

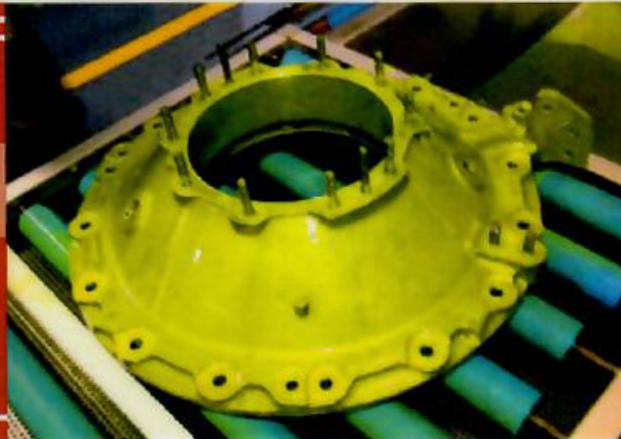


INTRODUCCIÓN

A LOS ENSAYOS DE

LOS MATERIALES Y SUS

APLICACIONES EN AVIACIÓN



Ricardo Javier Paredes Muñoz

Mayor Ricardo Javier Paredes Muñoz
Ingeniero Mecánico

Introducción a los Ensayos de los Materiales y sus Aplicaciones en Aviación

Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”
Santiago de Cali, Abril de 2009



Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez
Mayor Ricardo Javier Paredes Muñoz
Ingeniero Mecánico
Santiago de Cali, Abril de 2009

Diagramación: Imágenes Gráficas S.A.
Carrera 8 No. 49-08
PBX: 441 6153
www.imagenesgraficas.com
Cali, Colombia

Tabla de contenido

Pag.

Introducción

0

1. Ensayos de materiales

- 1.1 Ensayos científicos
- 1.2 Ensayos tecnológicos
- 1.3 Análisis químicos
- 1.4 Investigaciones físicas
- 1.5 Ensayos destructivos
- 1.6 Ensayos no destructivos
- 1.7 Ensayos estáticos
- 1.8 Ensayos dinámicos

2. Ensayos destructivos

- 2.1 Ensayos estáticos
 - 2.1.1 Ensayo de tracción
 - 2.1.2 Ensayo de tracción en caliente
 - 2.1.3 Ensayos de larga duración
 - 2.1.4 Ensayo de compresión
 - 2.1.5 Ensayo de flexión
 - 2.1.6 Ensayo de torsión
 - 2.1.7 Ensayo de cortadura
 - 2.1.8 Ensayo de dureza
- 2.2 Ensayos dinámicos
 - 2.2.1 Ensayo dinámico de dureza
 - 2.2.2 Ensayo de resistencia al impacto
 - 2.2.3 Ensayo de resistencia a la fatiga

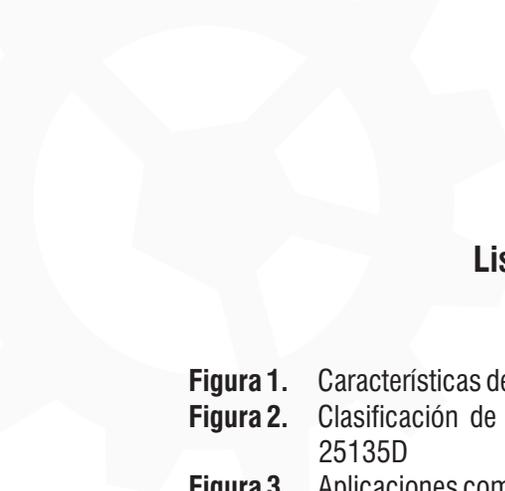
3. Ensayos no destructivos y control de defectos

- 3.1 Clasificación y características de los end
 - 3.1.1 Técnicas de inspección superficial
 - 3.1.2 Técnicas de inspección volumétrica
 - 3.1.3 Técnicas de inspección de la integridad o de la hermeticidad
 - 3.1.4 Ventaja de los ensayos no destructivos
 - 3.1.5 Limitaciones de los ensayos no destructivos
 - 3.1.6 Beneficios del empleo de los ensayos no destructivos
 - 3.1.7 Selección del ensayo no destructivo adecuado
- 3.2 Ensayo visual

- 3.3 Líquidos penetrantes
- 3.3.1 Principios básicos del ensayo por líquidos penetrantes
- 3.3.2 Definiciones
- 3.3.3 Aplicación de la prueba
- 3.3.4 Equipos para inspección por líquidos penetrantes
- 3.4 Partículas magnéticas
- 3.4.1 Principios básicos del ensayo por partículas magnéticas
- 3.4.2 Definiciones
- 3.4.3 Aplicación de la prueba
- 3.4.4 Equipos para inspección por partículas magnéticas
- 3.5 Ultrasonido
- 3.5.1 Principios básicos del ensayo por ultrasonido
- 3.5.2 Definiciones
- 3.5.3 Aplicación de la prueba
- 3.5.4 Equipos para inspección por ultrasonido
- 3.6 Corrientes inducidas
- 3.6.1 Principios básicos del ensayo por corrientes inducidas
- 3.6.2 Definiciones
- 3.6.3 Aplicación de la prueba
- 3.6.4 Equipos para inspección por corrientes inducidas
- 3.7 Radiografía industrial
- 3.7.1 Principios básicos del ensayo por radiografía
- 3.7.2 Definiciones
- 3.7.3 Aplicación de la prueba
- 3.7.4 Equipos para inspección por radiografía

- 4 Otras técnicas de inspección**
- 4.1 Termografía industrial
- 4.1.1 Los rayos infrarrojos
- 4.1.2 La termografía y el mantenimiento
- 4.1.3 Principios básicos del ensayo por termografía
- 4.1.4 Definiciones
- 4.1.5 Aplicación de la prueba
- 4.1.6 Equipos para inspección por termografía
- 4.2 Análisis de aceites
- 4.2.1 Análisis de aceites en el mantenimiento aeronáutico
- 4.2.2 Espectrofotometría de absorción atómica
- 4.2.3 Principios básicos de la espectrofotometría de absorción atómica
- 4.2.4 Definiciones
- 4.2.5 Aplicación de la prueba

5 Bibliografía



Lista de Tablas

	Pag.
Figura 1. Características de Ensayos No Destructivos comunes	0
Figura 2. Clasificación de los líquidos penetrantes según la MIL-I-25135D	
Figura 3. Aplicaciones comunes del ensayo por Termografía	

Lista de Figuras

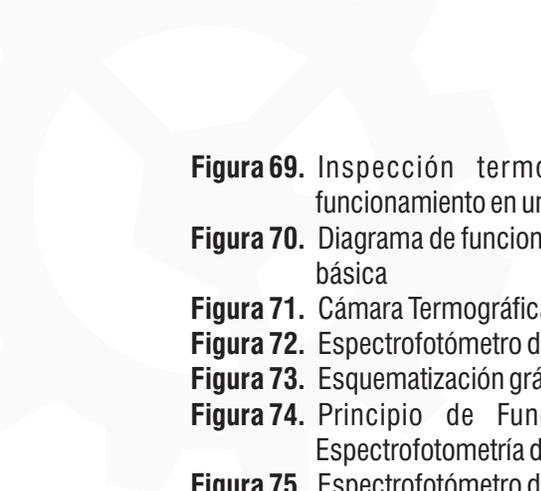
Pag.

0

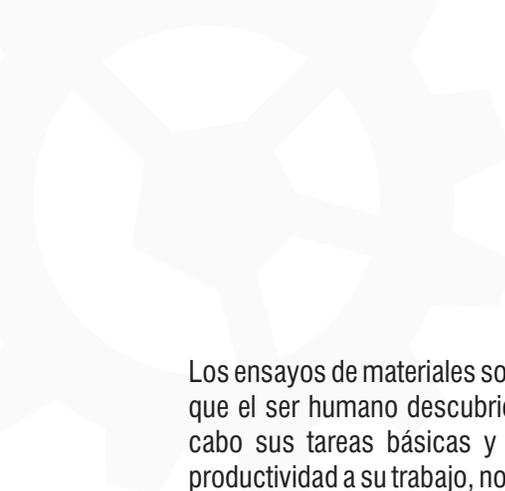
- Figura 1.** Materias primas y materiales primarios
- Figura 2.** Comportamiento de un material dúctil al ensayo de tracción
- Figura 3.** Estructura metalográfica de un material metálico observada al microscopio
- Figura 4.** Montaje para el ensayo a tracción de una probeta de acero
- Figura 5.** Clasificación de los ensayos por subgrupos
- Figura 6.** Comportamiento típico de resistencia y deformación para un material dúctil ensayado a tracción
- Figura 7.** Elemento de Hormigón sometido al ensayo de compresión
- Figura 8.** Montaje para el ensayo de flexión de una probeta de acero
- Figura 9.** Falla característica de un material metálico sometido al ensayo de torsión
- Figura 10.** Patrón de calibración para el ensayo de dureza Rockwell
- Figura 11.** Péndulo Charpy para la realización del ensayo de resistencia al impacto
- Figura 12.** Montaje para el ensayo de fatiga de una probeta de acero y falla característica.
- Figura 13.** Criterios de falla para el ensayo de fatiga y límite de vida infinita.
- Figura 14.** aeronáutica de los END
- Figura 15.** Componente aeronáutico en proceso de inspección por END
- Figura 16.** Componente aeronáutico en proceso de inspección por END superficial
- Figura 17.** Componente aeronáutico en proceso de inspección por END volumétrico
- Figura 18.** Barra de acero defectuosa detectada por END
- Figura 19.** Patrón de calibración para END volumétrico
- Figura 20.** Pieza inspeccionada por END antes de ser puesta en servicio
- Figura 21.** Norma ASTM-, Entrenamiento y calificación de inspectores en END

- Figura 22.** Componente aeronáutico en proceso de inspección por ensayo visual
- Figura 23.** Juego básico de implementos para la inspección por líquidos penetrantes
- Figura 24.** Efecto de la acción capilar sobre una columna de agua y sobre una de mercurio
- Figura 25.** Efecto de la tensión superficial de un líquido
- Figura 26.** Aplicación de penetrante fluorescente en inspección por líquidos penetrantes
- Figura 27.** Componente en inspección en estación de penetración del líquido
- Figura 28.** Remoción del exceso de penetrante método lavable con agua
- Figura 29.** Inspección bajo luz negra del componente aeronáutico
- Figura 30.** Banco estático para inspección por líquidos penetrantes
- Figura 31.** Cigüeñal de un motor aeronáutico inspeccionado por partículas magnéticas en banco estático
- Figura 32.** Biela de un motor aeronáutico inspeccionado por partículas magnéticas
- Figura 33.** Componente aeronáutico sin haber sido magnetizado
- Figura 34.** Pre limpieza componente aeronáutico para ser sometido a la inspección por partículas magnéticas
- Figura 35.** Componente magnetizado en banco estático de partículas magnéticas
- Figura 36.** Inspección del componente magnetizado bajo luz negra
- Figura 37.** Banco estático para inspección por partículas magnéticas
- Figura 38.** Inspección de soldaduras en un oleoducto por medio de ultrasonido
- Figura 39.** Calibración inicial de la señal buscada en el ensayo por ultrasonido
- Figura 40.** Principio de detección de discontinuidades dentro material por medio de la inspección con ultrasonido
- Figura 41.** Esquema del haz ultrasónico en donde se observan las zonas de campo cercano y campo lejano
- Figura 42.** Inspección estructural al timón de dirección por ultrasonido
- Figura 43.** Equipo para la inspección por ultrasonido

