía de éstos y, por consecuencia, la energía de la radiación emitida, la potencia de una fuente de radiación de este tipo se define con respecto al voltaje asociado con la longitud de onda mínima, λ_{\min} en el espectro de los rayos X; así, por ejemplo, se definen fuentes de rayos X con potencias de 200 keV o 20 MeV. Mediante la ley de Planck expresada en la ecuación 5.13, λ_{\min} define la energía máxima de la radiación, y especifica la potencia máxima de penetración.

Existen varios aspectos fundamentales que deben ser considerados en la selección del material que sirve de blanco en un tubo de rayos catódicos, que son el calentamiento del ánodo; la vida útil, y el ancho del haz de radiación. El calentamiento del blanco es importante, ya que entre el 1 y 10% de la energía del electrón es convertida en rayos X y el resto en energía térmica.

Por lo anterior, para evitar el sobrecalentamiento del blanco es necesario que la fuente cuente con un sistema de enfriamiento (aire, agua o aceite) para remover el calor acumulado, lo que representa un aspecto importante en el diseño de estos dispositivos. El tungsteno es el material más común para fabricar el blanco por tener el una temperatura de fusión muy alta; pero igualmente se utilizan el oro o el platino, considerando que ambos requieren un buen sistema de enfriamiento, pues su punto de fusión es menor al del primero.

La vida útil se especifica en términos de la disponibilidad del equipo y se mide como el porcentaje de tiempo utilizado con respecto al tiempo total. En general, un equipo que se utiliza en campo se diseña para una vida útil del 30%, mientras que un equipo de laboratorio es para 60 y 70%.

Los tubos de rayos catódicos también se clasifican con respecto al tamaño del área focal o ancho del haz de rayos X. Por lo general, imágenes muy finas se obtienen con un haz fino de área pequeña. Los equipos convencionales cuentan con un haz de diámetro entre 2 y 5 mm (0,08 a 0,2 pulg). Hay fuentes con microenfoque que ajustan el ancho focal hasta diámetros de 0,005 a 0,05 mm (0,0002 a 0,002 pulg). En las fuentes de microenfoque el calor tiende a concentrarse excesivamente en un área muy pequeña del blanco y el enfriamiento es particularmente complejo, por lo que normalmente utilizan bajo voltaje para que la energía de los electrones no sea muy alta, limitando la capacidad de penetración de los rayos X y por lo general el blanco tiene que cambiarse con mayor frecuencia que en los equipos convencionales. La gran ventaja de las fuentes de microenfoque es su aplicación para componentes pequeños, circuitos miniatura, o tubos de diámetros reducidos.

5.2.3.1.1 Fuentes de rayos X de alta energía

Los tubos de rayos catódicos convencionales están limitados a potenciales máximos de 450 kV, por lo que se requiere de diseños especiales para lograr potencias de salida mayores de este valor. A continuación se describirán brevemente algunos diseños.

Transformadores sincronizados

Fueron desarrollados en los años 40's para obtener rayos X con energías entre 1 y 2 MeV's. El principio básico del diseño consiste en poner en resonancia un transformador sincronizado que tiene un núcleo de aire dentro de un contenedor aislado con un tubo de rayos catódicos seccionado. La complejidad y tamaño de los equipos han hecho que actualmente no se utilicen ni fabriquen.

Generadores Van de Graaf

Se basan en principios electrostáticos y se han empleado para producir rayos X de 1 a 8 MeV's. Su principal ventaja radica en que se pueden enfocar en un área muy pequeña (0,2 mm), pero su uso es más apropiado para irradiación que para la inspección no destructiva.

Betatrones

Son aceleradores de electrones que producen rayos X de hasta 30 MeV. Pueden enfocar la radiación en un área pequeña, pero son equipos muy grandes y complejos, de ahí que generalmente se remplazan por aceleradores lineales de electrones (LINACS), que tienen una menor potencia (hasta 25 MeV's) y se pueden enfocar igualmente en una zona pequeña menor de 2 mm.

5.2.3.1.2 Niveles de energía

Voltaje convencional

Corresponde a voltajes menores de 1 MeV, y el intervalo más común es entre 40 y 400 kV. Una de las ventajas de manejar estos rangos es que los equipos son económicos, fáciles de blindar y la razón de absorción en la mayoría de los materiales es más sensible a cambios, por lo que son muy adecuados en la inspección no destructiva. La principal desventaja es la poca capacidad de penetración, y los prolongados tiempos de exposición.

Radiografía de alto voltaje

Los equipos de alto voltaje son aquellos que se diseñan para obtener energías mayores de 1 MeV y radiación con suficiente capacidad de penetración en la mayoría de los materiales, y con ello reducir los tiempos de exposición. Otra ventaja de la radiación de alta energía es que se logran imágenes de alta resolución ya que casi toda la radiación se dispersa hacia delante, reduciendo de la radiación secundaria.

En general, esta radiación se recomienda para objetos de geometría compleja, que tienen espesores variables, o cuando se inspeccionan áreas que no pueden estar en contacto directo con la placa fotosensible. Las principales desventajas son que no se logran imágenes con alto contraste y que requieren complicados procedimientos de seguridad radiológica, con el consecuente alto costo que implica.

5.2.3.2 Fuentes de rayos gamma

La radiación gamma tiene las mismas características que los rayos X, pero con mayor energía; se produce por el decaimiento de los isótopos radiactivos. Las fuentes naturales de radiación generalmente no se utilizan para la radiografía, e inclusive, en algunos países se prohíbe su uso. Los isótopos radiactivos artificiales que se obtienen de la fisión nuclear o por irradiación en un reactor nuclear, se emplean ampliamente en la evaluación no destructiva, siendo los más comunes los de la tabla 5.6.

Tabla 5.6
Isótopos radiactivos empleados para la inspección con radiación gamma

Elemento radiactivo	Vida media	Energía (MeV)	Aplicación
Yterbio 169 (Yb ¹⁶⁹)	31 días	0,063 0,308	Placas delgadas
Tulio 170 (Tm ¹⁷⁰)	127 días	0,084 0,540	Aleaciones ligeras, y acero de hasta 0,5"
Iridio 192 (Ir ¹⁹²)	74 días	0,137 0,651	Acero de hasta 2,5" (95% de las aplicaciones)
Cesio 137 (Cs ¹³⁷)	33 años	0,660	Aceros de hasta 3,5" de espesor
Cobalto 60 (Co ⁶⁰)	5,3 años	1,770 1,330	Aceros de hasta 9" de espesor (4% de las aplicaciones)

Hay tres aspectos fundamentales para seleccionar un isótopo radiactivo y aplicado en la radiografía industrial: una vida media adecuada para evitar cambios constantes o recargas; altos niveles de emisión radiactiva en el uso de fuentes

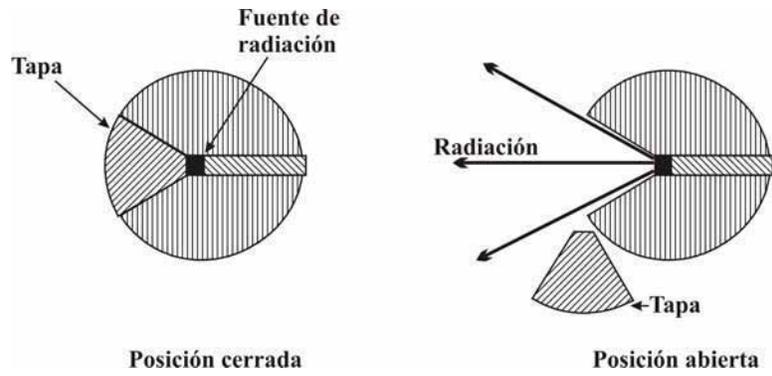
pequeñas; y un costo razonable. Como un isótopo radiactivo no se puede “apagar”, es necesario cumplir con una serie de procedimientos y requisitos de seguridad para el manejo, almacenamiento y uso de los mismos, lo cual está generalmente regulado por algún organismo que en el caso de México es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). Uno de los requisitos más importantes es empleo de contenedores especiales que tengan el blindaje suficiente para evitar que el operador quede expuesto a la radiación. En la figura 5.32 se muestran dos contenedores de isótopos radiactivos para la radiografía industrial. En estos casos, es importante tomar en cuenta que el tamaño de la fuente radiactiva corresponde al tamaño del punto focal de una fuente por rayos catódicos.

5.2.3.3 Radiografía con neutrones

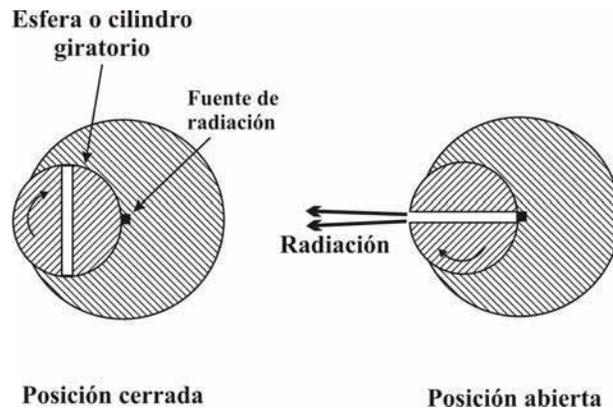
Los neutrones son partículas subatómicas que se caracterizan por tener una masa relativamente grande y carga neutra. Fueron descubiertos por Chadwick en 1932, y Kallman fue el primero en utilizarlos para radiografía en 1935 ^[18]. Los neutrones se obtienen de reactores nucleares, aceleradores de partículas, y de algunos isótopos radiactivos; además, pueden tener distintos niveles de energía (tabla 5.7). Los neutrones térmicos son los más empleados en la inspección no destructiva por ser fáciles de detectar y tener características favorables de atenuación (pueden ser absorbidos por materiales transparentes para la radiación X).

Tabla 5.7
Clasificación de la radiación de neutrones por su nivel de energía

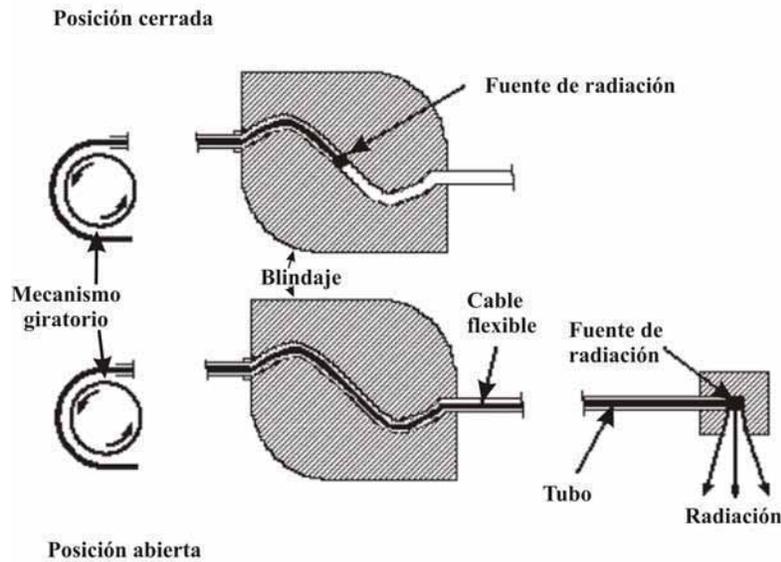
Neutrones	Nivel de energía (eV)
Fríos	< 0,01
Térmicos	0,01 a 0,3
Lentos	0 a 10 000
Epitérmicos	0,3 a 10 000
Resonancia	1 a 100
Rápidos	10 000 a 20×10^6
Relativísticos	$> 20 \times 10^6$



a) Contenedor de rayos gamma con tapa removible



b) Contenedor con fuente de rayos gamma con centro rotatorio



c) Contenedor con fuente de rayos gama en cable flexible

Figura 5.32
Contenedores típicos de isótopos radiactivos [20]

Experimentalmente se ha encontrado que las radiaciones X y gamma interactúan con los electrones que orbitan alrededor del átomo; por tanto, su coeficiente de atenuación se incrementa con la densidad y el número atómico de los elementos. Por otro lado, como los neutrones interactúan fundamentalmente con los núcleos atómicos, su factor de atenuación tiene una tendencia inversamente proporcional a la masa atómica de los isótopos, pero como también influye la afinidad de los núcleos para absorber o repeler neutrones, no es extraño que se presente una dispersión muy grande en esta tendencia. Así, elementos de baja densidad como el hidrógeno, litio o boro, dejan pasar fácilmente la radiación X y atenúan fuertemente los neutrones; en cambio, elementos de alta densidad como el plomo, bismuto o uranio absorben fácilmente la radiación X y dejan pasar los neutrones. De esta manera, los rayos X o gamma se complementan con la radiación de neutrones, ya que estos últimos se pueden utilizar en materiales que no atraviesan los rayos X.

Los neutrones pueden ser detectados con las mismas películas o placas fotosensibles que se utilizan para la radiación X; los neutrones térmicos, con pantallas fluorescentes; en general para neutrones de alta energía, suelen emplearse trazadores de trayectorias (como cámaras de niebla). La radiografía con neutrones se aplica principalmente en la inspección de sellos de hule, o contenedores o camisas de explosivos en la misma forma que se hace para detectar corrosión en ensambles metálicos, o para evaluar la adherencia en ensambles de aluminio. En algunos casos, como los álabes de las turbinas de motores de avión, al material compuesto se le agrega una pequeña cantidad (1-3%) de óxido de gadolinio (Gd_2O_2) para incrementar su coeficiente de atenuación, así como su sensibilidad a los neutrones y facilitar la inspección no destructiva.

5.2.4 Formación de imágenes

El conocimiento de las técnicas para obtener imágenes por radiografía, es tan importante como la aplicación de la técnica misma de inspección, por lo que en esta sección se presenta una revisión general de las que se utilizan en la detección de la radiación y generación de imágenes útiles para la evaluación de componentes o materiales.

5.2.4.1 Películas

Las películas fotosensibles son las más utilizadas para registrar imágenes de una radiografía, y típicamente se componen de sales de algún haluro de plata sensibles a la radiación, y que una vez revelados tienen una diferente intensidad, dependiendo de la cantidad de radiación a que estuvieron expuestas. En las películas hay dos parámetros importantes que deben controlarse: la densidad de la película, y el tiempo de exposición.

Densidad

La densidad de una película fotosensible, D , se define como:

$$D = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_t} \right) \quad (5.17)$$

Donde,

I_0 = intensidad de la radiación que incide en la película

I_t = intensidad de la radiación que pasa a través de la película

Por ejemplo, si el 1% de la radiación incidente pasa a través de la película, entonces de la ecuación 5.17 se tiene una densidad $D=2$.

Exposición

La exposición para una radiografía, E , es la dosis de radiación que recibe la película fotosensible, es decir, la intensidad de radiación por el tiempo que la placa se expone a ésta:

$$E = \text{intensidad} * \text{tiempo de exposición}$$

Curva de exposición

Como la densidad en una película para radiografía, generalmente no varía en forma lineal con la exposición, es necesario contar con las curvas de exposición para los diferentes tipos de película y procesos de revelado, semejantes a las de la figura 5.33 [26]. Para obtener curvas como las de la figura, se requiere que diferentes porciones de una película reciba diversos niveles de exposición y revelado. A partir de esta curva y buscando siempre el mejor contraste, se define el tiempo de exposición para obtener una buena imagen en una aplicación específica. Como la relación entre exposición y densidad es no lineal, una diferencia esperada de densidades determina la exposición, de manera que tenga el máximo gradiente esta diferencia. Así, es posible obtener radiografías que resalten mejor determinados espesores y otros no, según sea necesario.

5.2.4.2 Pantallas fluorescentes

Se utilizan para imágenes radiográficas en tiempo real. En estos casos, una capa de material fluorescente convierte la energía de los rayos X en luz visible, con una intensidad proporcional a la exposición. Una de las desventajas de este tipo de pantallas es que generalmente la imagen es difusa, y limita la identificación de detalles finos. Por sus características, se emplean para inspeccionar materiales poco densos (plásticos) y rara vez para metales. La principal ventaja es su

adaptación a cámaras o aparatos de televisión, con lo que se puede digitalizar la imagen y procesar para mejorar su resolución y análisis.

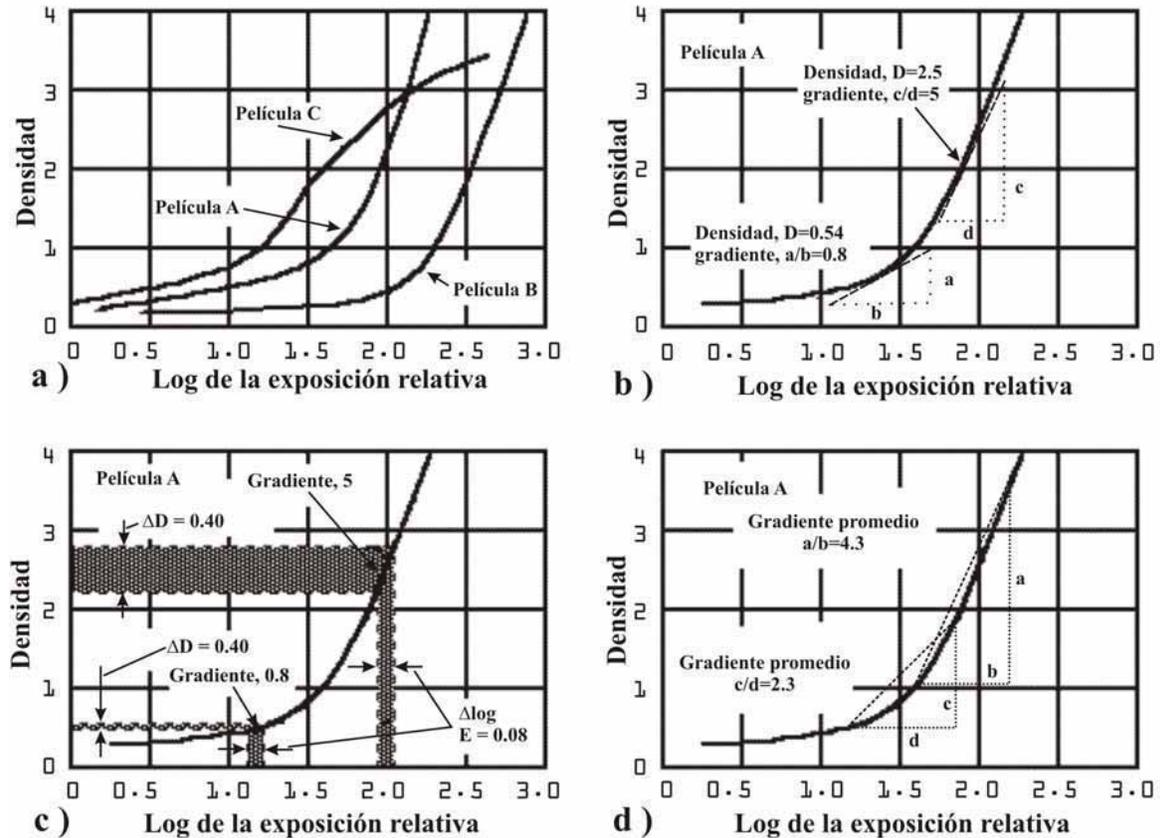


Figura 5.33

Curvas características de películas de rayos X para determinar el tipo de película y los gradientes, velocidad y densidad.

- Curvas típicas de tres películas usadas industrialmente
- Evaluación de los gradientes en dos puntos diferentes de la curva
- Diferencias de densidad relativa a un 20% de diferencia en la exposición
- Promedio de los gradientes en dos rangos diferentes de densidad

5.2.4.3 Detectores en arreglos lineales

Los arreglos de detectores lineales son mallas de pequeños fotodiodos con material fluorescente. Con ello, se genera una imagen digitalizada cuya resolución depende del número de diodos por unidad de área. La desventaja de estos dispositivos es que resultan complejos y costosos, pero cada vez son más populares por la posibilidad de procesar las imágenes y prácticamente generar imágenes en tiempo real.

5.2.5 Calidad de las imágenes

Se discuten los temas asociados con la calidad de las imágenes que se obtienen de una radiografía. En términos generales, estos temas se enfocan al control de la dispersión de la radiación; el uso de pantallas intensificadoras; el análisis de los factores geométricos; la falta de resolución de las películas, y los indicadores de calidad de imagen.

5.2.5.1 Control de dispersión

La resolución de una imagen radiográfica se degrada proporcionalmente a la dispersión de la radiación que ocurre cuando pasa a través del material que se inspecciona. Lo anterior se debe a que la radiación secundaria que resulta de la dispersión no mantiene la misma trayectoria, ni dirección que la radiación directa. La radiación secundaria se genera por tres procesos principales: la interacción con los átomos en el interior del material; la dispersión de la radiación que choca con las paredes e interfases de la pieza, y la retrodispersión que ocurre cuando la radiación choca con el medio circundante del objeto (piso, mesas, apoyos, etc). Como toda radiación secundaria puede llegar a la placa fotosensible siguiendo trayectorias indirectas, la imagen que se forma resulta difusa ya que toda esta ocurre con cierta aleatoriedad que corresponde a una señal típica de ruido.

Para caracterizar esta radiación secundaria que no es deseada, se define un factor de amplificación, BF (por sus iniciales en inglés) mediante la ecuación:

$$BF = \frac{(I_d + I_s)}{I_d} = 1 + \frac{I_s}{I_d} \quad (5.18)$$

En ese caso, I_d e I_s son, respectivamente las intensidades directa y secundaria que llegan a la película que forma la imagen. En general, el factor de amplificación puede variar entre 2 y 20, y es pequeño cuando se utiliza radiación de alta energía. Como la radiación secundaria es de menor energía que la directa, es posible emplear filtros (placas de plomo) entre el objeto y la placa, para eliminar parte de ésta y mejorar la resolución de la imagen.

5.2.5.2 Pantallas intensificadoras

Para mejorar la imagen de una placa radiográfica, es posible emplear pantallas intensificadoras que se colocan junto a la placa fotosensible. Las pantallas intensificadoras de plomo, por ejemplo, son delgadas placas de 0,02 a 0,2 mm de espesor que se colocan abajo y arriba de la placa fotográfica, y la dispersión y retrodispersión que sufre la radiación en el plomo permite aumentar la intensidad de la radiación que finalmente forma la imagen radiográfica. Como las pantallas intensificadoras se colocan junto al sensor, la radiación dispersada no tiene oportunidad de cambiar la trayectoria, por tanto, no se pierde resolución en la imagen.

Una ventaja del uso de pantallas intensificadoras es que se reduce el tiempo de exposición. Las pantallas fluorescentes convierten la radiación en luz visible, produciendo un efecto de intensificación en la imagen radiográfica; sin embargo, por la naturaleza de la luz visible, se pierde resolución y calidad de imagen, por lo que se utilizan poco en la radiografía industrial.

5.2.5.3 Factores geométricos

La figura 5.34 muestra un esquema mediante el cual se controla el tamaño de la imagen en función de las distancias de la fuente al objeto y del objeto a la placa. En estos casos, el factor de escala de la imagen se hace únicamente con base en las consideraciones geométricas; por ejemplo, una dimensión del objeto se escala por el factor $(a+b)/a$ (figura 5.34), donde, a , es la distancia de la fuente al objeto y, b , la distancia del objeto al plano donde se forma la imagen. Nótese que el incremento del parámetro b , hace que se incremente el factor de escala en la radiografía.

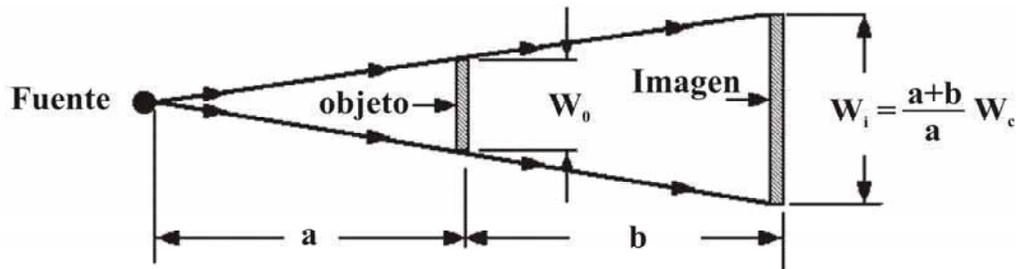


Figura 5.34

Esquema que muestra cómo se forma una imagen y su dependencia de la escala con los parámetros de distancia

El grado o nivel de definición de una imagen es uno de los aspectos que se ven influidos por factores geométricos. En la figura 5.35 se muestra cómo el tamaño de la fuente, S , la distancia de la fuente al objeto, a ; y la distancia del objeto a la placa, b , influyen en la pérdida de definición de la imagen, u_g . Este efecto de pérdida de definición se debe a que la radiación incide desde varios ángulos sobre una esquina o punto específico del objeto, produciendo una imagen con poca definición, dependiendo de los parámetros mencionados. En estos casos, el parámetro, u_g , se define como el factor de pérdida de definición geométrica y se define mediante la ecuación 5.19.

$$u_g = S \frac{b}{a} \quad (5.19)$$

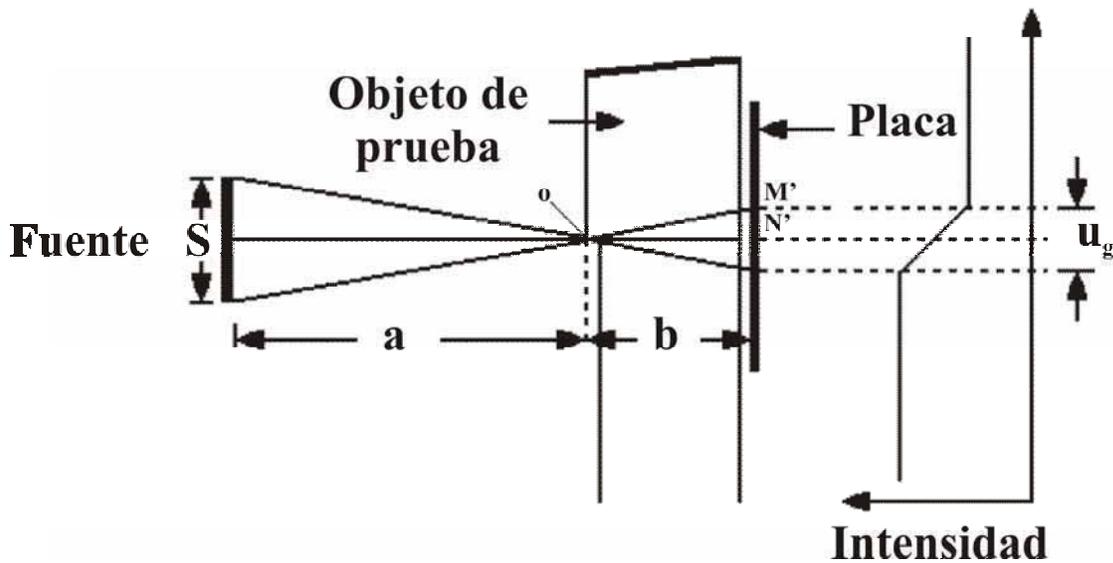


Figura 5.35
Pérdida de definición geométrica por el tamaño de la fuente

El factor de pérdida de definición geométrica disminuye a medida de que se reduce el tamaño de la fuente radiactiva S , cuando la distancia del objeto al plano de la imagen, b , se aminora, o cuando la distancia de la fuente al objeto, a , aumenta. Es importante notar que existe un compromiso entre los factores de pérdida de definición y amplificación, ya que ambos dependen fuertemente de la distancia, b , con efectos contrarios.

5.2.5.4 Falta de resolución de la película

Existe otro factor de pérdida de resolución, u_f , por causa de la película fotosensible; se debe a que la radiación que llega a la película excita los electrones de la emulsión, generando un efecto de difusión que resulta en pérdida de resolución de la imagen (figura 5.36). Este efecto es inherente a la película, y es más significativo para radiación de alta energía. La manera de compensarlas es calibrando la película a diferentes energías de radiación en cada aplicación específica.

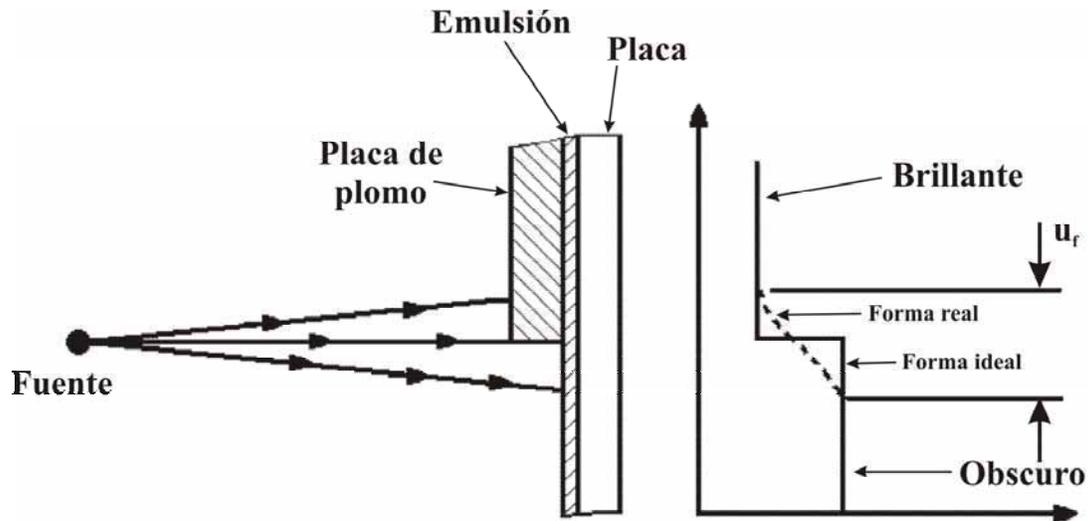


Figura 5.36
Pérdida de definición por la película

La pérdida de resolución total de una imagen radiográfica es la combinación del factor geométrico, u_g , y el de la película u_f . A pesar de que los dos factores se combinan de manera compleja, es posible establecer dos escenarios o técnicas para optimizar la imagen radiográfica de acuerdo con éstos.