- Figura 44.** Sistema automatizado de inspección por corrientes inducidas en una rueda de turbina
- Figura 45.** Inspección manual por corrientes inducidas.
- Figura 46.** Inspección manual viga principal por corrientes inducidas
- Figura 47.** Principio de funcionamiento de la inspección por medio de corrientes inducidas o de EDDY
- Figura 48.** Pre limpieza componente aeronáutico para inspección por corrientes inducidas
- Figura 49.** Calibración de la señal buscada en la pieza a inspeccionar mediante el bloque patrón
- Figura 50.** Barrido sobre la pieza inspeccionada por corrientes inducidas en busca de la señal previamente calibrada
- Figura 51.** Equipo para inspección por corrientes inducidas
- Figura 52.** Inspección sobre los planos de un F-18 por radiografía industrial
- Figura 53.** Inspección en banco fijo de radiografía industrial
- Figura 54.** Fuente de rayos gamma
- Figura 55.** Principio de inspección de soldaduras por radiografía industrial
- Figura 56.** Placas radiográficas de uso industrial
- Figura 57.** Efecto de la distancia fuente-objeto-película sobre la penumbra captada
- Figura 58.** Exposición de las películas en el proceso de inspección por radiografía industrial
- Figura 59.** Proceso de revelado de las placas radiográficas expuestas
- Figura 60.** Componente aeronáutico defectuoso detectado mediante radiografía industrial
- Figura 61.** Tubos de Rayos X para radiografía industrial
- Figura 62.** Termografía de instalación eléctrica de alta tensión con conexión mal fijada
- Figura 63.** Termografía de bomba de impulsión sobrecargada
- Figura 64.** Termografía del conjunto de tren de aterrizaje que muestra el comportamiento del sistema de frenos
- Figura 65.** Termografía motor eléctrico con sobrecalentamiento del eje por Desalineación
- Figura 66.** Termografía de rodillos sospechosos en una línea de producción
- Figura 67.** Medición del nivel de llenado de un tanque por medio de Termografía
- Figura 68.** Espectro electromagnético y región de rayos infrarrojos

- 
- Figura 69.** Inspección termográfica para verificación del funcionamiento en un motor eléctrico 0
- Figura 70.** Diagrama de funcionamiento de una cámara termográfica básica
- Figura 71.** Cámara Termográfica
- Figura 72.** Espectrofotómetro de Absorción Atómica
- Figura 73.** Esquematización gráfica de la Ley de Beer-Lambert
- Figura 74.** Principio de Funcionamiento de un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica
- Figura 75.** Espectrofotómetro de Absorción Atómica de llama
- Figura 76.** Espectrofotómetro de Absorción Atómica de horno de grafito





INTRODUCCIÓN

Los ensayos de materiales son tan antiguos como los materiales mismos; desde que el ser humano descubrió que el uso de herramientas le facilitaba llevar a cabo sus tareas básicas y que adicionalmente le aportaban un sentido de productividad a su trabajo, no ha cesado en su búsqueda por mejorarlas bien sea desde su diseño, su automatización y desde luego los materiales con los cuales las ha fabricado.

Con el descubrimiento y uso de cada tipo de material también se han desarrollado los métodos y técnicas de inspección con los cuales se ha buscado en primera instancia cuantificar sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y eléctricas entre otras y más adelante garantizar las condiciones de funcionamiento de éstos materiales cuando son transformados en piezas y componentes dentro de un sistema mecánico.



1. ENSAYOS DE MATERIALES

Los ensayos de materiales tienen la misión de comprobar la aptitud de los materiales para su empleo, de acuerdo con la subdivisión de los materiales o productos en materias primas y materiales primarios (Figura 1).

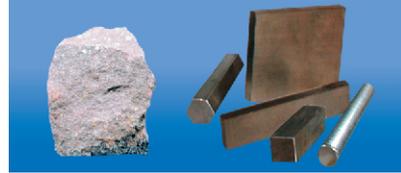


Figura 1. Materias primas y materiales primarios. Roca de mineral de hierro como materia prima para la elaboración de laminados y barras de acero que servirán como materiales primarios para la elaboración de productos terminados. Tomado de: <http://www.estudiantes.info/tecnologia/metales/hierro.htm>

Materias primas. Son productos que sirven para la elaboración por procedimientos industriales de semielaborados o productos acabados, cuentan entre ellas por ejemplo, los minerales, rocas, petróleo, gas natural, carbón, etc.

Materiales primarios. Son productos que en parte provienen de la naturaleza, pero que por lo regular se obtienen de las materias primas y sirven para la fabricación de productos terminados.

Los ensayos de materiales de acuerdo a su origen, modo de aplicación, acción sobre la pieza y otros factores se pueden clasificar en grupos dentro de los cuales se encuentran:

1.1 ENSAYOS CIENTÍFICOS

Al campo de los ensayos científicos pertenecen los procedimientos que permiten obtener en todo momento valores reproducibles de los exámenes realizados. Los resultados obtenidos deben de poder expresarse en cifras o magnitudes físicas, un ejemplo de este tipo de ensayo es la medición de la resistencia a la tracción en kPa/mm^2 o del alargamiento en % (Figura 2).

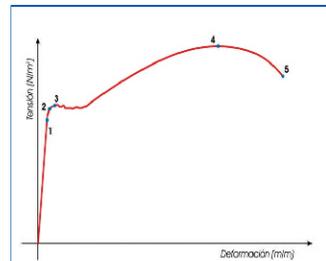


Figura 2. Comportamiento de un material dúctil al ensayo de tracción. Tomado de: http://www.iesvelazquez.org/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=193&Itemid=34&lang=fr

1.2 ENSAYOS TECNOLÓGICOS

Con este tipo de ensayos se tiende a organizar las pruebas de manera que éstas satisfagan las exigencias prácticas que se especifican en el material y en toda la pieza, ejemplos de este tipo de ensayos pueden ser la prueba de caída o la

prueba de maleabilidad para material de forja, la prueba de flexión alternativa de alambres o el ensayo de tracción.

1.3 ANÁLISIS QUÍMICOS

Por análisis químico se debe entender en primer lugar la determinación de la composición del material, como ejemplo es importante determinar la naturaleza (cualitativamente) y la cantidad (cuantitativamente) de los elementos existentes en el material,

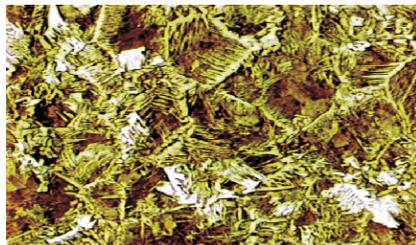


Figura 3. Estructura metalográfica de un material metálico observada al microscopio. Tomado de: <http://www.institucional.us.es/abioticos/abioticos.htm>

igualmente una característica importante y decisiva en un material es su tipo de enlace químico, manifiesto en el tipo de estructura del carbono en el hierro fundido, por ejemplo, como hierro combinado o como grafito (Figura 3). Otras

1.4 INVESTIGACIONES FÍSICAS

A las experiencias físicas pertenecen los estudios de resistencia, los ensayos magnéticos y eléctricos, el examen de la estructura de las materias, medición de la flexión, y un número amplio adicional de ensayos que serán discutidos más adelante.

1.5 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los ensayos mecánicos son el campo principal de los ensayos destructivos, o sea de las pruebas físicas. Están comprendidos aquí el ensayo a la tracción (Figura 4), a la compresión, a la flexión, a la torsión, la determinación de la dureza y otros muchos más en los que se determinan las tensiones que soporta el material, o bien el comportamiento de éste bajo la acción de determinadas tensiones. Igualmente pertenecen a este grupo las investigaciones estructurales (metalográficas) de materiales metálicos, así como las determinaciones del punto de fusión, etc.



Figura 4. Montaje para el ensayo a tracción de una probeta de acero. Tomado de: <http://isarabaga.wordpress.com/ensayo-de-traccion/>

1.6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Este tipo de ensayo se emplea de ordinario cuando se trata de analizar, no el material en sí, sino la pieza. Así pues, no interesa en general la verificación de las

características del material, ni siquiera dentro de la pieza en conjunto, sino estipular los defectos de ésta, estos defectos pueden ser por ejemplo, rechupes, grietas o inclusiones por arena y otros.

1.7 ENSAYOS ESTÁTICOS

Por ensayos estáticos se entienden las pruebas en las que la velocidad con la que es solicitado el material, no tiene influencia alguna en el resultado del ensayo y por lo tanto tampoco es preciso tomarla en consideración.

1.8 ENSAYOS DINÁMICOS

En estos ensayos, la velocidad de aplicación de la carga juega un papel decisivo, dado que al aplicar una fuerza como carga, ésta tiene que recorrer siempre un trayecto, el cual aun en un corto intervalo de tiempo puede llegar a tener importancia decisiva, como magnitud de carga figurará aquí generalmente no la fuerza misma, sino el producto de la fuerza por el recorrido es decir el trabajo aplicado.



Figura 5. Clasificación de los ensayos por subgrupos. Elaboración propia.

De lo anterior resulta el siguiente esquema de la correspondiente clasificación de los ensayos de materiales en subgrupos (Figura 5).



2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Un ensayo destructivo es aquel mediante el cual podemos establecer cuantitativamente una propiedad o característica de una muestra de material, dentro de estas propiedades tenemos la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión, la resistencia al esfuerzo cortante, la dureza, el porcentaje de elongación entre otras. El ensayo destructivo se caracteriza por la destrucción o alteración físico química de la muestra, los ensayos destructivos se aplican en forma estática o dinámica a la pieza, y su principal efecto es la influencia que pueda tener la velocidad de aplicación de la fuerza sobre los resultados del ensayo, según lo tratado anteriormente. El objeto principal de los ensayos destructivos es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales, como resistencia mecánica, la tenacidad o la dureza, la ejecución de los ensayos destructivos involucra el daño del material, la destrucción de la probeta o de la pieza empleada en la determinación correspondiente, por lo que podemos concluir que los ensayos destructivos son la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, parte o componente sujeto a inspección.

Este tipo de pruebas siempre ha sido necesario para comprobar si las características de un material cumplen con lo especificado durante el diseño, debe observarse que estas pruebas no se pueden aplicar a todas las partes o componentes, ya que serían destruidos y perderían su utilidad.

2.1 ENSAYOS ESTÁTICOS

2.1.1 Ensayo de tracción

En el ensayo de tracción (Figura 6), se mide la deformación, es decir, la extensión que experimenta el material en fase de ensayo por la acción de la fuerza. Si efectuamos el cociente de la fuerza aplicada sobre un material entre el área de la sección sometida al esfuerzo obtenemos entonces la tensión con la que es ensayado el material (kPa/mm^2), así mismo una medida importante es el alargamiento sufrido por el material en prueba, el cual se deriva del cociente del cambio de longitud entre la longitud inicial de la pieza.

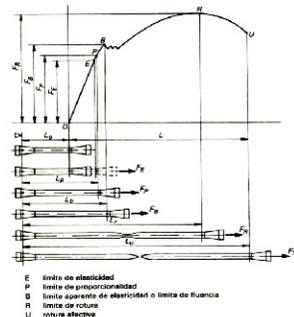


Figura 9. Falla característica de un material metálico sometido al ensayo de torsión. Tomado de: http://www.foroswebgratis.com/tema-corte_de_eje_por_torsion-4119-582731.htm

2.1.2 Ensayo de tracción en caliente

La realización de los ensayos de tracción en caliente sigue las mismas normas de los ensayos a temperatura ambiente y específicamente se aplican en elementos en que se requiere, por sus condiciones de trabajo, determinar su resistencia a la tracción a temperaturas elevadas.

2.1.3 Ensayo de larga duración

Los ensayos de larga duración son una variante de los ensayos de tracción a temperatura ambiente y a altas temperaturas, en los cuales muchas veces es necesario que las fuerzas actúen durante bastante tiempo para examinar el comportamiento de los materiales bajo estos esfuerzos a largo plazo.

2.1.4 Ensayo de compresión

El ensayo de compresión es un ensayo análogo al de tracción, y su aplicación es de forma similar, es decir, se hace actuar una fuerza a lo largo de la sección de ensayo y se reportan de igual manera las propiedades de resistencia a la compresión (kPa/mm^2), el límite de aplastamiento y la contracción longitudinal o recalada. Este ensayo no tiene mayor aplicación en materiales metálicos, pero si tiene gran importancia en la examinación de materiales de construcción como el hormigón (Figura 7).