Técnica de alta sensibilidad

Es aquella en la que se selecciona el tamaño de la fuente y las distancias, a y b , la película y la energía de la radiación de forma tal, que los factores de pérdida de resolución geométrica y de la película son iguales, es decir, $u_g = u_f$.

Técnica de baja sensibilidad

En este caso, los parámetros mencionados en la técnica anterior, se seleccionan de manera que el factor de pérdida de resolución geométrica es dos veces mayor que el de la película; es decir, $u_g = 2u_f$.

5.2.5.5 Indicadores de calidad de imágenes

Los indicadores de calidad de imagen, ICI (IQI por sus iniciales en inglés), son pequeñas piezas de material calibrado que se utilizan para medir la calidad de una imagen radiográfica. También son llamados calibradores de penetración; son piezas del mismo material de la pieza que se inspecciona, con diferentes formas o geometrías tales como alambres o placas con perforaciones de varios diámetros,

cuyo objeto es medir la calidad de la imagen en función de estos indicadores. Por lo general, el espesor de los indicadores es mucho menor al de la pieza que se inspecciona (1% a 2% del espesor de la pieza), y se colocan distribuidos en toda el área de inspección. La capacidad para distinguir detalles en la imagen depende mucho de la base de referencia que se tenga a partir de los indicadores de calidad.

5.2.6 Aspectos de seguridad

Como la radiación es invisible y particularmente dañina, la protección del personal y el cuidado en el manejo y operación de equipos y material radiactivo, son aspectos fundamentales que deben tomarse en cuenta para la inspección no destructiva con la radiografía industrial. Existen procedimientos y requisitos de seguridad muy estrictos que es necesario cumplir para aplicar las técnicas, para lo cual existen organismos que regulan la operación; por ejemplo, en México reside la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), y en Estados Unidos la Nuclear Regulatory Commission (NRC). El costo de la inspección con rayos X, o gamma, se encarece mucho por el cumplimiento de todas las normas de seguridad y por el cumplimiento de todos los requisitos de operación que éstas establecen.

Uno de los aspectos más importantes en la seguridad para la radiografía industrial, es el control de la dosis o cantidad de radiación que recibe un operador, o el personal ocupacionalmente expuesto (POE). El control de exposición para un POE es acumulable, por lo que se debe llevar un registro de las dosis recibidas a lo largo de su vida profesional. Existen límites de dosis máxima acumulable y dosis máxima en una exposición que no debe excederse para no poner en riesgo al operador.

Para determinar y controlar las dosis se utiliza como unidad de medida el **rad** (radiation absorbed dose), que se define como la absorción de 100 **ergs** de energía por gramo de material irradiado, y se aplica a cualquier tipo de radiación. El **rbe** (relative biological effectiveness, o efectividad biológica relativa), califica el nivel de daño en el ser humano por los diferentes tipos de radiación. Así, se obtienen los valores de la siguiente tabla:

Tabla 5.8

Tipo de radiación	Efectividad biológica relativa (rbe)
Rayos X, y partículas beta	1,0
Neutrones térmicos	5,0
Neutrones rápidos	10
Partículas alfa	20

Finalmente, el **rem** (**R**oentgen **e**quivalent **m**an) es el producto de la dosis de radiación (**rad**) por la efectividad biológica relativa (**rbe**), (es decir, **rem=rad*rbe**). Las unidades del **rem** en el sistema internacional es el Sievert (**Sv**), lo cual equivale a $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

Existen criterios de salud que establecen las dosis máximas acumuladas, las cuales se incrementan con la edad. En general, antes de los 18 años, la exposición a la radiación debe ser nula. Después de esa edad, es posible acumular **5 rem** por año (**0,05 Sv**, por año), pero sin exceder la dosis de **12 rem** en un año.

En la referencia 26 se describen los dos aspectos fundamentales de la seguridad radiológica: la protección del personal ocupacionalmente expuesto (POE), y el monitoreo de la radiación. El principal objetivo de la protección radiológica es mantener al mínimo las dosis de radiación que reciben los operadores, lo cual se logra limitando la intensidad de la radiación y los tiempos de exposición. Como la intensidad de la radiación decrece inversamente proporcional a la distancia de la fuente, es importante definir un área de exclusión o de acceso restringido donde se encuentran las fuentes de radiación.

Para ello, es necesario contar con sistemas muy estrictos de control de acceso, y medios de información claros y suficientes. En la mayoría de los casos donde se utilizan fuentes radiactivas es conveniente contar sistemas de blindaje con plomo y concreto. Se tienen varios procedimientos para calcular el blindaje, pero como se mencionó en la sección 5.2.2, un criterio puede ser el valor del TVT que depende de la energía de la radiación; por ejemplo, un espesor de 1.4 cm de plomo es suficiente para reducir en una décima parte los rayos X de 0,5 MeV, pero con radiación de 0,1 MeV este valor disminuye significativamente a 0,04 cm.

La cantidad de radiación que puede fugarse de una zona restringida debe ser controlada y monitoreada de manera que no se excedan los siguientes límites:

- **2 mrem** de dosis máxima en una hora
- **100 mrem** de dosis total para siete días consecutivos
- **500 mrem** de dosis total para un año calendario

El monitoreo de la radiación en las instalaciones y del personal que ahí labore es un requisito fundamental en los programas de seguridad radiológica. El riesgo de fugas radiactivas en una instalación requiere evaluaciones periódicas para monitorear cada fuente radiactiva en condiciones de máxima intensidad. Adicionalmente, todo el personal asignado a las áreas restringidas está obligado a portar placas de medición, o dosímetros para registrar las dosis recibidas diariamente. De igual manera, deben existir registros históricos de las dosis acumuladas de todos y cada uno de este personal.

5.2.7 Tomografía computarizada (CT), (CAT)

La tomografía computarizada (CT) es una técnica especializada para obtener imágenes de secciones transversales del interior de una pieza sólida ^[25,27]. También es conocida como tomografía asistida por computadora (CAT); se utiliza con fuentes de diferentes energías que incluyen el ultrasonido, electrones, protones, partículas alfa, láser y microondas, pero la más común es con rayos X. En 1917, el matemático austriaco Johann Radon desarrolló la fórmula que sirve de base para la tomografía computarizada; sin embargo, fue a finales de la década de los 60's e inicios de los 70's, cuando Allan Cormack y Godfrey Hounsfield desarrollaron la tomografía computarizada para aplicaciones en el campo de la medicina.

La radiografía convencional comprime en una imagen en dos dimensiones la información de un objeto tridimensional. A pesar de que esta técnica permite inspeccionar objetos de gran tamaño y volumen, la información siempre queda limitada a registros bidimensionales. Por el contrario, una tomografía proporciona información tridimensional, con lo que se tiene una visión completa del interior de un objeto.

En la figura 5.37 se muestra un esquema del proceso para una tomografía computarizada ^[27]. Nótese que en este caso la energía del haz, el detector y la superficie examinada están en un mismo plano; a diferencia de la radiografía tradicional en la que el haz es perpendicular al plano que se examina.

Un sistema de tomografía computarizada se compone de una fuente de radiación, un detector, un manipulador de precisión y un algoritmo de reconstrucción. La fuente de radiación debe ser colimada para producir un haz en forma de abanico muy delgado que pueda ser registrado en un mismo plano. La atenuación de la radiación se mide con un detector compuesto de un arreglo lineal de sensores individuales. El manipulador de precisión hace girar el objeto con respecto a la fuente y el detector, de forma que se obtengan imágenes desde varios ángulos. Finalmente, el algoritmo de reconstrucción produce una imagen en dos dimensiones del corte transversal del objeto a partir de los registros en una dimensión, obtenidos desde los diferentes ángulos. El cálculo de reconstrucción requiere un sistema de cómputo, motivo por el cual la tomografía computarizada se desarrolló después de 1970. Los algoritmos de reconstrucción aplican una técnica de transformación basada en el teorema de Radon y ejecuta un proceso iterativo que parte de una condición inicial idealizada.

La tomografía computarizada es muy versátil, ya que no está restringida por la forma o composición del objeto que se inspeccione. Entre las ventajas que presenta está la posibilidad de examinar objetos complejos en forma detallada, y la posibilidad de generar registros tridimensionales. Las imágenes por CT son fáciles de interpretar y no sólo permiten tener un registro permanente, sino también poder procesar y analizar estos datos en forma comparativa con registros subsecuentes. Para que estas técnicas puedan aplicarse adecuadamente se

requiere una fuente estable de radiación, contar con manipuladores de alta precisión, disponer de sensores lineales de alta sensibilidad y un sistema de despliegue de imágenes de alta resolución.

Una de las principales limitaciones es la necesidad de tener acceso alrededor de los 360° del objeto de prueba, y el proceso de cómputo de reconstrucción de imagen es complejo, por lo que los equipos son sofisticados y costosos. En general, estas aplicaciones se limitan a la inspección de piezas de tamaño relativamente pequeño y de alto valor comercial.

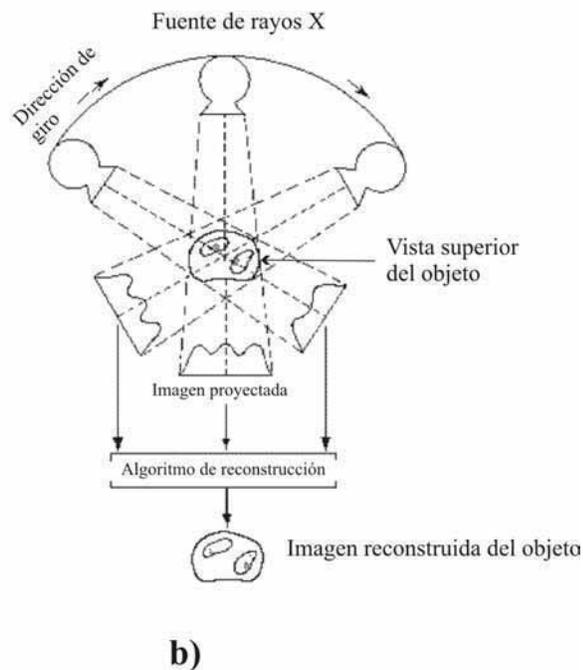
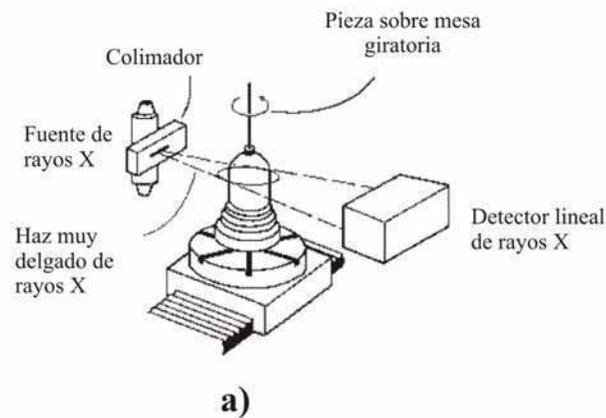


Figura 5.37
Representación esquemática del proceso para la tomografía computarizada

En resumen, se puede decir que la tomografía computarizada se utiliza en los siguientes casos:

- Diagnósticos médicos
- Inspección de corazones de perforación en la industria petrolera
- Inspección de motores de aviones y naves espaciales de alta tecnología
- Inspección de piezas de geometría compleja, como los álabes de turbinas
- Inspección de materiales compuestos y cerámicos
- Componentes electrónicos críticos
- Componentes mecánicos críticos, como los ensambles del rotor de los helicópteros

5.2.8 Ventajas y desventajas de la radiografía industrial

Para concluir esta sección se discutirán brevemente las ventajas y desventajas de la radiografía industrial en la inspección no destructiva.

5.2.8.1 Ventajas

Entre las principales ventajas están las siguientes:

- + Detecta defectos internos y externos, tales como discontinuidades, defectos de ensamble, o fabricación o daño inducido durante el servicio. La inspección por rayos X es especialmente buena para localizar defectos volumétricos, como porosidades o huecos. Los defectos planos pueden detectarse, siempre y cuando su orientación sea paralela a la dirección de la radiación
- + Se aplica a una gran variedad de materiales sólidos, y se pueden examinar piezas de geometría compleja
- + Genera un registro permanente en la inspección
- + Requiere poca preparación
- + La visualización en tiempo real es posible
- + Se obtienen imágenes tridimensionales con técnicas sofisticadas, como la tomografía computacional

- + Cuando se utilizan isótopos radiactivos, no se requieren fuentes externas de energía. Además, son portátiles y se pueden colocar casi en cualquier parte, por lo que resultan adecuados para inspecciones de una gran variedad de componentes. Adicionalmente, los rayos gamma tienen una buena capacidad de penetración, de ahí que haya posibilidad de inspeccionar piezas de gran espesor
- + La radiación de neutrones es una alternativa con radiación, que complementa las aplicaciones con rayos X o gamma.

5.2.8.2 Desventajas

Las más significativas son:

- Requiere de cuidados y complejos procedimientos de seguridad
- Se necesita tener acceso a ambos lados de la pieza que se inspecciona
- La capacidad de detección es muy sensible a la orientación de los defectos o anomalías. Para mayor detección, el defecto debe estar orientado en dirección paralela al haz de radiación
- Los defectos laminares son difíciles de detectar
- Requiere un alto grado de capacitación y destreza por parte de los inspectores
- Es relativamente costosa, y no se puede usar en estructuras que contienen material radiactivo, o en condiciones ambientales de alta temperatura
- Para determinar la localización exacta de un defecto, se requiere de procedimientos especiales
- Generalmente, el resultado de la inspección no es inmediato y casi siempre se tiene un tiempo después de realizada la inspección
- Las fuentes radiactivas no se pueden “apagar”, y su intensidad decae con el tiempo, independientemente de su uso. Los requerimientos de seguridad son particularmente estrictos con este tipo de fuentes

5.3 Emisiones acústicas (AE)

El principio básico de las técnicas de emisiones acústicas se fundamenta en el hecho de que casi todos los materiales emiten pulsos sonoros cuando se someten a una carga. Esta emisión se origina por los micro-agrietamientos que ocurren por la aplicación de las cargas, generalmente en grietas, porosidades o defectos. Las emisiones acústicas son una técnica pasiva que “escucha” el sonido emitido en el material, y ubica la fuente de la misma. En general no determina el tamaño de los defectos, pero es una técnica que localiza fácilmente puntos con potencial daño, y que requieren una inspección más detallada mediante otras técnicas.

5.3.1 Aspectos generales

De acuerdo con la definición de la ASTM, las emisiones acústicas (AE) son un efecto dinámico transitorio debido a la propagación de la onda elástica de esfuerzo, generada por la rápida liberación de energía por micro-fracturas en el material.

De acuerdo con lo anterior, una inspección por emisiones acústicas requiere la aplicación de carga externa en la pieza o elemento que se inspecciona, así como de sensores que se utilizan para “escuchar”, y de un sistema de análisis que correlacione las señales recibidas por los sensores, e identifique la fuente del sonido.

A pesar de que la técnica de evaluación no destructiva por emisiones acústicas se ha utilizado a partir de 1950, es relativamente reciente; existe evidencia de que en alguna forma se empleó en albores de la civilización humana, por ejemplo, cuando se identificaban piezas de cerámica de baja calidad cuando se escuchaba el sonido que producían al agrietarse durante enfriamiento. Otro caso, son las vigas de madera que en minas o buques producen altos niveles de ruido, momentos antes de que fallen catastróficamente.

En general, la técnica consiste en escuchar a los materiales e identificar los puntos donde se “queja”, como el estaño cuando tiene altos niveles de deformación. En realidad existen varias fuentes que producen las emisiones acústicas entre las cuales destacan las siguientes según su orden de importancia:

1. Formación y crecimiento de grietas
2. Realineamiento molecular, o crecimiento de dominios magnéticos por procesos magneto-mecánicos (efecto Barkhausen)
3. Cambios microestructurales como el movimiento de dislocaciones o cambios de fase
4. Fractura de inclusiones frágiles o películas
5. Fractura de fibras y delaminación en materiales compuestos

6. Actividad química como la corrosión
7. Sismos (fenómeno de emisiones acústicas a gran escala)

Las emisiones acústicas son una técnica pasiva de evaluación no destructiva, ya que la señal acústica es generada por el material mismo y no por una fuente externa. Por lo anterior, para que esta técnica se pueda aplicar, se necesita un estímulo mecánico, térmico o magnético que induzca esfuerzo en el material para provocar la emisión acústica, por tanto, sin la aplicación del estímulo no hay emisión sonora. Por ello, las pruebas de emisiones acústicas se realizan durante pruebas de calidad, de fatiga o en la operación normal.

En síntesis, se puede decir que las emisiones acústicas “escuchan” el sonido generado por el daño que se incrementa dentro del material (figura 5.38); por ello, se dice que una prueba por emisiones acústicas es no repetible.

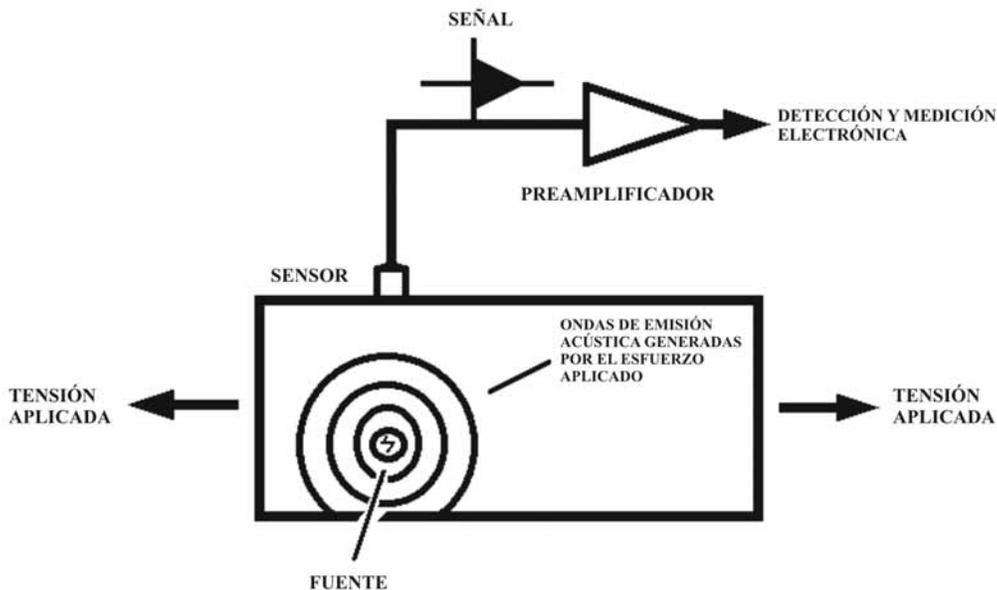


Figura 5.38
Esquema que muestra el principio básico de las emisiones acústicas

Es necesario el análisis de las señales recibidas por los sensores para ubicar la fuente del sonido; para ello hay que sincronizar en el tiempo las señales, y mediante triangularización localizar la fuente en función de las diferencias en tiempo entre los diversos sensores. El tamaño de grietas o defectos tienen que evaluarse mediante otra técnica no destructiva.

Casi todos los materiales tienen propiedades o condiciones para emitir emisiones acústicas que favorecen la inspección no destructiva. Entre las que incrementan el nivel de emisión acústica se encuentran las anisotropías; las impurezas; la fragilidad; los granos de gran tamaño; las transformaciones de fase martensítica;

las grietas que se propagan, y las secciones laminares. Las condiciones que ayudan al incremento de las emisiones, son los niveles altos de esfuerzo y las bajas temperaturas.

Las propiedades más importantes de los materiales que no favorecen la generación de emisiones acústicas son la alta pureza, la isotropía, la ductilidad y la deformación plástica. Las condiciones que no ayudan a la producción de emisiones sonoras, son los niveles bajos de esfuerzo y las altas temperaturas.

Por lo anterior, las emisiones acústicas se han convertido en la técnica de evaluación no destructiva más importante para los materiales compuestos y, en algunos casos, es la única. Respecto a los recipientes a presión, los códigos de la ASME una descripción detallada relativa a la aplicación e interpretación de esta técnica contienen.

5.3.2 Señales de emisiones acústicas

Cubren un amplio rango de frecuencias y niveles de energía, sin embargo, existen dos tipos básicos de señales: los estallidos cortos (burst), y las señales continuas de sonido (figura 5.39). Los estallidos sonoros son de corta duración que ocurren por eventos particulares; en cambio, las señales continuas se originan por eventos rápidos que permanecen durante un tiempo. Ambos tipos se propagan en una combinación de modos (longitudinal, transversal u ondas superficiales).

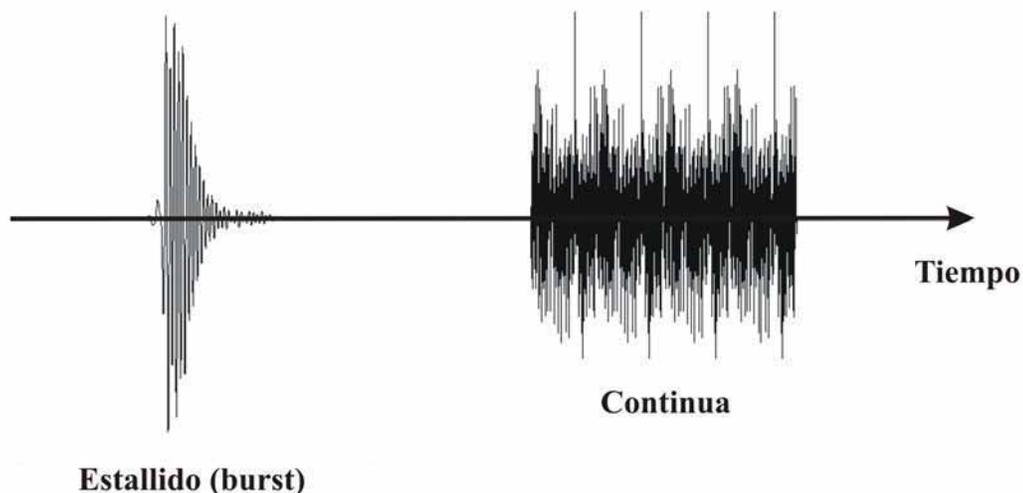


Figura 5.39
Señales típicas de emisiones acústicas

Las señales pueden variar en amplitud y frecuencia, pero de manera general se puede decir que las señales detectables están debajo de los 50 MHz; y el rango típico, entre los 20 y 1,200 kHz.

Cuando una emisión acústica es emitida por una carga inicial, la siguiente emisión no se producirá por una recarga, sino hasta que su valor exceda el de la carga inicial. Este fenómeno se denomina efecto Kaiser (curva **BCB**, figura 5.40). El factor de recarga, **FR**, es la razón del valor de la recarga al momento que se reinicia la emisión acústica entre el valor de carga antes de que sea liberada ($FR = \text{carga F} / \text{carga D}$ figura 5.40). En general, valores de **FR** mayores o iguales a 1,0 indica que no hay daño antes de la carga; y valores menores de 1,0 denotan la presencia de daño.

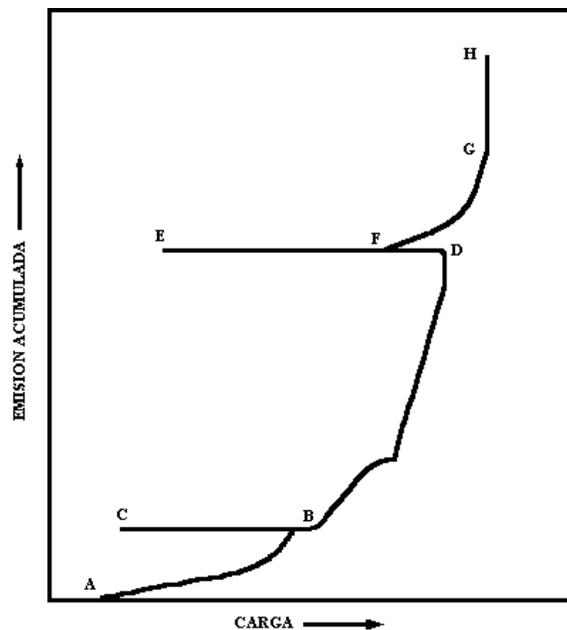


Figura 5.40

**Historial de emisiones acústicas acumuladas con respecto a la carga.
Nótese los efectos Kaiser BCB y de recarga FR**

Existen cinco parámetros que se deben calificar en las señales de emisiones acústicas (figura 5.41). En la figura 5.41 se muestra el intervalo de tiempo de formación, **R**, y el tiempo de duración de la señal, **D**; los cuales se determinan en función de un determinado valor del umbral, que generalmente se define para filtrar el nivel de ruido y eliminar las señales de baja intensidad. El valor pico de la amplitud, **A**, es el valor máximo de la señal, y determina el nivel de detección de una señal. El número de puntos de cruce **N**, es el total de veces que la señal cruza la línea del umbral. El área bajo la curva de la envolvente de la señal se identifica por el parámetro **E**, y se denomina, **MARSE**, el cual es una medida de la señal acústica. El **MARSE** es la forma más aceptada para medir la una señal respecto al valor del número de cruces, **N**, ya que es sensible a la duración y amplitud de la

señal, y depende menos del valor del umbral. Para medir el MARSE, el sistema de detección requiere una electrónica más compleja que lo calcule a partir de la señal obtenida.

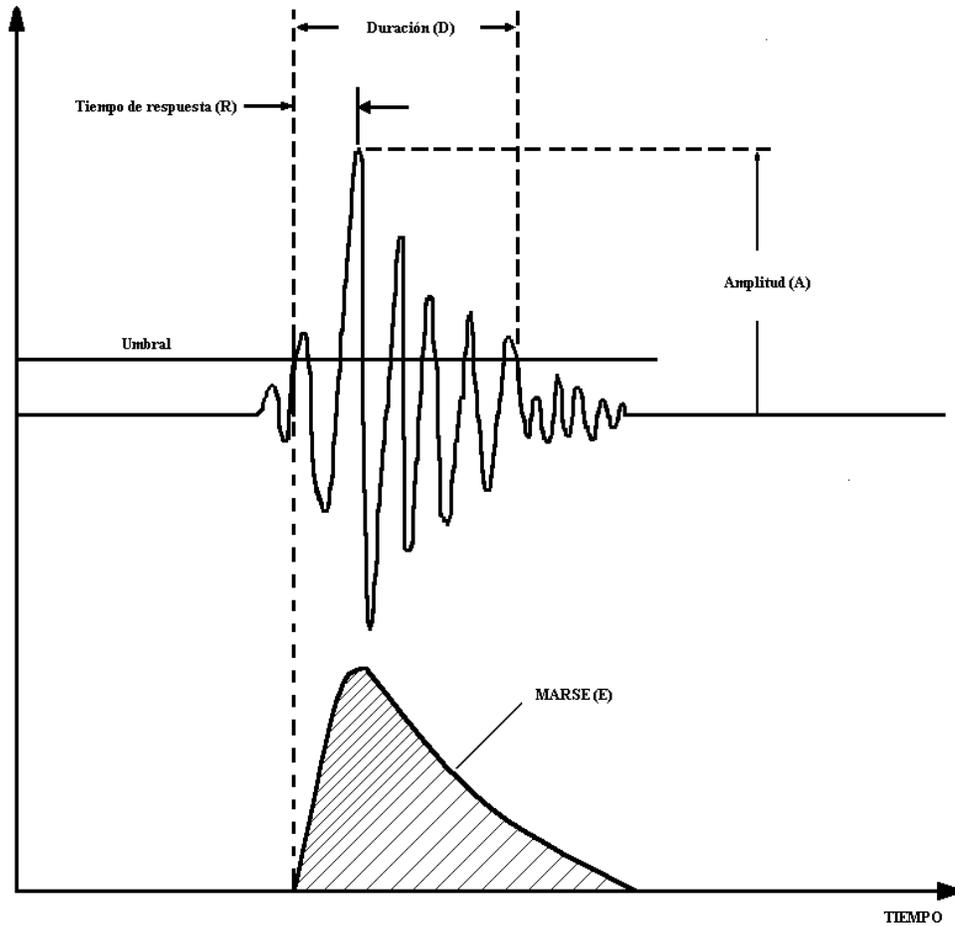


Figura 5.41
Parámetros típicos que describen una señal de emisiones acústicas

Existen varios formatos para presentar o desplegar la información procesada de las señales acústicas. En la figura 5.42 se muestran tres de los formatos más utilizados; el primero muestra el número de cuentas o energía acumulada en función del tiempo (5.42a), y es útil para valorar la energía acústica total. El segundo corresponde al número de emisiones acústicas, o la energía acústica por unidad de tiempo como función del tiempo (5.42b), lo cual indica todos los cambios durante el tiempo de medición. En la figura 5.42c se muestra el tercer formato típico con una comparación de dos señales acumuladas de energía acústica como función de la carga; en este último ejemplo se identifica el caso de un buen material respecto a uno malo, y es el formato más empleado ya que relaciona las emisiones con el nivel de carga. Otras gráficas del nivel de energía acumulada como función de la carga corresponden a las figuras 5.43 a y b.