Figura 7. Elemento de Hormigón sometido al ensayo de compresión. Tomado de: http://www.cuadernodelaboratorio.es/visita_cementera.htm

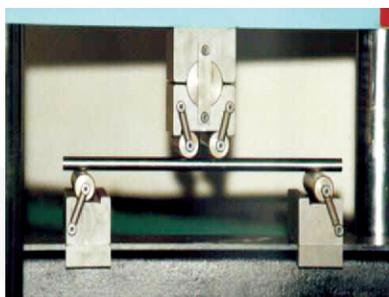


Figura 8. Montaje para el ensayo de flexión de una probeta de acero. Tomado de: <http://emetSensayodemateriales.blogspot.com/2007/08/flexion.html>

2.1.5 Ensayo de flexión

Los ensayos de flexión implican la aplicación de cargas normales, es decir perpendiculares a la sección de la pieza, que a su vez dan origen a tensiones de tracción y de compresión en la misma sección de la pieza, aunque su magnitud no es la misma a lo largo de la sección misma, sino que presenta una distribución creciente desde cero hasta

un valor máximo. Para la realización de la prueba se coloca la muestra sobre dos apoyos A y B (Figura 8), con una separación entre los apoyos L, se aplica una fuerza única P en el punto medio, y se obtiene la magnitud del momento flector $M = PL/4$ ($\text{kPa}\cdot\text{m}$).

2.1.6 Ensayo de torsión

Si una probeta se somete a carga por un par de fuerzas que actúan en el plano de su sección transversal, se produce un par de giro, que origina tensiones en el citado plano de la sección transversal, tensiones de cortadura, o también llamadas tensiones tangenciales, dado que actúan



Figura 9. Falla característica de un material metálico sometido al ensayo de torsión. Tomado de: http://www.foroswebgratis.com/tema-corte_de_eje_por_torsion-4119-582731.htm

tangencialmente en las secciones circulares respectivas (Figura 9). Con la carga así aplicada, la tensión en el centro de la sección circular es igual a cero y aumenta linealmente hasta la fibra superficial, siempre que los materiales dentro de la región de carga respondan a la ley de Hooke.¹

2.1.7 Ensayo de cortadura

La aplicación de este ensayo se realiza mediante la aplicación de fuerzas opuestas a la probeta, con el fin de producir su corte o cizallamiento, por lo que comúnmente se conocen los valores obtenidos como tensiones de cizallamiento. En la práctica el ensayo de cortadura no suele hacerse con frecuencia, dado que la resistencia a la cortadura puede deducirse, con más o menos exactitud del ensayo de tracción.

Resulta de acuerdo con esto para el acero que:

Resistencia a la cortadura = (0.75 - 0.80) Resistencia a la tensión

2.1.8 Ensayo de dureza

En la actualidad se define como dureza la resistencia que un cuerpo opone a la penetración de otro cuerpo más duro. La dureza entonces podría medirse como la relación de fuerzas que se necesita para vencer esta resistencia. En la actualidad existen varias técnicas de medición de dureza dentro de las cuales encontramos.

Método de dureza Brinell: como cuerpo penetrante se emplea una bola de acero templado que es oprimida con determinada fuerza P sobre la pieza a examinar produciendo una huella permanente. El tamaño de ésta, en función de la fuerza de compresión aplicada, se utiliza como medida de la dureza del material, siendo la dureza $D = P/F$ (kPa/mm²).

¹ Ley general de Hooke, Cuando una fuerza externa actúa sobre un material causa un esfuerzo o tensión en el interior del material que provoca la deformación del mismo. En muchos materiales, entre ellos los metales y los minerales, la deformación es directamente proporcional al esfuerzo. Esta relación se conoce como ley de Hooke, así llamada en honor del físico británico Robert Hooke, que fue el primero en expresarla. No obstante, si la fuerza externa supera un determinado valor, el material puede quedar deformado permanentemente, y la ley de Hooke ya no es válida. El máximo esfuerzo que un material puede soportar antes de quedar permanentemente deformado se denomina límite de elasticidad.

Método de dureza Rockwell: el método Rockwell tiene dos variantes que son Rockwell B, que emplea para la indentación una bola de acero como penetrador y el Rockwell C, que emplea como penetrador un diamante cónico. Al igual que en el método Brinell, se obtiene el valor de la dureza de la relación de la fuerza aplicada sobre el tamaño de la huella dejada en el material de ensayo (Figura 10).



Figura 10. Patrón de calibración para el ensayo de dureza Rockwell. Tomado de: <http://www.qualites.net/html/dureza.htm>

Método de dureza Vickers: en el ensayo de dureza Vickers se emplea un diamante en forma de pirámide como cuerpo penetrador. Al igual que en los métodos anteriores, el valor de la dureza se obtiene del cociente de la fuerza aplicada sobre el tamaño de la huella dejada.

2.2 ENSAYOS DINÁMICOS

2.2.1 Ensayo dinámico de dureza

En los ensayos dinámicos de dureza, el cuerpo penetrador se incrusta mediante su energía cinética en la pieza a ensayar y se mide en este lugar la deformación que experimenta la misma. La medición de la dureza se obtiene en forma similar que en los métodos estáticos, o por la determinación de la energía perdida por el cuerpo al penetrar dentro de la pieza a ensayar.



Figura 11. Péndulo Charpy para la realización del ensayo de resistencia al impacto. Tomado de: <http://www.eutii.upm.es/index/departamentos/mecanica/C%20instalaciones.htm>

2.2.2 Ensayo de resistencia al impacto

La resistencia de los materiales bajo esfuerzo dinámico se determina no sólo por la prueba dinámica de dureza, sino también por otros tipos de ensayos de impacto. La carga en estos ensayos puede aplicarse en forma de esfuerzo por choque en esfuerzos de tipo de tracción, compresión, flexión y torsión. El impacto se produce comúnmente mediante martinetas o péndulos Charpy (Figura 11).

2.2.3 Ensayo de resistencia a la fatiga

La falla por fatiga o esfuerzos alternativos, se produce cuando el material es sometido a una carga oscilante o alternativa durante un número determinado de ciclos (Figura 12). Se trata por lo tanto del desprendimiento del material (roturas) que aparecen por cargas muy por debajo del límite de elasticidad determinado para el material en el ensayo estático, pero que presuponen cierto número de esfuerzos (alternativos). La rotura puede producirse de esta forma por un esfuerzo grande (cerca de los límites estáticos) después de un reducido número de cargas

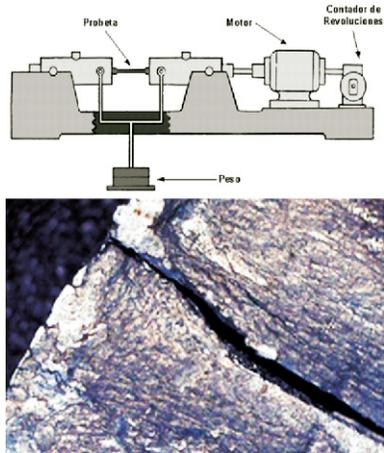


Figura 12. Montaje para el ensayo de fatiga de una probeta de acero y falla característica. Tomado de: <http://www2.ing.puc.cl/%7Eicm2312/apuntes/materiales/materials7.html>

alternativas, o con esfuerzos proporcionalmente menores, después de un elevado número de cargas alternativas. Existe sin embargo un límite de esfuerzo por debajo del cual, y por mucho que se repitan los esfuerzos alternativos, no se produce la rotura en ningún caso. La carga correspondiente a este límite se llama resistencia a la fatiga (Figura 13).

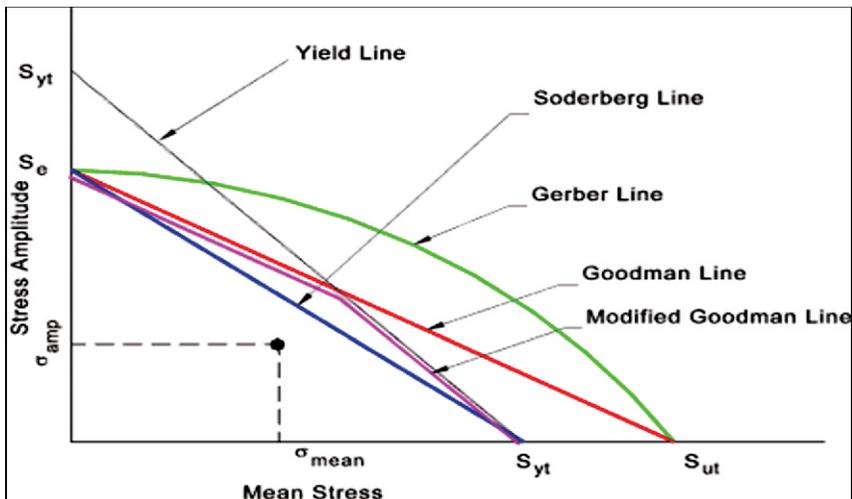


Figura 13. Criterios de falla para el ensayo de fatiga y límite de vida infinita. Tomado de: <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm>



3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y CONTROL DE DEFECTOS

Los Ensayos No Destructivos, END, son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente, las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, que era relativamente desconocida hasta hace pocos años, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado con sus productos. En la fabricación y/o construcción de componentes, sub ensambles, equipos e instalaciones, intervienen una serie de actividades cuya finalidad esta bien definida o delimitada; estas son principalmente: el diseño, la fabricación o construcción propiamente dicha, el montaje e instalación y finalmente la inspección y las pruebas. Estas actividades siempre se llevan a cabo, se trate de un tornillo, un embarque automotor, un intercambiador de calor, un reactor químico, el casco de un barco, una aeronave, una central de energía o un gasoducto (Figura 14).



Figura 14. Aplicación aeronáutica de los END. Tomado de: http://www.GE.com/GETT-12002EN_aerospace

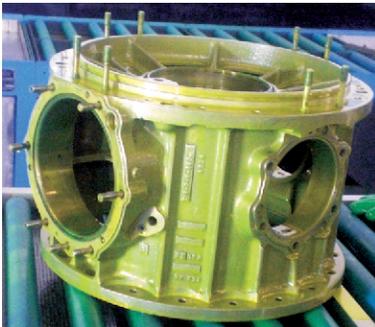


Figura 15. Componente aeronáutico en proceso de inspección por END. Visita LIJAN/CAMAN/FAC.

Debido al desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización de los productos o los requisitos de seguridad, como es el caso de la industria aeroespacial, la nuclear o la petroquímica se han impuesto también nuevas condiciones de inspección, en las cuales se estableció la necesidad de verificar hasta en un 100% los componentes críticos, lo cual planteó una severa dificultad a los departamentos de calidad, hasta que iniciaron el empleo de

otras técnicas de inspección, diferentes a la visual, con las cuales se media la integridad de los componentes sin destruirlos. Esto fue posible al medir alguna otra propiedad física del material que estuviera sujeto a inspección, es decir, se inició la aplicación de los ensayos no destructivos, los cuales actualmente son de uso común en casi todos los sectores industriales (Figura 15).

Los ensayos no destructivos son la aplicación de métodos físicos indirectos, como es la transmisión del sonido, la opacidad al paso de radiación, etc., y que tiene la finalidad de verificar la sanidad de las piezas examinadas. No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Por lo tanto, estas pruebas no sustituyen a los ensayos destructivos, sino que más bien los complementa. Los ensayos no destructivos, como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, por ello no utilizan las piezas que son sometidas a los ensayos y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que los componen.

De acuerdo con su aplicación, los ensayos no destructivos se dividen en:

- Técnicas de Inspección Superficial.
- Técnicas de Inspección Volumétrica.
- Técnicas de Inspección de Hermeticidad.