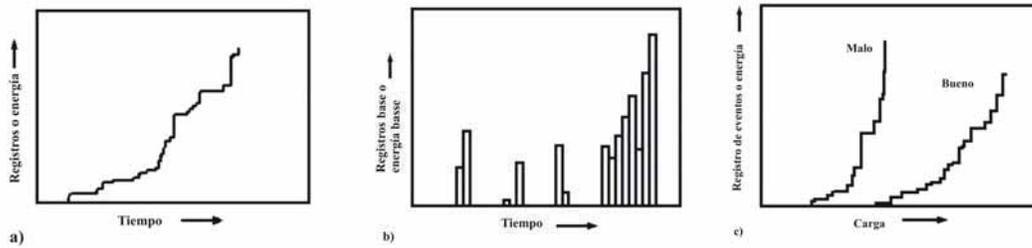


Figura 5.42
Formatos típicos para la presentación de resultados por AE
 a) Energía acumulada vs tiempo
 b) Razón de emisión vs tiempo
 c) Energía acumulada vs carga

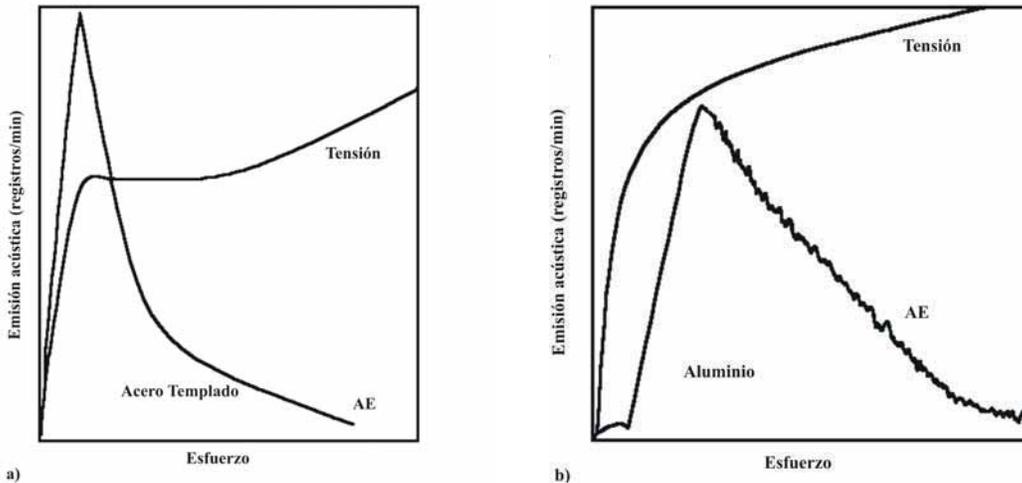


Figura 5.43
Gráficas de la energía de las emisiones acústicas vs esfuerzo
 a) acero; b) aluminio

La atenuación de las señales acústicas por la estructura del material mismo es un parámetro importante, ya que influye en el número y localización de los transductores, y se afecta por los mecanismos de dispersión y absorción de las ondas sonoras, y por factores geométricos (esquinas y discontinuidades). En términos generales, la dispersión en metales ocurre por pequeñas discontinuidades como precipitados o fronteras de grano; los mecanismos de absorción se presentan en dislocaciones, por efectos magnéticos y por amortiguamiento termoelástico; finalmente, los factores geométricos producen efectos de difracción, acoplamiento de ondas y atenuación por reflexión.

5.3.3 Sensores acústicos

Las emisiones acústicas son ondas de ultrasonido que viaja dentro del material, por tanto, hay una muy amplia variedad de sensores que se usan para registrarlas y un igual número de técnicas para medir e interpretar dichas mediciones. Entre los sensores más empleados se encuentran los acelerómetros de masa y una amplia variedad de transductores piezoeléctricos, capacitivos, láser, ópticos y magneto-restrictivos. Otros sensores incluyen micrófonos, dispositivos electromagnéticos o electrostáticos y extensómetros.

Acelerómetros de masa

Fueron los primeros en haber sido utilizados en la inspección por emisiones acústicas; son poco sensibles y están limitados a un rango máximo de 100 kHz, por lo que no se usan en la mayoría de los casos.

Transductores piezoeléctricos

Son los más comunes en el monitoreo de las emisiones acústicas, y hay diferentes tipos con un muy amplio rango de propiedades. Tienen alta sensibilidad, son confiables y pueden cubrir diferentes rangos de frecuencia. La principal desventaja es su baja sensibilidad con frecuencias fuera de su ancho de banda.

Transductores capacitivos

Son capaces de monitorear desplazamientos superficiales mediante cambios de capacitancia entre el sensor y el objeto de prueba. Tienen una respuesta muy constante, independientemente de la frecuencia por lo que resultan poco adecuados en análisis de frecuencia, y en el procesamiento de señales, restringiendo mucho su uso.

Transductores ópticos/láser

Tienen un amplio rango de respuesta en frecuencia y son los más apropiados para altas frecuencias. Son muy efectivos para medir la forma de las ondas acústicas para determinar su espectro en frecuencia, no requieren contacto directo con el objeto inspeccionado, y tienen la capacidad de integrar la señal sobre toda un área.

Transductores magneto-restrictivos

Son menos sensibles que los piezoeléctricos, pero apropiados en condiciones de alta temperatura, o donde hay radiación nuclear. Su respuesta en frecuencia está limitada a una frecuencia máxima de 1 MHz.

5.3.4 Técnicas de inspección

Dependiendo del objetivo de la inspección, se aplican diferentes técnicas de inspección que incluyen el uso de diversos tipos y distribuciones de sensores. Como criterio general, para determinar el intervalo de frecuencia de los transductores, se debe tomar en cuenta que las emisiones acústicas cubren un rango desde ondas subsónicas hasta señales de 50 MHz.

La selección de un sensor debe hacerse para que registre frecuencias del sonido por encima del ruido ambiental, pero por debajo del nivel de frecuencia en el que las ondas son fuertemente atenuadas. Es importante considerar que las grietas que evolucionan emiten sonido en un amplio rango de frecuencias, y para el monitoreo la señal de cualquier frecuencia puede ser aprovechada. Por otro lado, también se debe que el amortiguamiento de una sonora aumenta con la frecuencia.

La localización de los sensores se debe hacer siguiendo patrones de distribución adecuados a las condiciones de prueba, y a la geometría del objeto que se inspecciona. La distribución de éstos necesita cubrir todo el volumen de la pieza para que con una señal perfectamente identificada se localice la fuente mediante procedimientos de triangulación. Este proceso se facilita a medida de que se incrementa el número de sensores. En algunos casos, se emplean sensores localizados en zonas límite o fronteras para filtrar ruido externo.

Los patrones de distribución de sensores se clasifican en dos tipos: arreglos triangulares, y arreglos lineales. Los triangulares son apropiados para localizar fuentes de sonido por triangulación en superficies de gran tamaño. Por su parte, lineales se prefieren para monitorear el crecimiento de grietas o la propagación de daño. A medida que la complejidad geométrica del objeto aumenta, el número de sensores también.

Para determinar la factibilidad del uso de la inspección por emisiones acústicas se deben analizar aspectos económicos y técnicos. En este caso, el costo depende fundamentalmente del número y tipo de sensores utilizados. Desde el punto de vista técnico conviene considerar el factor de atenuación del material y la conversión de modos.

El filtrado del ruido ambiental es importante para una adecuada interpretación y se realiza mediante la selección de los sensores y equipos, y con el uso de cables blindados, filtros electrónicos, y el procesamiento de señales. La selección del umbral de filtrado es importante pues de ello depende el nivel de sensibilidad y su capacidad para eliminar señales no deseadas.

En la tabla 5.9 se presenta una comparación de la técnica de inspección por emisiones acústicas con otros métodos de inspección.

Tabla 5.9
Comparación de las emisiones acústicas con otros métodos

Emisiones cústicas	Otros métodos de IND
Detecta el movimiento de defectos	Detecta la forma geométrica de los defectos
Requiere de cargas externas	No requiere cargas externas
Cada condición de prueba es única	Las condiciones de prueba son repetibles
Sensible al tipo de material	Menor sensibilidad al tipo de material
Poco sensible a la geometría del objeto	Mayor sensibilidad a la geometría del objeto
Acceso al objeto, únicamente a los puntos donde se colocan los sensores	Requieren del acceso a toda el área de inspección
Prueba toda la pieza en una sola prueba	Una pieza completa se inspecciona siguiendo una secuencia de pruebas locales
Los principales problemas se relacionan con ruido ambiental	Los principales problemas se relacionan con la geometría del objeto
Su uso afecta poco los procesos de producción	Su empleo afecta los procesos de producción

5.3.5 Ventajas y desventajas de las emisiones acústicas

De manera sintética, a continuación se presentan las ventajas y desventajas más significativas de la inspección no destructiva por emisiones acústicas.

5.3.5.1 Ventajas

Las más importantes son:

- + Localizan defectos o grietas que se propagan o crecen
- + A pesar de que se debe aplicar una carga al objeto de prueba, no es necesario generar un pulso externo para obtener la medición
- + Los equipos de medición son relativamente sencillos y de bajo costo
- + Las señales pueden ser almacenadas para un procesamiento y análisis posterior

- + La técnica se puede aplicar en forma remota y continua
- + Se pueden detectar defectos ocultos
- + Todo un sistema o estructura puede ser monitoreada en una sola prueba
- + Es una técnica adecuada para monitoreo a largo plazo y en ambientes hostiles

5.3.5.2 Desventajas

Las principales son:

- Se debe aplicar una carga, y no detecta grietas o defectos estabilizados que no se propagan
- Algunos defectos no emiten señales acústicas; por tanto, no son detectables
- No se puede aplicar a todos los materiales y ni tampoco durante el tratamiento térmico de una pieza
- A pesar de que se localizan los defectos, no se puede estimar su tamaño. Con esto, se deben aplicar otras técnicas de inspección complementarias
- Como cada condición de carga y crecimiento de grieta es único, la técnica es no repetible
- No existen procedimientos normalizados de prueba o interpretación de datos
- Estructuras complejas dificultan la localización de las fuentes sonoras
- La sobrestimación de la técnica ha generado falsas expectativas; de ahí; el descrédito del uso de las emisiones acústicas

6. Técnicas para la inspección de puentes

En capítulos anteriores se describieron las técnicas más utilizadas en la inspección no destructiva, se explicaron sus principios físicos, sus ventajas y sus desventajas. Si bien es cierto que estas técnicas se pueden aplicar en algunos elementos estructurales de los puentes, también es necesario puntualizar que se ha requerido el desarrollo de técnicas específicas para la inspección de algunos elementos que, por su difícil acceso o sus características propias, no se pueden evaluar con las técnicas tradicionales.

El desarrollo de las técnicas específicas comenzó de manera notable a partir de 1994, como consecuencia del final de la guerra fría y la liberación de la tecnología militar para aplicaciones civiles ^[28]. A partir de esta fecha también se inicia un diagnóstico de los principales problemas en los puentes, y de las alternativas tecnológicas que pueden desarrollarse para enfrentar estos problemas. En particular se dio prioridad a los problemas que no se resuelven con las técnicas tradicionales, o cuya ejecución se complica por la interacción de materiales, instrumentación, acceso, tiempo de ejecución, o por el control de algunas variables durante la realización de las pruebas (tráfico, ruido ambiental).

Para el caso de los puentes, los problemas que resultan de mayor importancia son: la detección y evaluación de grietas ocasionadas por fatiga en los elementos de acero; la evaluación rápida de la losa de concreto; la evaluación global de las estructuras; la evaluación del acero en el concreto presforzado, y la incorporación del monitoreo estructural dentro de sistemas integrales de administración de puentes ^[28].

En este capítulo se describirán algunas técnicas específicas que han sido desarrolladas con base en las necesidades descritas, y que han comenzado a dar resultados positivos en la evaluación no destructiva de los puentes o sus componentes estructurales, que en algunos casos comienzan a aparecer comercialmente y proporcionan una nueva opción para la inspección no destructiva.

6.1 Radar de penetración (GPR)

El radar de penetración ^[29-31] se empleó inicialmente en investigaciones geofísicas en la minería y en estudios de paleontología. Es a partir de 1985 que se ha desarrollado como una importante herramienta de evaluación no destructiva de la sanidad del concreto en puentes. A la fecha, el empleo de la técnica no se ha evolucionado lo suficiente por el alto costo de los sistemas requeridos, y de lo complejo que resulta el análisis de evaluación para determinar la condición de estructuras de concreto. Sin embargo, la investigación en torno a estos sistemas continúa por el potencial que tiene para evaluar la condición interna de puentes y

carreteras, principalmente para detección de daño oculto, como el daño por corrosión.

El principio de operación del radar de penetración (GPR), (figura 6.1) consiste en emitir una onda electromagnética, en un ancho de banda de 500 MHz a 6 GHz desde una antena colocada en la superficie de interés. Las ondas electromagnéticas se reflejan y transmiten en las diferentes interfaces de la losa de concreto debido a las variaciones en las propiedades dieléctricas de los diferentes materiales, y que influyen en la atenuación y dispersión de las ondas electromagnéticas. El diagnóstico de la condición interna del concreto se realiza mediante la interpretación de las ondas reflejadas que se miden con una antena receptora.