3.1 CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS END

3.1.1 Técnicas de inspección superficial

Mediante éstas sólo se comprueba la integridad superficial de un material. Por tal razón su aplicación es conveniente cuando es necesario detectar discontinuidades que estén en la superficie, abierta a ésta o a profundidades hasta de 3mm (Figura 16). Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes END:

- Inspección Visual (VT)
- Líquidos Penetrantes (PT)
- Partículas Magnéticas (MT)
- Electromagnetismo (ET)



Figura 16. Componente aeronáutico en proceso de inspección por END superficial. Tomado de: http://www.GE.com/GEIT-12002EN_aerospac

3.1.2 Técnicas de inspección volumétrica

Su aplicación permite conocer la integridad de un material en su espesor y detectar discontinuidades que no son visibles en la superficie de la pieza (Figura 17). Este tipo de Inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos:

- Radiografía Industrial (RT)
- Ultrasonido Industrial (UT)
- Radiografía Neutrónica (NT)
- Emisión Acústica (AET)

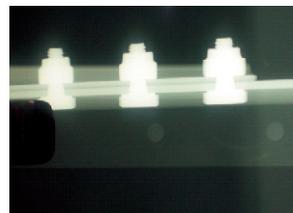


Figura 17. Componente aeronáutico en proceso de inspección por END volumétrico. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

3.1.3 Técnicas de inspección de la integridad o de la hermeticidad

Llamadas también de integridad, son aquellas en las que se comprueba la capacidad de un componente o de un recipiente para contener un fluido (líquido o gaseoso) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica, sin que existan pérdidas apreciables de presión o de volumen del fluido de prueba en un período previamente establecido. Este tipo de inspección se utiliza empleando cualquiera de los siguientes ensayos:

- Pruebas por cambio de presión: Hidrostática, Neumática.
- Pruebas por pérdidas de fluido: Cámara de burbujas, Detector de halógenos, Espectrómetro de masas, Detector ultrasónico.

3.1.4 Ventaja de los ensayos no destructivos

Los Ensayos No Destructivos pueden ser usados en cualquier paso de un proceso productivo, pudiendo aplicarse por ejemplo en los puntos citados a continuación:

- Durante la recepción de las materias primas que llegan al almacén; para comprobar la homogeneidad, la composición química y evaluar ciertas propiedades mecánicas (Figura 18).
- Durante los diferentes pasos de un proceso de fabricación; para comprobar si el componente está libre de defectos que pueden producirse por un mal maquinado, un tratamiento térmico incorrecto o con una soldadura mal aplicada.
- En la inspección final o de liberación de productos terminados; para garantizar al usuario que la pieza cumple o supera sus requisitos de aceptación; que la parte es del material que se había prometido o que la parte o componente cumplirá de manera satisfactoria la función para la que fue creada.
- En la inspección y comprobación de partes y componentes que se encuentran en servicio; para verificar que todavía pueden ser empleados de forma segura; para conocer el tiempo de vida remanente o mejor aún, para programar adecuadamente los paros de mantenimiento y no afectar el proceso productivo.
- Adicionalmente y debido a que no se alteran las propiedades del material, no existen desperdicios.



Figura 18. Barra de acero defectuosa detectada por END. Tomado de: <http://www.rsime.com/nondestructive.asp>

Con el empleo de los END sólo hay pérdidas cuando se detectan piezas defectuosas, asimismo, este tipo de inspección es muy rentable cuando se

inspeccionan partes o componentes críticos, en los procesos de fabricación controlada o en la producción de piezas en gran escala.

Las ventajas del uso de los Ensayos No Destructivos se pueden dividir en las siguientes categorías:

- Aumento de la productividad:
 - * Evita el desperdicio de material, menos chatarra, mejor utilización de la materia prima.
 - * Evita el desperdicio de energía.
 - * Evita desperdicio de tiempo.
 - * Evita divergencias de relación a los estándares de calidad, mejor nivel de calidad y mejor uniformidad de la calidad, satisfacción y producción.
 - * Disminuyen costos de operación y producción.
 - * Mejora el control del proceso.
 - * Recupera materiales, permite que materiales defectuosos puedan todavía, ser recuperados.
 - * Propicia el seguimiento de los proyectos.
 - * Identifica la existencia de materiales inaceptables.
 - * Permite un uso más eficiente del equipo.
- Aumento en la eficiencia:
 - * Localiza regiones de tensiones mecánicas.
 - * Localiza fallas de fatiga.
 - * Previene el mal funcionamiento de equipos vitales.
 - * Elimina averías de los equipos.
 - * Disminuye los costos de operación y producción.
- Seguridad.
 - * Previene accidentes.
 - * Previene pérdidas de vidas.
 - * Previene pérdidas de bienes.
- Identificación de las características de los materiales.
 - * Clasificación.
 - * Diferencias de tratamiento térmico.
 - * Diferencias en las propiedades físicas.
 - * Diferencias en las propiedades metalúrgicas.

3.1.5 Limitaciones de los ensayos no destructivos

La primera limitación a la que se enfrentan los usuarios de este tipo de pruebas es que en algunos casos la inversión inicial es alta, pero puede ser justificada si se analiza correctamente la relación costo - beneficio, especialmente en lo referente a tiempos muertos en las líneas productivas. Un ejemplo de éstos es lo

que los END aplicados por la industria norteamericana sólo representan el 0.03% del precio al consumidor de un producto tan caro y delicado como son las partes aeronáuticas o de componentes nucleares.

Otra limitación es que la propiedad física a controlar es medida de forma indirecta; adicionalmente es evaluada cualitativamente o por comparación. Esta limitante puede ser superada si se preparan patrones de comparación o referencia que permitan una calibración correcta de los sistemas de inspección (Figura 19).



Figura 19. Patrón de calibración para END volumétrico. Tomado de: <http://www.sonatest.com>

Cuando no existen procedimientos de inspección debidamente preparados y calificados o cuando no se cuenta con patrones de referencia o calibración adecuados, una misma indicación puede ser interpretada o ponderada de forma diferente por dos o más inspectores.

Si bien los ensayos no destructivos son relativamente fáciles de aplicar, se requiere que el personal que los realice haya sido debidamente capacitado y calificado y que cuente con la experiencia necesaria a fin de que se evite el desperdicio de material o las pérdidas de tiempo por sobre inspección.

3.1.6 Beneficios del empleo de los ensayos no destructivos

Antes de mencionar los beneficios de la aplicación de los END, es conveniente aclarar que éstos sólo deben ser parte de un buen programa de aseguramiento de calidad y que la información que de ellos se obtenga, si no es analizada y aplicada en medidas de tipo preventivo para evitar la repetición de los problemas, no reducirá los costos de producción y en un momento dado sí aumentará los costos de inspección.



Figura 20. Pieza inspeccionada por END antes de ser puesta en servicio. Tomado de: <http://ceinsolac.com/servicios.html>

El primer beneficio que se puede observar es que aplicar correctamente los END y combinarlos con un buen análisis estadístico contribuye a mejorar el control del proceso de fabricación de una parte, componente o servicio, también ayuda a mejorar la productividad de una planta, al prevenir paros imprevistos por falla de un componente crítico, además de ayudar a programar los planes de mantenimiento, lo que reduce el tiempo y el costo de la reparación (Figura 20).

También es importante mencionar que estos métodos, cuando se aplican como parte de la inspección preventiva, reducen notablemente los costos de reparación o reproceso, pero sobre todo ayudan a ahorrar tiempo y recursos que de otra forma se desperdiciarían en una pieza que finalmente puede tener un costo de producción muy superior al presupuestado.

Actualmente en los países desarrollados, la combinación de la inspección no destructiva con otras actividades del programa de aseguramiento de calidad ayuda a mantener un nivel de calidad uniforme en el producto final, lo que mejora la competitividad de sus productos en el mercado nacional e internacional.

Otro beneficio que normalmente no contemplan muchas empresas es que al emplear los END como una herramienta auxiliar al mantenimiento industrial, se tiene una mejor evaluación de las partes y componentes en servicio, lo que permite optimizar la planeación del mantenimiento correctivo. La aplicación de los END en la industria norteamericana evita pérdidas de 2% del PIB de ese país.

Otras razones para utilizar Ensayos No Destructivos:

- Garantizar confianza en las piezas. El simple hecho de que un comprador adquiera un producto el cual pasa por una prueba no destructiva lo tranquilizara en cuanto al uso futuro del mismo.
-
- Prevenir accidentes y evitar riesgos de vidas humanas. Es considerada como la principal razón para el uso de los END y muy probablemente, fue con esta finalidad que estos fueron desarrollados.
-
- En una época en que se vive un creciente progreso industrial, la energía nuclear toma cada vez más rigurosas medidas preventivas de seguridad, pues la utilización en equipos de alta presión, de productos inflamables y corrosivos, acarrea un riesgo muy grande en la vida de trabajadores que operen estos equipos, así como a toda la humanidad, por esto estas técnicas se han desarrollado en un principio en el sector nuclear y luego se han transferido al sector industrial.
-
- De esta forma los ensayos no destructivos son una herramienta en la prevención de accidentes, pues a partir de su utilización se estará evitando la fabricación y uso de piezas defectuosas y consecuentemente, eliminando el riesgo de accidentes.
-
- De la misma manera, la paralización de una planta industrial debido a un accidente, traerá consecuencias dañinas e imprevisibles a la economía de una empresa, industria o país.

- Mejorar el desempeño de las Empresas. Los END mejoran este desempeño por las siguientes razones:
 - * Auxiliando el buen desarrollo de un proyecto. Ejemplo: Un nuevo proceso de soldadura desarrollado, por medio de los END se podrá, a partir de cuerpos de prueba verificar la viabilidad de la aplicación práctica del mismo.
 - * Reduciendo los costos de fabricación. Ejemplo: Se considera una pieza determinada que será sometida a un proceso de utilización de los END, en la pieza en bruto se puede detectar la existencia de algún defecto interno de la misma. Sin la utilización de alguna técnica de ensayos este mismo defecto podría aparecer durante el proceso de utilización, redundando entonces, en grandes gastos adicionales que podrían haber sido evitados.
 - * Controlando el proceso de fabricación. El control es un concepto básico en la industria. Metalúrgicos, inspectores, operadores y personal de producción saben mucho de las dificultades que se encuentran para mantener un proceso controlado. Cuando cualquier etapa de fabricación queda fuera de control fatalmente, la calidad será afectada por la introducción de defectos. Los END contribuyen mucho a mantener un proceso bajo control pues este podrá ser aplicado a varias etapas del mismo, permitiendo que este permanezca bajo control a través de las correcciones oportunas.

3.1.7 Selección del ensayo no destructivo adecuado

Si bien las pruebas de un grupo pueden ser intercambiadas para aumentar la velocidad de la inspección o aumentar la sensibilidad en la detección de discontinuidades, no es recomendable sustituir las pruebas de un grupo con las de otro. Por ejemplo, las pruebas de inspección volumétrica tienen limitaciones cuando se intenta encontrar defectos cercanos a la superficie, como es el caso del campo muerto del haz ultrasónico o la falta de definición (penumbra) en una radiografía. Por otra parte las partículas magnéticas o el electromagnetismo tienen grandes limitaciones en cuanto a su sensibilidad cuando aumenta el espesor de la muestra que se inspecciona, ya que la intensidad del campo magnético generado o la corriente inducida decrecen de forma cuadrática o exponencial con la profundidad, representada por el espesor del material.

Para complementar lo anterior, las pruebas de hermeticidad no sustituyen de modo alguno a las demás ya que tan solo aseguran que un recipiente pueda contener un fluido sin que existan pérdidas apreciables del mismo; por lo que muy posiblemente es una primera prueba que el recipiente pasará con éxito, pero de existir un defecto no detectado con anterioridad por los demás ensayos,

con el paso del tiempo éste podría tener tendencia al crecimiento hasta convertirse en una falla del material del recipiente, con consecuencias tal vez desastrosas y la posible pérdida no solo de bienes materiales, sino también de vidas humanas.