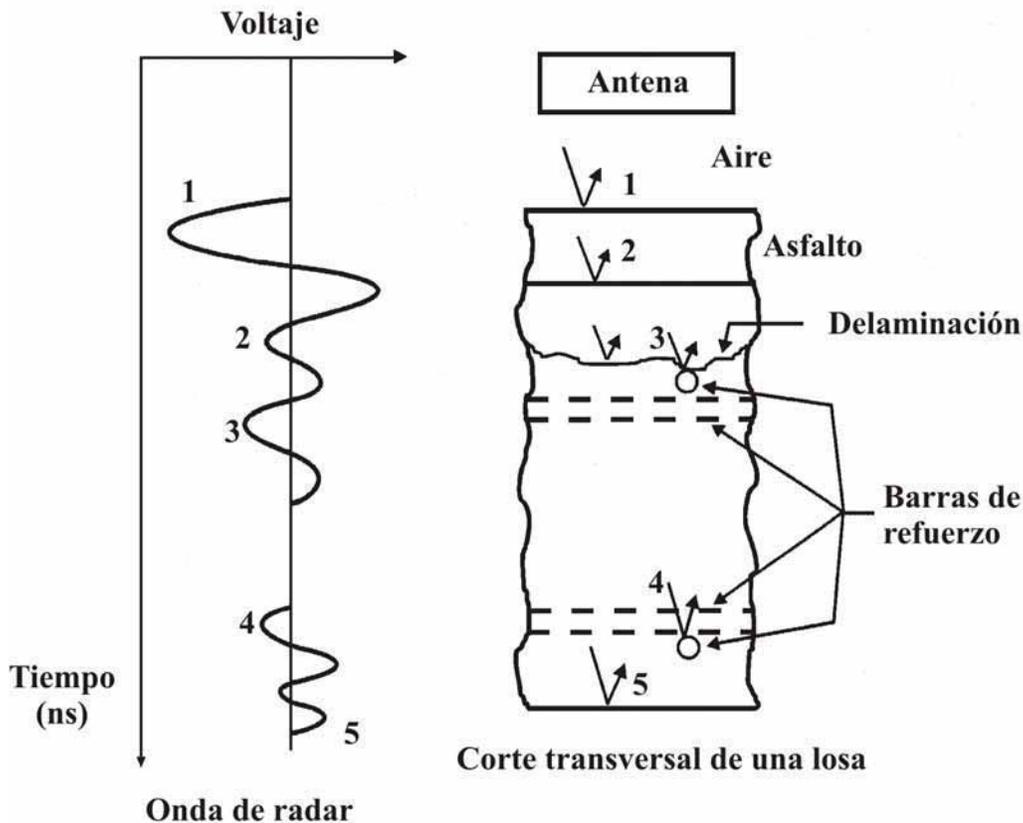


Figura 6.1
Modelo típico de una losa de concreto de un puente

La interacción de las ondas electromagnéticas con los materiales es un fenómeno complicado, por lo que el empleo de modelos matemáticos es indispensable para poder usar el radar de penetración como una herramienta de inspección. En el modelo más simple, las ondas electromagnéticas se representan como ondas

planas; y los sólidos, como una red de capas de extensión infinita, donde los materiales se clasifican como metálicos o dieléctricos. Los metálicos son generalmente buenos conductores, mientras que los dieléctricos son malos.

Como las ondas electromagnéticas son capaces de penetrar materiales dieléctricos y tienden a ser reflejadas por los elementos metálicos, una onda electromagnética se propagará en el concreto hasta que encuentre la frontera de otro material conductor (acero), donde una parte de la onda se reflejará, y otra será transmitida a través del mismo material.

La interpretación de la información de las ondas reflejas se analiza con base en la amplitud y polaridad de las mismas, que dependen de la relación de las constantes dieléctricas de los materiales por los que las ondas pasan y que se define como el coeficiente de reflexión.

Para obtener datos confiables se requiere la ejecución de las siguientes etapas:

1. Emisión de las ondas electromagnéticas. Las ondas deben emitirse desde una antena con suficiente amplitud, sin distorsión y a una frecuencia constante.
2. Posición y ángulo de la antena. Hay que colocarla en dirección transversal a la losa del puente, de tal manera que la altura y el ángulo permanezcan constantes. La posición relativa de la antena sobre los puntos de interés debe registrarse.
3. Posición y ángulo de la antena receptora. La antena receptora puede ser la misma que la que emite las ondas electromagnéticas, pero es factible emplear una segunda antena que debe colocarse posición transversal a la losa del puente.
4. Procesamiento de las señales. Las señales deben procesarse de acuerdo con las características del equipo empleado, que por lo general es uno de cómputo portátil y algoritmos sofisticados de análisis.
5. Interpretación de las señales. Los datos de la inspección por radar de penetración deben correlacionarse con información complementaria del estado del puente o estructura. Estos datos generalmente provienen de una inspección visual, o de otras técnicas de evaluación destructiva (extracción de núcleos), o no destructiva (identificación de varillas por ultrasonido).

A partir del principio teórico del radar de penetración se han desarrollado varias metodologías y equipos para lograr mejores resultados y aprovechamiento en un mayor número de aplicaciones. A continuación se describen dos de las técnicas más sofisticadas y complejas que han logrado buenos resultados en la inspección de puentes.

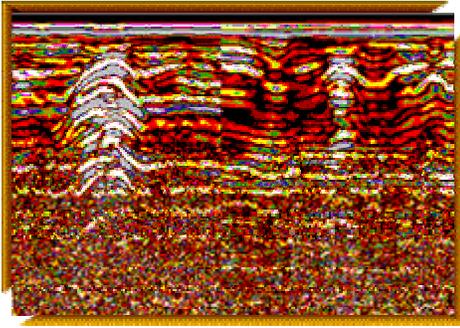
6.1.1 Metodología Hermes

La metodología Hermes ^[30] utiliza un radar de penetración que contiene 64 antenas en canales independientes de registro y medición, a partir de los cuales se procesa una imagen simple en 2 o 3 dimensiones. Los datos se alinean geoméricamente con la posición de cada antena. Se requieren pruebas de calibración con cintas metálicas colocadas en la superficie de la carretera para verificar la alineación de las antenas. Para formar la imagen del interior de la losa, los datos sincronizados se alimentan a un programa de modelación que resuelve el problema inverso. Las imágenes resultantes son referidas como reconstrucciones semejantes a las obtenidas con técnicas de resonancia magnética, o la tomografía computarizada.

Actualmente, el sistema Hermes se ha probado en varios puentes de los EUA y, para ello, se remolca por un camión que circula sobre el puente a una velocidad constante (figura 6.2). Durante la exploración de la losa, son necesarias varias pruebas para analizar el efecto de la velocidad, el espesor de la losa, y la configuración de las antenas, sobre la calidad de los resultados.



Figura 6.2
Radar de penetración, empleando el sistema Hermes



Corte en 2-D

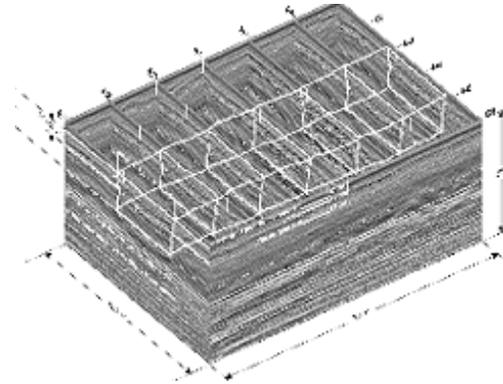


Imagen en 3-D

Figura 6.3
Resultados típicos obtenidos con el sistema Hermes

6.1.2 Metodología Peres

Las pruebas con metodología Peres ^[30] (figura 6.4) se han enfocado a inspecciones sobre losas prefabricadas. Para validar y calibrar los resultados se recurrió a losas de concreto con defectos simulados que se prueban en laboratorio.



Figura 6.4
Radar de penetración empleando el sistema Peres

Parámetros como la altura de la antena; la frecuencia del pulso; el intervalo de muestreo a través de la superficie; las ganancias, y los filtros, se modifican fácilmente por el operador para dar gran flexibilidad a esta técnica. La influencia de todos esos parámetros aún esta en estudio, pero los resultados obtenidos a la fecha son muy alentadores.

En términos generales, la meta principal de los dos sistemas mencionados es identificar delaminaciones, y como objetivo más ambicioso predecir las áreas donde se formarán las mismas. Lo anterior es posible si se observan las condiciones que ocasionan la corrosión, como son la identificación de altos niveles de agua y/o cloruros, como parámetros que se espera medir ya que son indicativos de áreas en las que favorece la formación de delaminaciones. Para corroborar las indicaciones del radar de penetración, se realizan actualmente pruebas controladas de laboratorio, a la vez que hay programas de validación muy extensos en todo los Estados Unidos y Europa.

6.2 Sensores magneto-restrictivos

Fueron desarrollados en 1996 en Texas por el Southwestern Research Institute [32,33] para la evaluar la severidad de la corrosión en varillas y cables de presfuerzo. Este centro de investigación desarrolló una serie de experimentos para conocer los alcances y la sensibilidad de la técnica para detectar la corrosión en materiales embebidos en concreto, e inferir el tiempo de curado del concreto, localizar fracturas en los cables o varillas, y medir la tensión en cables.

La técnica consiste básicamente en generar ondas elásticas en un alto ancho de banda en el material de inspección, las cuales se detectan posteriormente con un sensor magneto-restrictivo. Las señales respectivas se analizan en el dominio del tiempo y de la frecuencia, con particular atención a los cambios de atenuación y dispersión de las ondas.

En la aplicación de la técnica no es necesario que los sensores magneto-restrictivos estén en contacto directo con los materiales ferromagnéticos para medir las ondas elásticas; además, se pueden inspeccionar grandes longitudes arriba de los 100 ft, empleando un sólo sensor sin necesidad de un acoplamiento especial y a un bajo costo. Todas estas ventajas la hacen muy atractiva, y actualmente se encuentra en desarrollo.

El sistema magneto-restrictivo (figura 6.5) está formado por dos bobinas que circundan al material de inspección; dos sensores magneto-restrictivos; un generador de pulsos eléctricos de corta duración; un amplificador; un acondicionador de señales, y un sistema para la adquisición y almacenamiento de datos. El principio de funcionamiento consiste en generar un pulso eléctrico de corta duración, el cual se amplifica. El pulso amplificado pasa a través de la bobina, la que aplica un campo magnético al cable que genera una onda elástica en el acero por el efecto magneto-restrictivo o de Joule [33]. La onda elástica se propaga en ambas direcciones del cable; pasa sobre el sensor de recepción magneto-restrictivo, la inducción magnética del acero cambia debido al efecto de Villari [33]. Los cambios en la inducción magnética generan un voltaje eléctrico en la bobina receptora, que se amplifica, filtra y procesa.

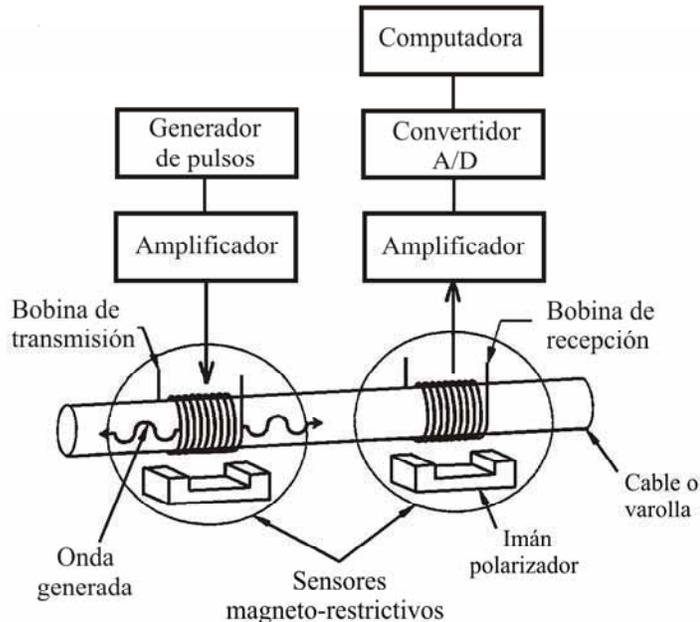


Figura 6.5

Diagrama del arreglo de sensores, e instrumentos magneto-restrictivos

6.2.1 Detección de corrosión en cables y varillas

Para validar la detección de corrosión en cables y varillas se realizó un estudio en el que se indujo corrosión a siete cables y diez varillas ^[32]. Los elementos se enterraron y se indujo corrosión en ellos mediante un baño semanal de ácido sulfúrico y soluciones salinas. Cada semana se desenterraban y monitoreaban con los sensores magneto-restrictivos. Los resultados fueron favorables, ya que se identificaron de manera notoria, variaciones constantes en el aumento de atenuación de la señal de acuerdo con el grado de corrosión que se iba presentando en los cables y varillas. De ahí se concluyó que la técnica provee una alternativa para la inspección de estos elementos con base un método que no requiere el contacto directo.

Las figuras 6.6 y 6.7 muestran datos típicos de la señal en el dominio del tiempo y su espectro en frecuencia en diez cables de prefuerzo sin corrosión. En la figura 6.8a aparecen los resultados obtenidos con los cables, y en la 6.8b los correspondientes a las varillas. Se midieron tres condiciones de daño por corrosión: 0%, 5% y 10% para las varillas, y 0%, 15% y 30% para los cables. Es importante notar en estas figuras las variaciones en la atenuación a medida que aumenta la corrosión, siendo más sensibles los cables al inicio del daño.