Finalmente, para efectuar una aplicación correcta de los ensayos no destructivos, debe seleccionarse previamente con un esquema a seguir para capacitar, calificar y certificar al personal que realiza este tipo de inspecciones. Dicha actividad es importante, ya que no basta contar con el equipo adecuado si no se cuenta con un personal debidamente preparado para operarlo y que pueda tener resultados confiables, reproducibles y repetitivos. Es conveniente comprender que la capacitación del personal que realiza las inspecciones es una inversión a corto plazo que permite evitar la sobre inspección, el desperdicio de materiales o la inadecuada aplicación de los equipos de inspección (Figura 21).



Figura 21. Práctica recomendada SNT-TC-1A, para entrenamiento y calificación de inspectores en END. Tomado de: <http://www.asnt.com>

No obstante existen algunos END que tienen un uso más constante y son comúnmente usados en la industria, trataremos más en detalle los tipos de ensayos relacionados (Tabla 1) y sus aplicaciones particulares al campo aeroespacial.

Tabla 1. Características de Ensayos No Destructivos comunes.

MÉTODOS	EQUIPOS Y ACCESORIOS REQUERIDOS	CAPACIDAD DE DETECCIÓN	VENTAJAS	LIMITACIONES	OBSERVACIONES
ENSAYO VISUAL	Lentes de aumento, calibres, reglas, espejos, microscopios, fibroscopios, proyectores y comparadores, cámaras de TV.	Defectos superficiales: fisuras gruesas, porosidades, inclusiones de escoria, penetración incompleta, sobre espesor, sub espesor, alabeo, alineamiento y aspecto de cordones de soldadura.	Bajo costo, puede ser aplicado durante el proceso de fabricación permitiendo su corrección.	Se aplica solamente a defectos superficiales, no permite un registro (excepto fotográfico)	Debe ser siempre el primer método de inspección aplicado, no importando otras técnicas semejantes requeridas. Es uno de los métodos de inspección más productivo.
LÍQUIDOS PENETRANTES	Paquete de líquidos penetrantes necesarios, equipo de aplicaciones para el revelador en el caso de que el mismo no esté en depósito de aerosol, fuente de luz ultravioleta para el método fluorescente.	Fisuras u otros defectos superficiales no visibles al ojo humano. Excelente para la localización de doble laminación en chapas y en soldaduras (cordón de raíz).	Se aplica tanto en materiales magnéticos como no magnéticos	Solamente detecta defectos superficiales no puede ser utilizado en piezas calientes.	En piezas de pared fina podrá indicar la existencia de defectos pasados no detectados por pruebas de estancamiento. Las condiciones superficiales de la pieza podrán disfrazar los resultados.
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	Equipo de magnetización, partículas magnéticas vía seca o húmeda, fuente de luz fluorescente según sea el caso, desmagnetizador para piezas grandes.	Detección de defectos superficiales, excelente para detección de fisuras superficiales.	Utilización simple, bajo costo.	Solamente aplicable a materiales ferro magnéticos	Defectos cuya mayor dimensión es paralela al flujo magnético no son fácilmente detectados.
ULTRASONIDO	Equipo especial de ultrasonido, patrones de calibración y de referencia, acoplantes.	Defectos superficiales e internos, incluyendo aquellos que tengan dimensiones tan pequeños que no pueden ser detectados por otros métodos de inspección volumétrica.	Permite inspección en lugares no accesibles a la radiografía industrial.	Requiere un gran conocimiento teórico, práctico y experiencia del inspector.	Es muy usado para inspección interna de soldaduras, chapas y también para medir espesores.
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	Equipo de rayos X o rayos gamma, películas, material para revelado. Equipo de cámara o cuarto oscuro. En el caso de que la detección no se hace por película, se utiliza equipo de fluoroscopia o detectores de radiación.	Defectos superficiales, defectos internos como: fisuras, porosidades, inclusiones de escoria, falta de penetración, falta de fusión cráteres, burbujas de aire, etc.	Permite un registro permanente de la prueba. Ensayo versátil.	Depende de la técnica aplicada para obtener los mejores resultados. Requiere cuidados especiales en cuanto a seguridad.	La inspección radiográfica es requerida por la mayoría de los códigos y especificaciones. Es utilizada también en la calificación de soldadores procesos de soldadura. Es un ensayo de (relativo) alto costo.

Fuente: Elaboración propia

3.2 ENSAYO VISUAL

Es probablemente el tipo de ensayo no destructivo más ampliamente utilizado, es el más fácil de aplicar, acarrea resultados rápidos y normalmente tiene un costo bajo (Figura 22). Usualmente, una pieza antes de ser sometida a otros tipos de ensayos no destructivos, debe ser inspeccionada visualmente. Por ejemplo la inspección visual de una soldadura por un inspector entrenado, puede revelar entre otras las siguientes informaciones sobre la calidad de la misma: La presencia u ausencia de discontinuidades superficiales, la orientación de estas con relación a las varias regiones de la soldadura, porosidades superficiales, mordeduras, etc.



Figura 22. Componente aeronáutico en proceso de inspección por ensayo visual. Tomado de: <http://www.aerobaires.com.ar/quienesomos/mantenimiento.html>

De esta manera, los resultados de la inspección visual pueden auxiliar, en mucho, la aplicación posterior de otros ensayos no destructivos. El principio básico de la prueba no destructiva visual es iluminar bien la zona de la pieza a inspeccionar. La pieza será examinada, entonces, directamente al ojo o a través de algún accesorio como un endoscopio o fibroscopio. El equipo requerido para la inspección visual es extremadamente simple, siendo por tanto, primordial una buena iluminación de la pieza. Conviene observar también que la superficie de la pieza este limpia antes de efectuar el examen.

3.3 LÍQUIDOS PENETRANTES

La inspección por líquidos penetrantes es un método de END usado para la detección de discontinuidades que aparezcan en la superficie de la pieza, el uso de líquidos penetrantes puede ser considerado como una extensión de la inspección visual, muchas discontinuidades reveladas por el método de líquidos penetrantes no podrán ser detectadas a través de la inspección visual realizada por un inspector experimentado (Figura 23). Los líquidos penetrantes revelan una discontinuidad en una gran extensión haciendo que la inspección dependa menos del elemento humano, esto hace que este método sea más adaptado a un sistema de producción, aumentando la credibilidad en la rapidez de inspección. El método de los líquidos penetrantes es utilizado en materiales magnéticos como no magnéticos ofreciendo así, una ventaja en relación con la prueba de partículas



Figura 23. Juego básico de implementos para la inspección por líquidos penetrantes. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

magnéticas que no pueden ser empleadas en el último caso. La prueba de líquidos penetrantes tiene la ventaja de ser un ensayo rápido, fácilmente aplicable y relativamente barato, sin embargo, ofrece la desventaja de que solamente revela discontinuidades existentes en la superficie de la pieza, todas las fallas encontradas a través de los líquidos penetrantes dan solamente una indicación aproximada de la profundidad y tamaño del defecto.

La técnica por líquidos penetrantes consiste en la aplicación sobre la pieza, luego de la limpieza de la misma, de un líquido "penetrante", de un color generalmente rojo para aplicaciones industriales y fluorescente cuando se aplica a componentes aeroespaciales, de baja viscosidad que, en función de esto, penetra en las discontinuidades existentes en la superficie, bajo principios de capilaridad, después, se limpia nuevamente la pieza por medio de un líquido removedor cuya función es la de eliminar el exceso de líquido penetrante que ha quedado en la superficie, para aplicar posteriormente otro líquido llamado "revelador" que normalmente tiene talco en suspensión, el líquido penetrante aprisionado en la discontinuidad de la pieza será absorbido por el revelador y será observable a luz blanca para el caso del penetrante de coloración roja y bajo luz negra para el penetrante fluorescente mostrando en ambos casos las discontinuidades existentes en la pieza.

También en el caso de los líquidos penetrantes el equipo requerido es extremadamente simple, de bajo costo siendo, por lo tanto, fundamental la calidad de los líquidos requeridos.

3.3.1 Principios básicos del ensayo por líquidos penetrantes

El fenómeno físico que permite el desarrollo de esta técnica es conocido con el nombre de "capilaridad" o "acción capilar", siendo este efecto una de las fuerzas más importantes de la naturaleza física de los fluidos (Figura 24). La acción capilar es la tendencia de los líquidos de penetrar en pequeñas aberturas, como grietas, poros o fisuras, la capacidad de un fluido de tener mayor o menor fuerza capilar depende de varios factores como son: viscosidad, tensión superficial, fuerza de cohesión, entre otros.



Figura 24. Efecto de la acción capilar sobre una columna de agua y sobre una de mercurio. Tomado de http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/Fer%C3%83menos_superficiales_de_lis_F%C3%ADquidos/Capilaridad

3.3.2 Definiciones

- **Viscosidad:** es la propiedad consecuencia de la fricción o roce interno entre las moléculas del fluido, oponiendo resistencia al deslizamiento entre dos capas sucesivas, los penetrantes de alta viscosidad presentan la desventaja de penetrar más lentamente, por otra parte, los penetrantes de baja viscosidad se escurren demasiado deprisa y tienen tendencia a no ser retenidos en los defectos de poca profundidad.
- **Tensión superficial:** es la fuerza que tiende a mantener unida la superficie del líquido (Figura 25), los líquidos de alta tensión superficial son por lo general disolventes excelentes y disolverán con facilidad componentes penetrantes tales como las materias colorantes. Los líquidos con baja tensión superficial crean las propiedades de distribución y penetración necesarias requeridas en un buen penetrante.
- **Fuerza de cohesión:** es la resultante de la interacción entre las moléculas de un mismo cuerpo, a las que mantiene unidas, oponiéndose a fuerzas externas que tiendan a separarlas.
- **Habilidad humectante:** es la habilidad para humedecer suficientemente la superficie de un material, es una de las propiedades más importantes de un líquido penetrante, esta habilidad humectante se refiere al ángulo de contacto con la superficie, ángulos de contacto menores de 90 grados tienen buena habilidad de mojado.
- **Volatilidad:** esencialmente los líquidos penetrantes no deberían ser volátiles, una pequeña evaporación en el punto de un defecto ayuda a intensificar la presencia del colorante en la superficie y evita la propagación excesiva. Si los líquidos penetrantes contienen disolventes muy volátiles, la rápida evaporación de estos disolventes puede causar el secado del penetrante o desequilibrar la fórmula, reduciendo así la sensibilidad del ensayo.
- **Punto de inflamabilidad:** este punto de inflamabilidad guarda poca relación con la eficiencia del líquido penetrante, salvo que, cuando se introduce un ingrediente con un punto de inflamabilidad muy bajo, la sensibilidad del líquido penetrante podría aumentar.
- **Inactividad química o propiedades corrosivas:** los líquidos penetrantes no deberán atacar a los materiales que se inspeccionan ni los recipientes que los contienen.



Figura 25. Efecto de la tensión superficial de un líquido. Tomado de: <http://bitacoradepapel.blogspot.com/2006/09/un-clip-sobre-el-agua.html>

Los líquidos penetrantes son clasificados por "tipo", "método" y "nivel de sensibilidad", según la norma MIL-I-25135E² de la siguiente manera (Tabla 2):

Tabla 2. Clasificación de los líquidos penetrantes según la MIL-I-25135E

Según el tipo	Según el método	Según el nivel de sensibilidad
Tipo I Fluorescentes	Método A Removible o lavable con agua	Nivel de sensibilidad 1 Bajo
Tipo II Coloreados o visibles	Método B Post-emulsificable con base aceite (lipofílico)	Nivel de sensibilidad 2 Medio
Tipo III Modo dual	Método C Removible o lavable con solvente	Nivel de sensibilidad 3 Alto
	Método D Post-emulsificable con base agua (hidrofílico)	Nivel de sensibilidad 4 Muy alto

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Aplicación de la prueba

La aplicación de la prueba por líquidos penetrantes, requiere del cumplimiento de los siguientes pasos.

- **Pre limpieza**

O preparación de la pieza, se requiere remover capas de pintura, grasas, aceites, lubricantes, suciedad y cualquier otro elemento extraño que pueda impedir el libre mojado y penetración de la pieza. Los procesos de limpieza se pueden llevar a cabo mediante cualquiera de los siguientes métodos o la combinación de varios de ellos: Limpieza con detergente, limpieza con solventes, limpieza con vapor desengrasador, limpieza con soluciones decapantes, limpieza con decapantes de pinturas (removedor), limpieza ultrasónica, limpieza con chorro abrasivo, limpieza por chorro de aire.

- **Aplicación del penetrante y tiempo de penetración**

Una vez preparada la pieza se procede a aplicar el líquido penetrante, este proceso se puede llevar a cabo en una de las siguientes formas: Por inmersión de la pieza, por aerosol o pistola, con brocha, por rociado electrostático (Figura 26). Luego de aplicación del líquido penetrante este se deja actuar o "penetrar" en la pieza durante un período de tiempo, que se calcula con base en los parámetros del ensayo, y que en términos generales es de 5 a 15 minutos (Figura 27).



Figura 26. Aplicación de penetrante fluorescente en inspección por líquidos penetrantes. Visita LIAN/CAMAN/FAC.



Figura 27. Componente en inspección en estación de penetración del líquido. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

² MIL-I-25135E (NOTICE1), MILITARY SPECIFICATION INSPECTION MATERIALS, PENETRANTS (13 MAR 1998) (S/S BY SAE-AMS2644). MIL-I-25135E, dated 26 June 1989, is hereby cancelled. Future acquisitions for this material should refer to SAE AMS 2644. The Qualified Products List associated with this cancelled specification, QPL-25135-17, is hereby cancelled and replaced by QPL-AMS-2644-1.

- **Remoción del exceso de penetrante**

Una vez transcurrido el tiempo de penetración se debe remover el exceso de penetrante sobre la superficie de la pieza, de acuerdo con los métodos de remoción anteriormente mencionados (A, B, C, o D). El objeto de remover este exceso es que el único penetrante que permanezca en la pieza se encuentre dentro de las discontinuidades de la pieza, es de vital importancia evitar fallas en esta etapa ya que la remoción excesiva elimina el penetrante de las porosidades y fisuras, por el contrario una remoción pobre deja sobre la superficie una delgada película que distorsiona los resultados al reaccionar con el revelador (Figura 28).



Figura 28. Remoción del exceso de penetrante método lavable con agua. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

- **Revelado**

La etapa de revelado se realiza con el fin de atraer a la superficie cualquier penetrante que hubiera quedado retenido en las discontinuidades, el revelador es un compuesto que actúa como papel secante y que absorbe por difusión el penetrante que se ha filtrado en las discontinuidades superficiales, generando así las indicaciones. Los reveladores están disponibles en las siguientes presentaciones: Revelador forma A, polvo seco. Revelador forma B, húmedo soluble en agua. Revelador forma C, húmedo de suspensión en agua. Revelador forma D, húmedo no acuoso. Revelador forma E, de aplicación específica. El tiempo de revelado es un período de tiempo mínimo requerido para que todo el penetrante retenido en las discontinuidades fluya hacia el exterior de las mismas por acción del revelador permitiendo la inspección de las indicaciones respectivas, como regla general el tiempo de revelado es la mitad del tiempo de penetración no debiendo ser nunca menor de 7 minutos ni mayor a 30.

- **Inspección**

La inspección se realiza antes de que el penetrante comience a exudar sobre el revelador hasta el punto de ocasionar la pérdida de la definición y bajo condiciones de iluminación que sean compatibles con los colorantes de los penetrantes (Figura 29).

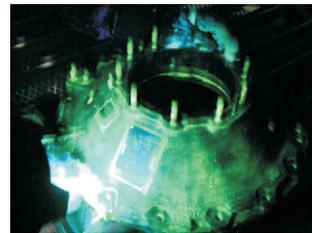


Figura 29. Inspección bajo luz negra del componente aeronáutico. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

- **Post limpieza**

Una vez inspeccionada la pieza se debe retirar el penetrante y revelador que se ha aplicado para realizar el ensayo, usualmente se realiza esta operación aplicando un limpiador o desengrasante similar al empleado en la pre limpieza y posteriormente se aplica a la pieza un baño de pintura o similar según se requiera.

3.3.4 Equipos para inspección por líquidos penetrantes

El ensayo de inspección por líquidos penetrantes se puede realizar de manera portátil o en banco estático. El equipo portátil se compone de un juego de líquidos penetrantes que incluye el limpiador, penetrante, revelador y luz negra según sea el caso, es de fácil aplicación en campo y no requiere de muchos accesorios adicionales. Los equipos de banco para inspección por líquidos penetrantes, generalmente cuentan con las siguientes estaciones: estación de pre limpieza, estación tanque de penetrante, estación de drenaje, estación tanque de emulsificación, estación tanque de enjuague con agua, estación tanque de revelador, estación de secado, estación de inspección, estación de post-limpieza (Figura 30).



Figura 30. Banco estático para inspección por líquidos penetrantes. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

3.4 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

La inspección por partículas magnéticas es un método para la localización de defectos superficiales y sub superficiales (próximos a la superficie más no abiertos a la misma) en materiales ferro magnéticos. Su operación esta basada en el hecho de que, cuando la pieza a examinar es magnetizada, las discontinuidades existentes causan un campo de fuga en el flujo magnético, este campo de fuga generado por discontinuidades será detectado a través del uso de partículas ferro magnéticas finamente divididas aplicadas sobre la superficie, pues las mismas serán atraídas por el campo de fuga y se aglomeraran en el contorno del mismo, indicando su localización, forma y extensión. Estas partículas son aplicadas en la superficie de forma seca o húmeda en suspensión en líquidos como agua o aceite, pueden ser visibles con luz blanca o con luz ultravioleta (Figura 31).

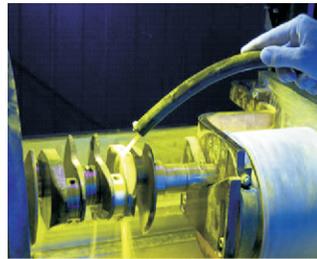


Figura 31. Cigüeñal de un motor aeronáutico inspeccionado por partículas magnéticas en banco estático. Tomado de: http://www.nayak.aero/no_cache/services-offers/ndt/

Existen sin embargo ciertas limitaciones en cuanto al uso de este método que deben ser de conocimiento del inspector, entre estas limitaciones se pueden destacar las siguientes:

- Películas de pintura u otra capa no magnética sobre la pieza que puedan ocultar los resultados.

- El método solo es aplicable a materiales ferro magnéticos, aleaciones ferrosas exceptuando aceros inoxidable austeníticos (Figura 32).
- Para mejores resultados, el campo magnético debe tener una dirección que intercepte el plano principal de la discontinuidad, debido a esto, normalmente son requeridas dos o más secuencias de operaciones en una misma región de la pieza, en diferentes direcciones.
- Es necesario desmagnetizar la pieza después de realizado el ensayo.
- Para piezas de gran tamaño son requeridas altas corrientes eléctricas.



Figura 32. Biela de un motor aeronáutico inspeccionado por partículas magnéticas. Tomado de: <http://www.med-craft.com/working.html>

3.4.1 Principios básicos del ensayo por partículas magnéticas

El método de inspección está basado en el principio de que un campo magnético en un magnetizado sufre una distorsión local debido a la presencia de una discontinuidad, esta distorsión conocida como " campo de fuga magnético", es el fenómeno que provoca el escape y reingreso de las líneas de fuerza en torno a la discontinuidad, este campo de fuga es capaz de agrupar en torno a sí pequeñas partículas de material magnético generando así una indicación.

3.4.2 Definiciones

• Dominios magnéticos

En los materiales magnéticos los átomos se encuentran agrupados en regiones conocidas como dominios magnéticos, los cuales poseen polaridad positiva y negativa en cada extremo, cuando el material no está magnetizado estos dominios están orientados al azar, y al magnetizar el material estos dominios se alinean con el campo magnético exterior (Figura 33).



Figura 33. Componente aeronáutico sin haber sido magnetizado. Vista LIAN/CAMANFAC.

• Polos magnéticos

La habilidad de los imanes para atraer materiales ferro magnéticos es debida a la existencia de polos magnéticos, que no son más que áreas de atracción y repulsión localizadas con polaridades opuestas, a través de estos polos salen y reingresan al material las líneas de fuerza del campo magnético, siguiendo trayectorias de norte a sur en el aire y de sur a norte en el material. Las propiedades que deben cumplir las líneas de fuerza son: deben completar una trayectoria continua y cerrada, no deben entrecruzarse unas con otras, su densidad decrece al alejarse de los polos y siguen la trayectoria de menor resistencia magnética.

- **Permeabilidad magnética**

Es la facilidad con la cual un flujo magnético es establecido dentro de un material, es decir la facilidad con que se puede magnetizar.

- **Densidad de flujo**

Es el producto entre la fuerza magnetizadora y la permeabilidad del material.

- **Reluctancia**

Es la oposición de un material magnético al establecimiento de un flujo magnético, es así, que un material con alta permeabilidad tendrá baja reluctancia.

- **Magnetismo residual**

Es la cantidad de magnetismo retenido después de que la fuerza de magnetización ha sido retirada del material.

- **Fuerza coercitiva**

Es la fuerza necesaria de magnetización contraria necesaria para remover el magnetismo residual de la pieza.

3.4.3 Aplicación de la prueba

Para la aplicación de la prueba por partículas magnéticas se requiere del cumplimiento de ciertas condiciones y procesos previos, dentro de las cuales se debe verificar la permeabilidad de la pieza, es decir su carácter ferro magnético, lo cual se logra mediante el uso de un imán permanente. Asimismo se deben llevar a cabo las siguientes etapas en el proceso de inspección.

- **Pre limpieza**

La preparación de la pieza, se requiere remover capas de pintura, grasas, aceites, lubricantes, suciedad y cualquier otro elemento extraño que pueda impedir el libre contacto y adhesión de las partículas bien sea en suspensión líquida o secas sobre la superficie de la pieza. Los procesos de limpieza se pueden llevar a cabo mediante cualquiera de los siguientes métodos o la combinación de varios de ellos: Limpieza con detergente, limpieza con solventes, limpieza con vapor desengrasador, limpieza con soluciones decapantes, limpieza con decapantes de pinturas (removedor), limpieza ultrasónica, limpieza con chorro abrasivo, limpieza por chorro de aire (Figura 34).



Figura 34. Pre limpieza componente aeronáutico para ser sometido a la inspección por partículas magnéticas. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

- **Magnetización**

La magnetización de la pieza se puede lograr en forma directa o indirecta. En la magnetización directa la corriente eléctrica requerida para el ensayo fluye directamente dentro de la pieza, creando un campo magnético circular propio sobre el material. En la magnetización indirecta el campo magnético es inducido en la pieza sin contacto eléctrico, pudiendo resultar en magnetización circular, longitudinal o multidireccional (Figura 35).



Figura 35. Componente magnetizado en banco estático de partículas magnéticas. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

- **Aplicación de las partículas magnéticas**

La aplicación de las partículas magnéticas se puede efectuar simultáneamente con la aplicación del flujo de corriente (método continuo) o después de haber retirado la corriente eléctrica (método residual), en cuanto a la forma de aplicación las partículas pueden ser vía húmeda o vía seca.

- **Inspección**

Una vez aplicadas las partículas se observa la pieza bajo la luz blanca o negra según sea el tipo de partículas empleadas y se verifica la existencia de discontinuidades, las cuales aparecen como un aglomeramiento del baño de partículas alrededor de zonas bien definidas (Figura 36).



Figura 36. Inspección del componente magnetizado bajo luz negra. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

- **Desmagnetización**

La desmagnetización de las piezas tiene como origen la propiedad del material de retener cierto nivel de magnetismo o magnetismo residual, y debe ser analizado con gran cuidado el efecto posterior que tendrá dejar ese magnetismo en el funcionamiento de la pieza o la alteración sobre piezas cercanas, tales como instrumentos, equipos de radio, etc.

- **Pos limpieza**

Una vez inspeccionada la pieza se debe retirar el baño de partículas que se ha aplicado para realizar el ensayo, usualmente se rea/iza esta operación aplicando un limpiador o desengrasante similar al empleado en la pre limpieza y posteriormente se aplica a la pieza un baño de pintura a similar según se requiera.

3.4.4 Equipos para inspección por partículas magnéticas

El ensayo de inspección por partículas magnéticas se puede realizar de manera portátil o en banco estático. El equipo portátil se compone de un juego de partículas magnéticas que incluye el limpiador, el baño de partículas, el yugo magnetizador y la luz blanca o negra según sea el caso. Es de fácil aplicación en campo y no requiere de muchos accesorios adicionales.

Los equipos de banco para inspección por partículas magnéticas, generalmente cuentan con los siguientes elementos: cabezales de magnetización, luz negra, suministro del baño de partículas, indicadores de campo magnético y controles eléctricos del equipo (Figura 37).



Figura 37. Banco estático para inspección por partículas magnéticas. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

3.5 ULTRASONIDO

La inspección ultrasónica es un método de ensayo no destructivo para el cual grupos de ondas de alta frecuencia introducidas en el material inspeccionado son utilizadas para detectar defectos superficiales e internos (Figura 38). Las ondas atraviesan el material con cierta atenuación y son reflejadas en las interfaces, este haz reflejado es detectado y analizado definiendo entonces la presencia y la localización de las discontinuidades. El ensayo ultrasónico es basado en el hecho de que la presencia de una discontinuidad o un cambio en la densidad del material actuará como si fuese reflector de propagaciones de alta frecuencia en ese punto. El equipo de ultrasonido posee un cabezal o palpador que contiene un cristal de cuarzo (u otro material piezo eléctrico), cuando un voltaje es aplicado, el cristal vibra a alta frecuencia, cuando el cabezal ultrasónico es colocado sobre la pieza con su acoplante adecuado, esta vibración es transmitida a la misma hasta encontrar una discontinuidad o cambio de densidad, en este punto, parte de esta energía (vibración) es reflejada de vuelta, llegando nuevamente al cabezal, transmitiendo la vibración al cristal el cual la transformará en pulsos eléctricos que podrán ser visualizados en la pantalla del osciloscopio.



Figura 38. Inspección de soldaduras en un oleoducto por medio de ultrasonido. Tomado de: <http://www.advanced-ndt.co.uk/>

Como toda prueba no destructiva, los ensayos por ultrasonido ofrecen ventajas entre las cuales se pueden relacionar:

- Alto poder de penetración, el cual permite la detección de discontinuidades en grandes espesores.
- Alta sensibilidad permitiendo la detección de discontinuidades sumamente pequeñas.
- Mayor capacidad que otros métodos de ensayo no destructivo en la determinación de la posición de discontinuidades externas, estimando su forma, orientación, dimensión y naturaleza.
- Necesidad de acceso únicamente a una de las superficies de la pieza.

Desventajas:

- La operación requiere conocimientos y experiencia profundos por parte del operador.
- No es apropiado para la inspección de superficies mal terminadas.
- Discontinuidades que se presentan muy próximas a la superficie, no pueden ser detectadas.
- Requiere siempre la calibración del equipo, lo cual no siempre es sencillo (Figura 39).
- Solo brinda información de la indicación instantánea de las discontinuidades en equipos convencionales o de tipo A.



Figura 39. Calibración inicial de la señal buscada en el ensayo por ultrasonido. Tomado de: <http://www.kvinspection.com/Services/Ultrasoniinspection/>

3.5.1 Principios básicos del ensayo por ultrasonido

El ultrasonido es el nombre dado al estudio y aplicación de ondas sonoras con frecuencias superiores a las audibles por el oído humano, las ondas sonoras pueden ser divididas en tres grandes grupos: infra sónicas donde la frecuencia es menor de 16 Hz., sónica con frecuencias entre 16 y 20000 Hz. y ultrasónica cuyas frecuencias son mayores de 20000 Hz. Específicamente para las aplicaciones ultrasónicas el rango de frecuencias abarca desde los 200000 hasta los 25000000 Hz. El ultrasonido como método de ensayo no destructivo, es el uso de

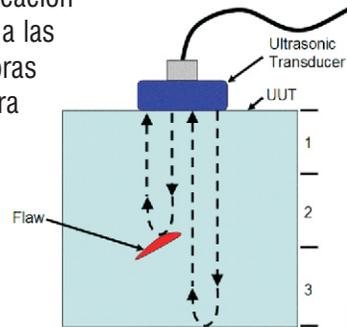


Figura 40. Principio de detección de discontinuidades dentro material por medio de la inspección con ultrasonido. Tomado de: <http://www.zone.nl.com/devzonecdatupid3368>

ondas ultrasónicas para evaluar materiales sin modificar sus condiciones de servicio (Figura 40). El ensayo de ultrasonido puede ser usado para medir espesores de materiales o para examinar la estructura interna de piezas por posibles discontinuidades. Una onda sonora esta definida por cuatro características principales que son: el período o tiempo que toma una partícula para realizar un ciclo completo, la frecuencia que es el numero de oscilaciones

de la partícula por segundo, la amplitud o máximo desplazamiento que realiza la partícula sometida a vibración y la longitud de onda, o distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento.

La aplicación del ultrasonido como método de ensayo no destructivo, envuelve la utilización de mecanismos que generen y reciban las señales ultrasónicas, estos elementos se denominan palpadores y su característica principal es la capacidad de transformar energía de una a otra forma, es decir la energía eléctrica puede ser convertida a energía mecánica y la energía mecánica puede ser convertida en energía eléctrica. La conversión de energía se realiza en el ultrasonido partiendo de dos fenómenos físicos que son el efecto piezoeléctrico y el efecto magnetoestrictivo.

3.5.2 Definiciones

• Haz ultrasónico

Por haz ultrasónico se entiende la zona definida por el palpador en la cual existe presencia de ondas ultrasónicas, la anchura de este haz no es totalmente recto, por el contrario semeja una forma

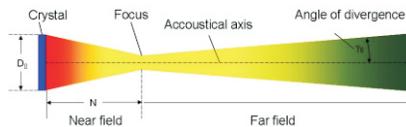


Figura 41. Esquema del haz ultrasónico en donde se observan las zonas de campo cercano y campo lejano. Tomado de: <http://www.krautkramer.com.au/training.htm>

de abanico, dentro de las cuales se pueden definir claramente tres zonas que son en su orden: la zona muerta, la cual se debe a la interferencia producida por las vibraciones del cristal, en esta zona cualquier discontinuidad será totalmente obviada durante el tiempo de oscilación del cristal, debido a que la presión acústica del haz es nula en toda su profundidad (Figura 41). La zona de campo cercano, o zona de Fresnel, es aquella en la cual por efecto de las fluctuaciones de la intensidad, es sumamente difícil detectar discontinuidades, pues se producirán indicaciones múltiples, y la amplitud de las mismas tendrá grandes variaciones de acuerdo a la distancia desde la superficie reflectora a la cara del palpador. La zona de campo lejano, o zona de Fraunhofer, en esta zona la presión sonora se estabiliza y la detección de discontinuidades se realiza de forma confiable.

• Atenuación

Es el efecto por el cual la energía del haz ultrasónico disminuye o se debilita a lo largo del material que está siendo inspeccionado y se debe principalmente a dos causas que son la absorción, que es la conversión de energía mecánica en calor y la dispersión, que es la pérdida de energía debida a la no homogeneidad del material bajo prueba es decir la presencia de pequeñas heterogeneidades que actúan como focos dispersores.

- **Palpadores**

Un palpador es un mecanismo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica y energía mecánica en energía eléctrica, es decir es un mecanismo que responde como emisor y receptor de ondas sonoras. Dentro de los palpadores empleados en la inspección por ultrasonido se tienen los de contacto directo (normales y angulares, de cristal único y de cristal múltiple o emisor/receptor), los de contacto indirecto o inmersión y otros de aplicaciones específicas.

- **Acoplantes**

Los acoplantes son productos empleados en la interfase del palpador y el material a ser inspeccionado y su propósito es el de proveer una trayectoria con bajo resistencia a la transmisión del sonido, algunos de los tipos de acoplantes empleados son agua, metil celulosa, grasas en base a silicona, mercurio o glicerina. La selección del acoplante debe responder a factores como costo, disponibilidad, viscosidad, adherencia a la superficie, condición superficial de la pieza, temperatura de la pieza, inclinación de la superficie a inspeccionar entre otros.

3.5.3 Aplicación de la prueba

La aplicación del ensayo por ultrasonido, se puede realizar mediante varios métodos y técnicas dentro de los cuales se encuentran el método de Contacto Directo (por haz normal, angular o superficial), el método de Inmersión (por inmersión en tanque de haz normal o angular, chorro de agua o de rueda). De igual manera la aplicación de la prueba de ultrasonido requiere del cumplimiento de las siguientes etapas en el proceso de inspección (Figura 42).



Figura 42. Inspección estructural al timón de dirección por ultrasonido. Tomado de: http://www.nasa.gov/centerangle/images/content/213978main_14-img2-330.jpg

- **Pre limpieza**

O preparación de la pieza, a diferencia de los anteriores métodos de inspección, para la inspección por ultrasonido no se requiere remover la capa de pintura de la pieza, no obstante esta debe estar libre de suciedad, y cualquier otro elemento extraño que pueda impedir el libre acoplamiento entre el palpador y la pieza. Los procesos de limpieza se pueden llevar a cabo mediante cualquiera de los siguientes métodos o la combinación de varios de ellos: Limpieza con detergente, limpieza con solventes o limpieza en seco de la superficie de la pieza.

- **Aplicación del acoplante**

Es de vital importancia que durante la inspección de la pieza permanentemente exista una capa de acoplante entre el palpador y la pieza de espesor constante el cual evitará la aparición de indicaciones falsas en el equipo de inspección, igualmente el barrido de la superficie de la pieza se debe ejecutar con una presión y velocidad constante, evitando las variaciones bruscas en el desplazamiento del palpador.

- **Inspección**

El método de inspección por ultrasonido es un método directo que nos permite verificar la existencia de discontinuidades en tiempo real, es decir, que dichas discontinuidades aparecen como una señal visual, sonora o luminosa en la pantalla del equipo de inspección al ser detectadas por el haz ultrasónico, esta señal puede ser utilizada para la activación de mecanismos o alarmas de control de calidad lo que permite que el método de inspección por ultrasonido sea fácilmente automatizado en procesos continuos de producción.

- **Post limpieza**

Una vez inspeccionada la pieza se debe retirar la capa de acoplante empleado según sea el caso.

3.5.4 Equipos para inspección por ultrasonido

Los equipos e instrumentos ultrasónicos básicamente están constituidos por sistemas de generación, sincronización, amplificación de señal y barrido que en conjunto hacen posible la detección de discontinuidades por emisión y recepción de pulsos o señales ultrasónicas. Los principales elementos de un sistema de detección por ultrasonido son: palpador y emisor/receptor, circuito de amplificación y recepción, pantalla osciloscópica, generador de control de tiempo de barrido, circuito de señal, circuito de pulso y circuito de barrido. Adicionalmente la mayoría de equipos de ultrasonido poseen circuitos de memoria, impresión, congelamiento de imagen, salidas y conexiones a otros equipos, que permiten obtener registros permanentes de la inspección o procesar los resultados arrojados por la misma (Figura 43).



Figura 43. Equipo para la inspección por ultrasonido. Tomado de: <http://www.setsco.com/aerospace.aspx?pe8Kk/yk9C>

3.6 CORRIENTES INDUCIDAS

El método de corrientes inducidas es una técnica que se utiliza, tanto para la detección de discontinuidades en materiales, como para medir indirectamente características mecánicas, metalúrgicas y físicas que se correlacionan con las



Figura 44. Sistema automatizado de inspección por corrientes inducidas en una rueda de turbina. Tomado de: <http://www.vamsterdam.nl/images/Eddy/EddyBolthole.jpg>

propiedades eléctricas y magnéticas del objeto ensayado. El método es utilizado principalmente para la detección de grietas superficiales o sub-superficiales especialmente en materiales no ferromagnéticos, las limitaciones de penetración hacen que la inspección se limite a capas superficiales finas llegando a una profundidad máxima de 5 mm., en el caso de usar muy bajas frecuencias. El ensayo se basa en la interacción de campos electromagnéticos con el objeto examinado (Figura 44).