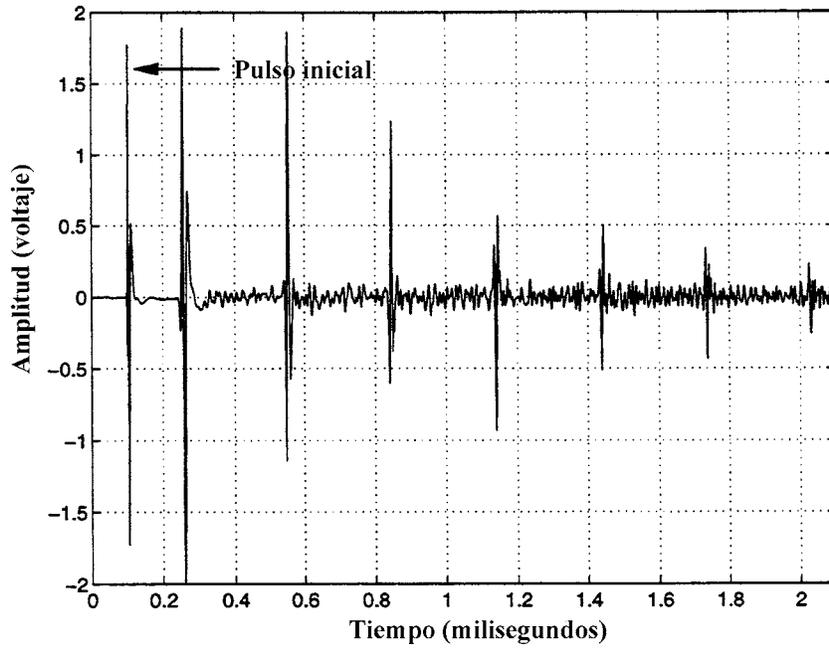


Figura 6.6
Resultados típicos de mediciones magneto-restrictivas en varillas de acero no corroídas

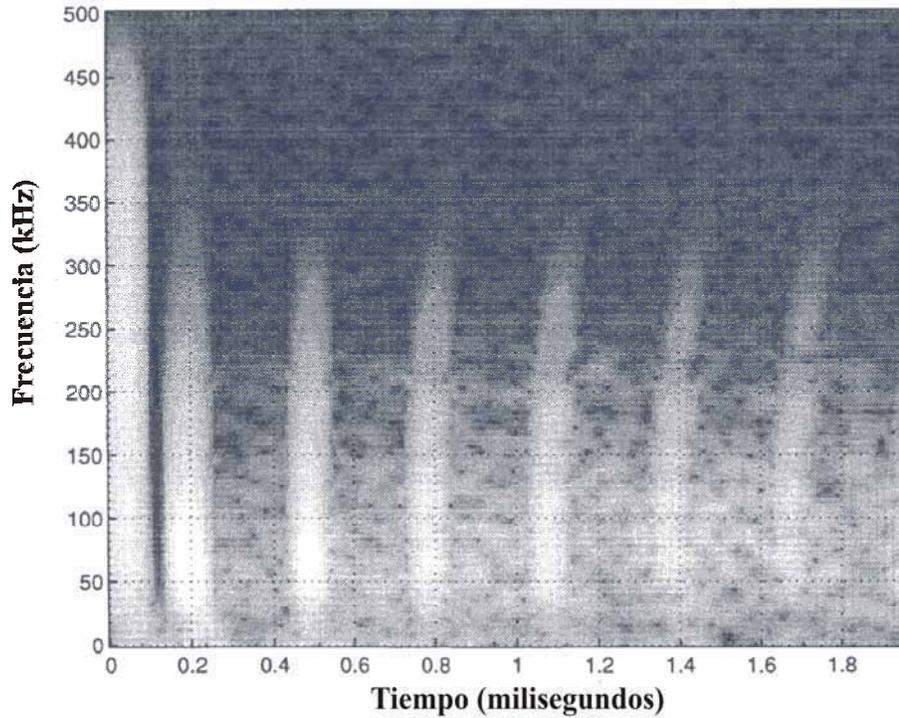


Figura 6.7
Espectrograma de los datos de la figura 6.6

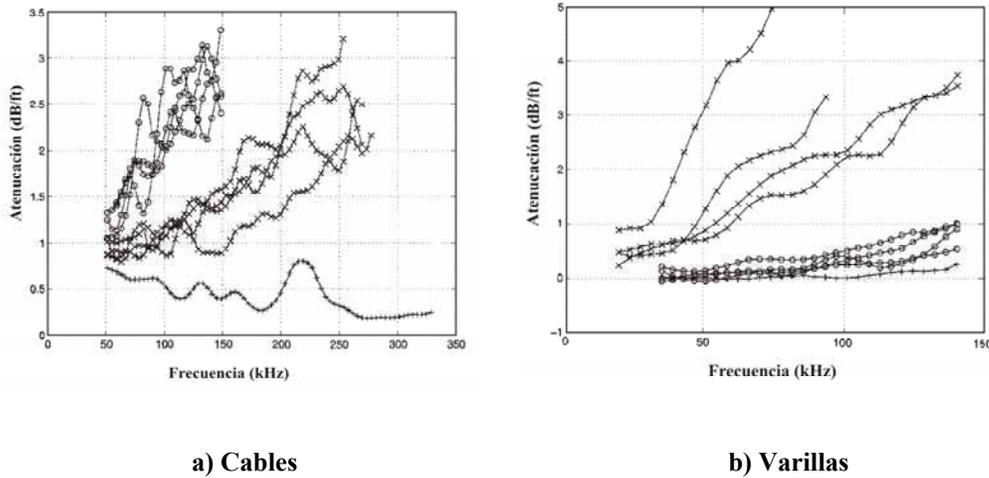


Figura 6.8
Atenuación vs frecuencia para tres condiciones: (+) Sin corrosión; (o) Nivel medio de daño por corrosión; (x) Nivel alto de daño por corrosión

6.2.2 Detección de defectos en cables y varillas

En la detección de defectos en cables y varillas, los sensores magneto-restrictivos arrojaron resultados favorables [33]. Para localizar defectos en estas geometrías, el conocimiento del comportamiento de la atenuación como función de la frecuencia, es importante para seleccionar la frecuencia de inspección. Por ejemplo, en la de muestras sin corrosión, la frecuencia óptima está en un rango de 50 a 300 kHz, con la ventaja de que las altas frecuencias son capaces de inspeccionar distancias más grandes. Las curvas de atenuación proporcionan una línea base de la relación *ruido-señal* cuando se busca defectos en cables y varillas con un nivel de corrosión conocido.

Los sensores detectan defectos, o la falla de uno de los cables mediante el análisis de la señal medida en tiempo por el sensor receptor. La onda elástica transmitida en el cable se refleja donde se encuentra un cable roto, por lo que una ruptura o defecto es detectado al detectarse, se ubica. La ubicación del defecto se calcula a partir de la velocidad de la onda y el tiempo que tarda en llegar al sensor receptor (figura 6.9). Es importante mencionar que la detección de defectos en los cables o varillas embebidas en concreto es difícil, ya que el concreto genera dos problemas: el primero de ellos es el difícil acceso a los elementos para colocar la bobina, y el segundo es la alta atenuación de la señal que limita la capacidad de inspección a distancia.

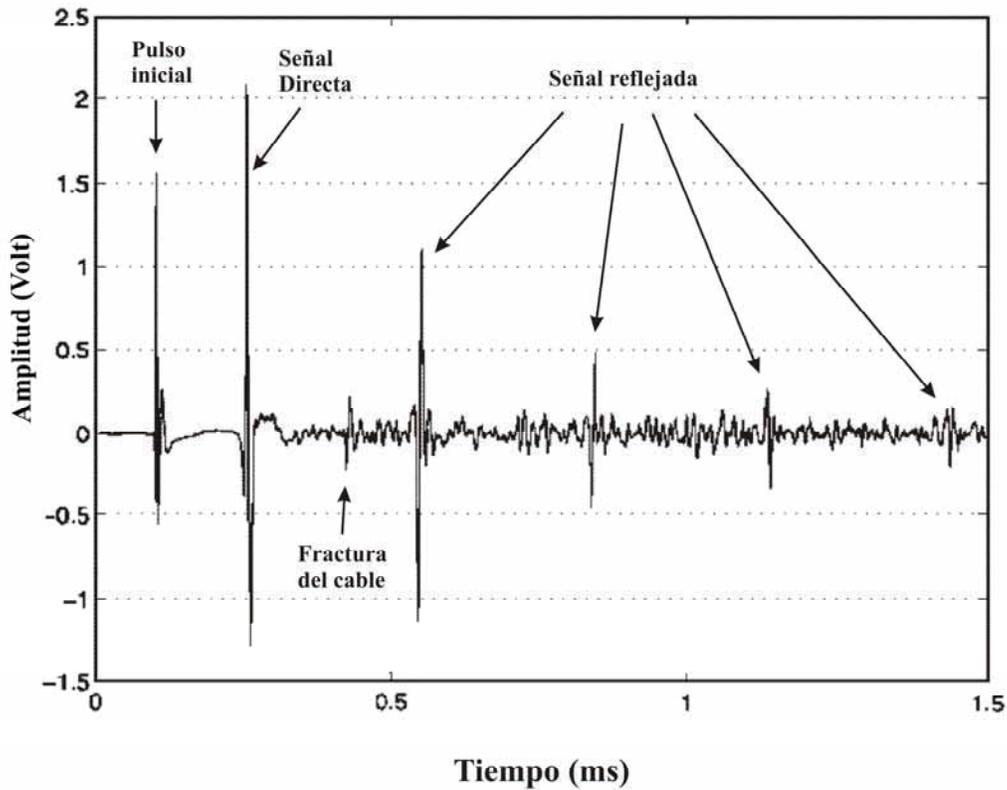
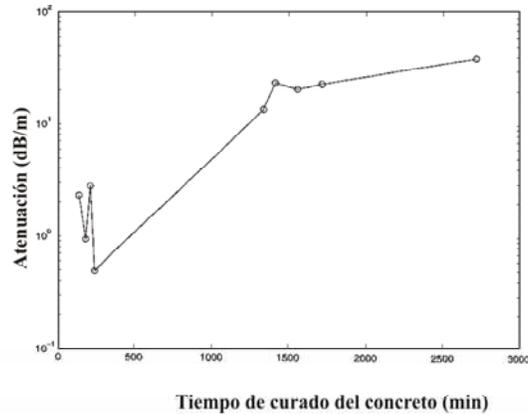


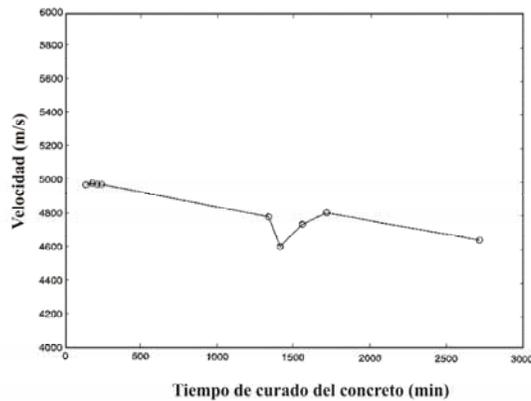
Figura 6.9
Señal reflejada en un cable de 20 pies de largo, con un reflejo debido a la fractura de un hilo

6.2.3 Evaluación del tiempo de curado del concreto

Para evaluar la capacidad de los sensores magneto-restrictivos para determinar el nivel de curado del concreto, se han realizado pruebas en las que los sensores quedan embebidos en el concreto y se mide su respuesta durante todo el proceso de curado [33]. En este caso, por cada cable se colocan tres sensores magneto-restrictivos, dos receptores, y un emisor. Cuando el concreto comienza a curar se inducen las ondas elásticas, mediante un golpe sobre el concreto. Con estas pruebas se correlaciona el cambio de velocidad en la propagación de las ondas elásticas, y su atenuación con el tiempo de curado (figura 6.10). Se concluye que la técnica puede ser buena para determinar el curado del concreto; sin embargo, se necesitan más pruebas para determinar los valores de calibración de los diferentes tipos de concreto.



(a) Atenuación de la onda elástica



(b) Velocidad de propagación de la onda elástica

Figura 6.10

Variaciones de la onda elástica, como función del curado del concreto

6.2.4 Determinación de la tensión en cables

El nivel de tensión de los cables puede determinarse con los sensores magneto-restrictivos y estudios experimentales ^[34] con cables sujetos a diferentes niveles de tensión en los que, se ha observado que la frecuencia de la señal aumenta a medida que la tensión se incrementa (figura 6.11). Eso lleva a considerar que esta técnicas puede servir como una nueva herramienta no destructiva en la evaluación de la tensión de los cables en puentes atirantados o presforzados, aunque aún falta desarrollar la metodología específica de cada caso y determinar las curvas de calibración.

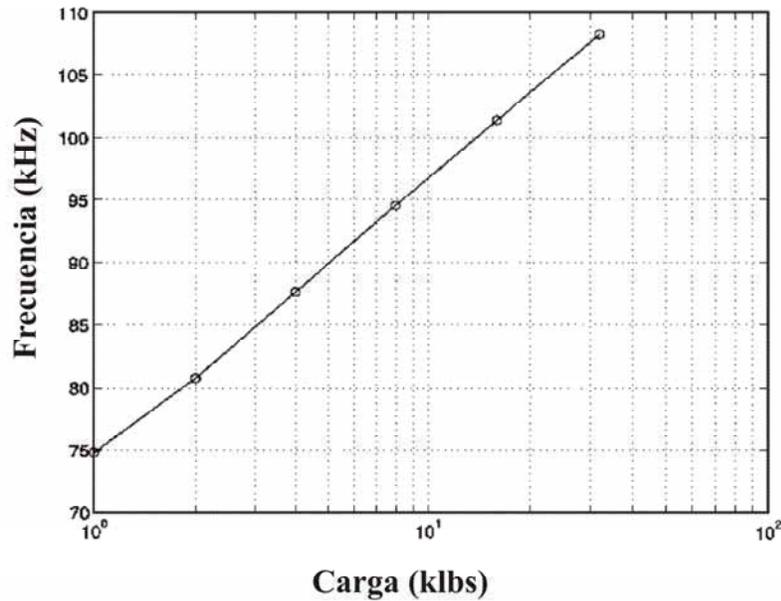


Figura 6.11
Grafica frecuencia-carga para un cable de presfuerzo de siete hilos

6.3 Sensores de corrosión

La degradación del acero en el concreto reforzado representa un elevado costo en el mantenimiento no programado de la infraestructura carretera y de comunicaciones [35]. Esta degradación se incrementa considerablemente a medida en que la edad de la infraestructura es mayor. La tecnología actual para el monitoreo de la corrosión del concreto se basa en la correlación entre parámetros químicos como la concentración de cloruros, y el grado de corrosión, o sobre variables externas e inclusive en el comportamiento de la varilla. Aunque generalmente se acepta que el contenido de cloruros determina el avance de la corrosión, esta medida indirecta del grado de corrosión ignora otros efectos importantes como la carbonatación, que se presentan en diferentes condiciones.

La corrosión es un fenómeno electroquímico en el que ocurren reacciones químicas en las que hay una transferencia de carga a través de una interfase, usualmente metal-electrolito. El potencial eléctrico a través de la interfase controla la proporción de la reacción y, por tanto, el avance afectación. El potencial se mide generalmente con respecto a un electrodo de referencia, y se dice que cuando el valor del potencial es más positivo, las reacciones de oxidación se aceleran (disolución del metal), y que cuando es más negativo, se presentan reacciones de reducción.

La proporción de una reacción electroquímica depende de la facilidad de transferencia de carga a través de la superficie, el transporte de iones de la solución a la superficie y las reacciones químicas. Sólo la razón de transferencia

de carga aumenta con el potencial aplicado. En el potencial de corrosión (E_{corr}), la oxidación del metal es balanceada por la reducción de reacciones en la superficie del metal; por tanto, no se requiere de una corriente externa. De ello, es que el potencial de corrosión sea el parámetro para determinar la medida del nivel de daño en una estructura.

Si el metal se cubre con una densa capa de óxido y el contacto entre la solución y el metal se bloquea, el metal se mantiene en condición pasiva, y la razón de corrosión es baja. En esta última situación, los valores de E_{corr} son cientos de milivolts más altos que en los estados activos.

La corrosión puede investigarse a través del cambio de potencial en el electrodo de referencia, ya que la corriente cambia linealmente con el potencial tendiendo al valor de E_{corr} . De la pendiente del potencial/corriente, la resistencia de polarización puede ser calculada, y la razón por el cual el metal se disuelve en el E_{corr} .