Los componentes básicos son:

- Una bobina conduciendo corriente eléctrica alterna.
- Un medio de detección de la corriente inducida.
- El objeto metálico sujeto a ensayo.

La corriente alterna de la bobina induce un campo magnético orientado perpendicularmente a la corriente, este campo es modificado si un componente metálico está presente, se generan o inducen así corrientes parásitas (eddy)³ las cuales fluyen normalmente al campo magnético primario. Las corrientes inducidas, a su vez establecen un campo magnético secundario el cual resulta opuesto al de la bobina, lo que causa una reducción



Figura 45. Inspección manual por corrientes inducidas. Tomado de: <http://www.veem.com/auimagesndt1.jpg>

de flujo magnético en ésta produciendo un cambio de impedancia y es precisamente el monitoreo de este cambio lo que constituye el ensayo por corrientes inducidas ya que discontinuidades en el material afectarán el cambio neto del campo magnético original (Figura 45).

Las corrientes inducidas pueden utilizarse en:

- Medición de la conductividad eléctrica.
- Medición de espesores.
- Espesor total de productos metálicos delgados cuando el espesor medido, es menor que la profundidad de la penetración efectiva.
- Medición del espesor de recubrimientos no conductores sobre bases o substratos metálicos.
- Medición de recubrimientos metálicos sobre una base conductiva o magnética. Esta aplicación presenta las variantes de recubrimientos de baja y alta conductividad y recubrimientos de baja y alta permeabilidad sobre

³ El término "eddy" proveniente del inglés y cuyo significado es "remolino" fue asociado al fenómeno de las corrientes inducidas descubierto por el físico francés León Foucault en 1851 dada su similitud con las ondas circulares que se forman en el agua (remolinos) cuando es excitada por una fuente vibratoria o con la simple caída de un objeto al agua.

substratos de alta o baja conductividad o permeabilidad según el caso.

- Detección de fisuras (Figura 46).
- Clasificación de los materiales.



Figura 46. Inspección manual viga principal por corrientes inducidas. Tomado de: http://www.amtonline.com/articlephotos1213710175963_sup_02.jpg

Como desventajas del ensayo se tienen las siguientes:

- Es un ensayo efectivo en el caso de espesores delgados; si el espesor de la pieza sujeta al ensayo aumenta, la inexactitud de la medición también aumenta.
- Requiere patrones de calibración los cuales deben duplicar la geometría del material ensayado, así como sus propiedades eléctricas y magnéticas.
- Profundidad de las corrientes relativamente pequeña lo que limita su uso.
- Requiere de bobinas de magnetización local para ser utilizado en materiales ferromagnéticos.
- El equipo es caro y el entrenamiento muy exigente.

3.6.1 Principios básicos del ensayo por corrientes inducidas

El ensayo por corrientes inducidas básicamente consiste en el proceso de inducir electromagnéticamente pequeñas corrientes eléctricas dentro de una pieza conductora de electricidad y observar los cambios ocasionados por estas corrientes en el campo electromagnético establecido (Figura 47). De lo anterior resulta que las corrientes inducidas

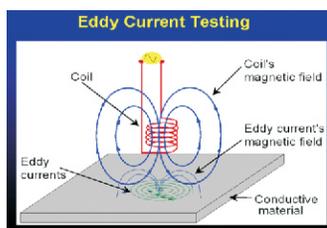


Figura 47. Principio de funcionamiento de la inspección por medio de corrientes inducidas o de eddy. Tomado de: <http://www.euronrd.com/EDDY%20CURRENT.html>

o de eddy, se generan una vez esta siendo sometido un material electromagnético a un campo magnético primario, el cual por su carácter electromagnético genera dentro de si mismo unas corrientes parásitas o secundarias que siguen trayectorias circulares sobre la superficie de la pieza y penetran aproximadamente hasta unos tres milímetros en el material, así mismo estas corrientes inducidas generan un campo magnético secundario opuesto al campo primario, de esta forma se establece un equilibrio entre estos dos campos magnéticos que al verse interrumpido por una discontinuidad superficial o sub superficial, ocasionan un desequilibrio y generan una señal la cual es amplificada y transformada en una imagen o aviso sonoro.

3.6.2 Definiciones

• Inducción electromagnética

Es el nombre que se da al principio bajo el cual un campo magnético variable induce corriente eléctrica en una bobina, la corriente entonces será inducida

cuando las líneas de fuerza del campo magnético se muevan a lo largo de la bobina.

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la medida de la facilidad con la cual se puede hacer fluir una corriente eléctrica dentro de un material, en consecuencia se tienen materiales buenos conductores de electricidad y malos conductores.

- **Efecto de borde**

Se entiende como efecto de borde aquel que se presenta al acercarse la bobina inspectora al borde de la pieza que se está inspeccionando, esto causa que las trayectorias de las corrientes inducidas se alteren y generen un cambio en el campo magnético secundario, que a su vez se refleja en la aparición de una falsa indicación en el instrumento o equipo de inspección.

- **Lift-off y fill factor**

Se entiende por lift-off o despegue, el espacio que obligadamente queda entre la bobina inspectora y la pieza bajo inspección, este efecto debe ser controlado de la mejor manera en el momento del barrido aplicando una presión y velocidad constante. El fill-factor o factor de llenado, igualmente es el espacio que queda entre la bobina inspectora y la pieza bajo inspección referida a agujeros y barras circulares.

3.6.3 Aplicación de la prueba

La aplicación del ensayo por corrientes inducidas, requiere del cumplimiento de las siguientes etapas en el proceso de inspección.

- **Pre limpieza**

O preparación de la pieza, al igual que en el método de inspección por ultrasonido, para la inspección por corrientes inducidas no se requiere remover la capa de pintura de la pieza, no obstante esta debe estar libre de suciedad y cualquier otro elemento extraño que pueda impedir el libre deslizamiento de la bobina de inspección sobre la pieza (Figura 48). Los procesos de limpieza se pueden llevar a cabo mediante cualquiera de los siguientes métodos o la combinación de varios de ellos: Limpieza con detergente, limpieza con solventes o limpieza en seco de la superficie de la pieza.



Figura 48. Pre limpieza componente aeronáutico para inspección por corrientes inducidas. Vista LIAN/CAMAN/FAC.

• Inspección

El método de inspección por corrientes inducidas es un método directo que nos permite verificar la existencia de discontinuidades en tiempo real, es decir, que dichas discontinuidades aparecen como una señal visual, sonora o luminosa en la pantalla de nuestro equipo de inspección, al ser detectadas por la bobina de inspección. Básicamente el procedimiento de inspección consiste en realizar un barrido del área a inspeccionar con una bobina de inspección alimentada con corriente alterna sobre la superficie de la pieza, la corriente que circula por la bobina genera en ésta un campo magnético primario, que al ser interrumpido por la pieza genera dentro de ésta unas corrientes eléctricas circulares de bajas magnitudes o corrientes inducidas las cuales a su vez generan un campo magnético secundario opuesto al campo magnético primario (Figura 49 y 50). Una vez establecido el equilibrio entre estos dos campos magnéticos, cualquier alteración en el campo magnético secundario ocasionado por una discontinuidad en la pieza, afectará el campo magnético primario o de la bobina, situación que se refleja en el cambio de impedancia de la bobina, este cambio de impedancia de la bobina es detectado y magnificado en una señal visual o sonora.



Figura 49. Calibración de la señal buscada en la pieza a inspeccionar mediante el bloque patrón. Visita LIAN/CAMAN/FAC.



Figura 50. Barrido sobre la pieza inspeccionada por corrientes inducidas en busca de la señal previamente calibrada. Visita LIAN/CAMAN/FAC.



Figura 51. Equipo para inspección por corrientes inducidas. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

3.6.4 Equipos para inspección por corrientes inducidas

Los equipos e instrumentos para inspección por corrientes inducidas, básicamente están constituidos por sistemas de generación, sincronización, amplificación de señal y barrido que en conjunto, hacen posible la detección de discontinuidades por detección de cambios en la impedancia de la bobina inspectora. Los principales elementos de un sistema de detección por corrientes inducidas son: bobina inspectora, circuito de amplificación y recepción de señal, pantalla osciloscópica, circuito generador de corriente AC. Adicionalmente la mayoría de equipos de corrientes inducidas poseen circuitos de memoria, impresión, congelamiento de imagen, salidas y conexiones a otros equipos, que permiten obtener registros permanentes de la inspección o procesar los resultados arrojados por la misma (Figura 51).

3.7 RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

La radiografía es un método usado para la inspección no destructiva que se basa en la absorción diferencial de radiación penetrante por la pieza que ésta siendo inspeccionada causada por las variaciones de masa, composición y estructura del material, así, diferentes regiones de una misma pieza absorberán cantidades diferentes de radiación penetrante.

Esta absorción diferencial de radiación penetrante puede ser detectada a través de una película, un tubo de imagen o ser medida por detectores electrónicos de radiación. La variación de la cantidad de radiación absorbida detectada a través de los medios mencionados indicará entre otras cosas la existencia de una discontinuidad interna en un material. La radiografía industrial es entonces usada para detectar características de una región de un determinado material comparada con una región cercana, diferencias muy grandes de estas características son más fácilmente detectables.

En términos generales la radiografía industrial puede detectar solamente aquellas características diferentes de una región que presente una variación en el espesor, en el plano paralelo a la dirección del haz de radiación. Esto quiere decir que la capacidad del proceso de detectar discontinuidades con varios espesores en planos perpendiculares al haz, como fisuras, dependerá mucho de la técnica de prueba realizada.

Discontinuidades como poros e inclusiones que presenten un espesor variable en todas las direcciones serán fácilmente detectadas siempre que no sean muy pequeñas con relación al espesor total de la pieza, en general variaciones que representen el 2% o más de la variación de absorción con relación al espesor total podrán ser detectadas.

La inspección radiográfica es muy usada en el campo industrial en la inspección de fundiciones, forja y soldaduras, particularmente donde se exige la necesidad de evitar discontinuidades internas en el material, de igual manera en el campo aeroespacial en la inspección de piezas o componentes que se encuentren recubiertos o fuera del alcance del operario, para ser inspeccionados mediante un ensayo no destructivo directo, como son superficies alares, colas, conexiones, conductos, guayas y mangueras (Figura 52). Dada su capacidad de revelar discontinuidades en una



Figura 52. Inspección sobre los planos de un F-18 por radiografía industrial. Tomado de: http://www.itwl.plenfoto1z_31.jpg

variedad de materiales, la radiografía industrial es actualmente uno de los principales ensayos no destructivos en uso. El ensayo radiográfico, generalmente requiere de las siguientes etapas en su proceso:

- La exposición de una película a la radiación X o gamma que atraviesa un cuerpo cualquiera.
- El procesamiento de esta película.
- La interpretación de la radiografía resultante.

Existe variedad de estos procedimientos y el éxito de cualquier ensayo dependerá del conocimiento y del control de esas técnicas (Figura 53).

Como ventajas de aplicación del ensayo radiográfico como un medio de inspección y control de calidad se pueden citar las siguientes:

- Puede ser aplicado a la mayoría de los materiales.
- Puede dejar un registro permanente del resultado del examen.
- Revela la naturaleza interna del material.
- Puede ser aplicado en un proceso, indicando la acción correctiva necesaria en caso de defectos.

Existen tanto limitaciones físicas, como económicas en la utilización del ensayo radiográfico dentro de los cuales se pueden mencionar:

- Requisitos geométricos hacen que dicho ensayo sea impracticable en piezas de forma compleja.
- Cuando una orientación apropiada de la fuente de radiación, de la pieza y de la película, no puede ser obtenida, la prueba radiográfica es