La curva corriente-voltaje muestra la formación de capas pasivas y permite conocer la naturaleza de las reacciones catódicas. Los valores de E_{corr} , por tanto, permiten establecer el grado de actividad del metal, y las mediciones obtenidas de las curvas de corriente/voltaje determinan la velocidad de la corrosión.

La figura 6.12 describe el significado por el cual las medidas electroquímicas pueden ser interpretadas para monitorear la corrosión en acero reforzado en concreto. Por el monitoreo de E_{corr} , la actividad de corrosión en el acero es evaluada. Desafortunadamente, la interpretación de tales mediciones suele ser difícil; sin embargo, la medición de la razón de corrosión se complementa usando la medición de la resistencia de polarización (R_p).

En teoría, estas mediciones pueden hacerse remotamente, pero existen complicaciones en la interpretación cuando en estructuras reforzadas hay una distribución espacial de las regiones activas y pasivas, como es usualmente el caso. Medidas de la concentración de cloruros, en combinación con E_{corr} y R_p , son necesarias para determinar las regiones afectadas por corrosión en el concreto.

Los tres parámetros principales para evaluar la corrosión emplean un circuito muy similar en sus lecturas. Un amplificador operacional es la base en el circuito; otro, con memoria provee una interfase de alta impedancia que mide los voltajes sin afectar las interfases bajo estudio. La lectura del E_{corr} se obtiene comparando el acero que trabaja como electrodo con el electrodo de referencia, la evaluación de los cloruros se logra cuantitativamente comparando el voltaje de un electrodo específico (Ag/AgCl) con el electrodo de referencia. En la lectura de la resistencia de polarización se requiere un potencióstato, y un amperímetro de resistencia cero.

A partir de los principios anteriores la Universidad de Virginia desarrolló varios sensores que pueden embeberse en concreto y que miden en forma continua el potencial de corrosión ^[35]. Entre las características más importantes de estos

sensores es que son pequeños, utilizan transmisores inalámbricos que alcanzan una distancia de 15 metros y son relativamente de bajo costo.

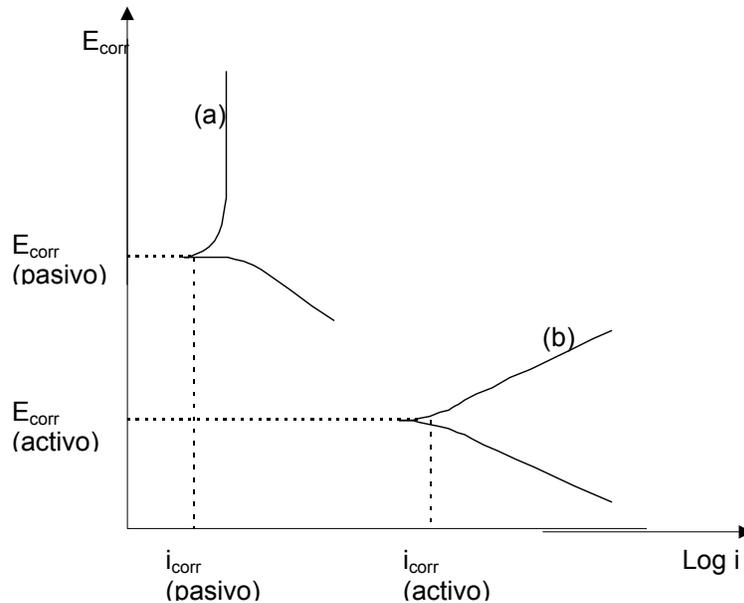


Figura 6.12
Curvas corriente/ potencial para un acero en estado activo y pasivo

El microinstrumento desarrollado compete en el monitoreo de la corrosión en concreto, con equipos comerciales que son de mayor costo y de un tamaño más grande. Los sensores, tanto de corrosión como de conductividad, trabajan muy bien y presentan una buena alternativa para el monitoreo continuo en este tipo de estructuras. Actualmente se siguen aplicando para valorar su operación y prolongar su vida útil.

6.4 Antena electromagnética

Para comprender las propiedades dieléctricas del concreto fabricado con cemento Pórtland (PCC), y correlacionar sus propiedades con la severidad y el tipo de defectos internos, se han realizado estudios para medir la permitividad y permeabilidad magnética del concreto en un rango de frecuencias de 100 kHz a 10 GHz, tanto en el dominio del tiempo como en el de frecuencia.

En uno de esos estudios del Instituto Politécnico de Virginia ^[36], se diseñó una antena electromagnética (figura 6.13), que consiste en un capacitor con una placa paralela, una línea de transmisión con un cable coaxial y una antena que transmite ondas electromagnéticas. Para evaluar el desempeño de la antena se fabricaron losas de 60x75x14 cm con defectos y sin defectos. Los defectos colocados en las

losas incluían delaminaciones, delaminaciones con agua, segregación y contaminación de cloruros.

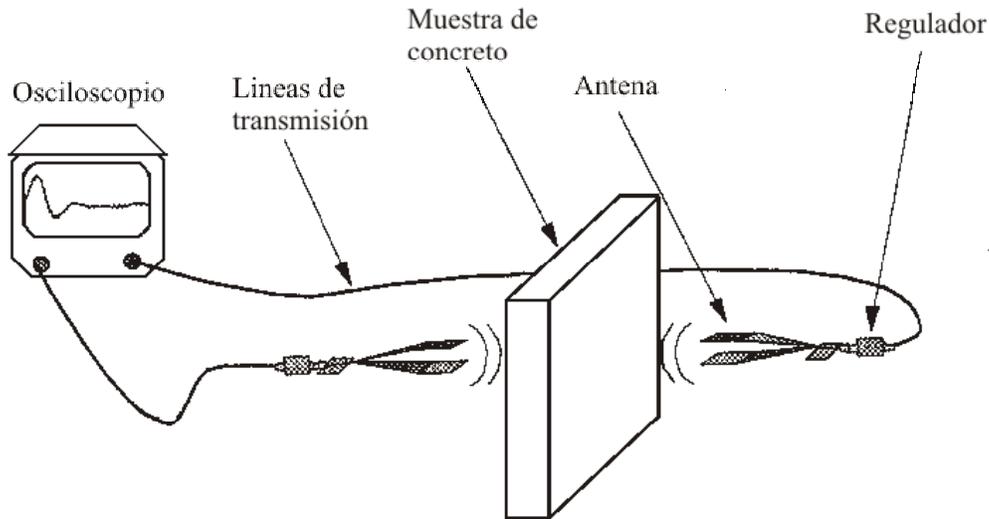


Figura 6.13

Diseño típico de una antena electromagnética para estudios de concreto

La antena responde a impulsos cortos para preservar su frecuencia; por tanto, operar en el dominio del tiempo. Se construyó con dos elementos; cada uno esta formado por una sección triangular (7.62 cm de base, y 30.26 cm de longitud), y una extensión de la placa paralela. Cada sección de la parte triangular de la antena consiste en dos vidrios con un recubrimiento de cobre en un lado. El ángulo entre las dos superficies de cada sección triangular es 17.4° y la parte final de las secciones se conecta a una placa paralela con una sección de (7.62 cm x 7.62 cm). La sección paralela de sección tiene cuatro columnas de resistores, cada una con diez unidades para minimizar los efectos de resonancia así como las reflexiones secundarias de las señales en el dominio del tiempo, y que corresponderían a respuestas distorsionadas a baja frecuencia en el dominio de la frecuencia.

Para la geometría descrita, la impedancia de un elemento sencillo es de 200Ω ; pero como hay dos elementos en paralelo, la impedancia de la antena es de 100Ω . Un transformador se emplea para acoplar la señal transmitida a la entrada de la antena, que también permite balancear 100 W en la antena para ser alimentados a 50 W por un generador de pulso coaxial.

El diseño de la antena permite medidas en un rango de frecuencias de 0.5 GHz a 15 GHz. Sin embargo, las mediciones de la constante dieléctrica presentan irregularidades en el cálculo del coeficiente de propagación en frecuencias menores de 1GHz, y mayores de 10 GHz. Por tanto, la evaluación de la constante eléctrica se mantiene en el rango de 1 a 10 GHz.

De los resultados en las pruebas se concluye que la contaminación de cloruros, y las delaminaciones en el PCC pueden detectarse en el rango de microondas a través del análisis de la amplitud de la onda y sus variaciones. De igual forma, la segregación también se detecta con algunas complicaciones, si la zona segregada contiene agua, aunque por otra parte, las áreas delaminadas con agua pueden ser cuantitativamente localizadas con un análisis de las ondas, o midiendo las propiedades dieléctricas del material.

Referencias

1. T L Anderson, *Fracture Mechanics*, **CRC Press**, Boca Raton, Flo (1991)
2. ASM International, *Failure Analysis and Prevention*, **ASM Metals Handbook 9th Ed Vol 11**, (1998).
3. S P Timoshenko, y J N Goodier, *Theory of Elasticity*, **McGraw-Hill**, New York, (1970).
4. V J Colangelo y F A Heiser, *Analysis of Metallurgical Failures*, **John Wiley & Sons**, New York, (1987).
5. Ch G Salomon y J E Johnson, *Steel Structures. Design and Behavior*, **HarperCollins College Publishers**, 4th Ed New York, (1996).
6. ASM International, *Fatigue and Fracture*, **ASM Metals Handbook 9th Ed.**, Vol **19**, (1998).
7. M F Kanninen y d C H Popelar, *Advanced Fracture Mechanics*, **Oxford University Press**, Singapore, (1985).
8. G E Dieter, *Mechanical Metallurgy*, **McGraw-Hill**, 3th Ed, (1985).
9. ASM, *Corrosion*, **ASM Metals Handbook 9th Ed**, Vol. **13**, ASM International (1998).
10. ASM International, *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, **ASM Metals Handbook 9th Ed**, Vol. **17**, (1998).
11. T Swift, *Damage Tolerance Certification of Commercial Aircraft*, Fatigue and Fracture, **ASM Metals Handbook 9th Ed**, Vol. 19, ASM International, (1998).
12. S I Vukelich, C L Petrin, Jr, y C A Annis, Jr, *A Recommended Methodology for Qualifying NDE/NDI, Based on Aircraft Engine Experience*, **AGARD-LS-190**, Advisory Group for Aerospace Research & Development, (Apr, 1993).
13. B D Olin, y W G Meeker, *Application of Statistical Methods to Nondestructive Evaluatio*, Technometrics, Vol **38**, No 2, pp 95-130, (1996).
14. NASA, *Standard NDE Guidelines and Requirements for Fracture Control Programs*”, **National Aeronautics and Space Administration**, Report No **MSFC-STD-1249**, (1985).
15. F W Spencer, *Visual Inspection Research Project on Benchmark Inspection*, Technical Report **DOT/FAA/AR-96/05**, U S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, (1996).
16. P C Paris, M P Gómez, y W E Anderson, *A Rational Analysis Theory of Fatigue*, **The Trend of Engineering**, Vol **13**, No 1, pp 9-14, (1961).
17. ASNT, *Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification*, **American Society for Nondestructive Testing**, Recommended Practice **SNT-TC-1A**, (2001).
18. D E Bray y D. McBride Eds., *Nondestructive Techniques*, **John Wiley and Sons**, New York, (1992).
19. J S Borucki, *Liquid Penetrant Inspection*, Nondestructive Inspection and Quality Control, **ASM Handbook 9th Ed**, Vol. **17**, ASM International, (1998).
20. R Halmshaw, *Nondestructive Testing*, 2nd edition, **Edward Arnold**, London, (1991).

21. ASM International, *Eddy Current Inspection*, Nondestructive Evaluation and Quality Control, **ASM Handbook 9th Ed.**, Vol. **17**, (1998).
22. H. Kwun y G L Burkhardt, *Journal of Applied Physics*, Vol **61**, p 1576 (1987).
23. ASM International, *Ultrasonic Inspection*, Nondestructive Evaluation and Quality Control, **ASM Handbook 9th Ed**, Vol **17**, (1998).
24. H. Berger, *100 Years of X-Rays – Industrial use of NDT and the Role of ASNT*, Materials Evaluation, Vol **11**, pp 1253-1260, (1995).
25. T A Heppenheimer, *Medical Imaging: The Inside Story*, American Heritage of Invention & Technology, Vol **15**, pp 54-63, (2000).
26. ASM International, *Radiographic Inspection*, Nondestructive Evaluation and Quality Control, **ASM Handbook 9th Ed**, Vol **17** (1998).
27. M J Dennis, *Industrial Computed Tomography*, Nondestructive Evaluation and Quality Control, **ASM Handbook 9th Ed**, Vol **17**, (1998).
28. S B Chase, *Developing NDT Technologies for the Next Century*, Structural Materials Technology: an NDT Conference, San Diego, Cal, pp 91-105, (1998).
29. D R Huston, J Q Hu, K R Maser, W H Weedon, y C Adam, *Ground Penetrating Radar for Concrete Bridge Health Monitoring Applications*, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, **SPIE 3587**, Newport Beach, pp 170-179, (1999).
30. N C Davidson, S B Chase, *Initial Testing of Advanced Ground Penetrating Radar Technology for the Inspection of Bridge Decks - The Hermes and Peres Bridge Inspectors*”, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, **SPIE 3587**, Newport Beach, pp 180-197, (1999).
31. R M Morey, *Innovative GPR for Pavement Inspection*, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, **SPIE 3587**, Newport Beach, pp 200-209,(1999).
32. K A Bartels, H Knuw, y J J Hanley, *Magnetostrictive Sensors for the Characterization of Corrosion in Rebars and Prestressing Strands*”, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways, **SPIE 2946**, Scottsdale, pp 40-49, (1996).
33. K A Bartels, C P Dynes, Y Lu, y H Kwun, *Evaluation of Concrete Reinforcements using Magnetostrictive Sensors*”, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, **SPIE 3587**, Newport Beach, pp 210-218, (1999).
34. H Kwun, K A Bartels, y J J Hanley, *Effects of Tensile Loading on the properties of Elastic-wave Propagation in a Strand*, **J. Acoust Soc Am** **103**, pp. 3370-3375, (1998).
35. R G Kelly, J Yuan, S H Jones, W Wang, K Hudson, A Sime, O Shneider, y G G Clement, *Embeddable Sensor for Corrosion Measurement*”, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, **SPIE 3587**, Newport Beach, pp 16-27, (1999).
36. I L Al-Qadi, S M Riad, W Su, y R H Haddad, *Detecting Flaws in Portland Cement Concrete using TERM Horn antennae*, Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways, **SPIE 2946**, Scottsdale, pp 28-39, (1996).

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx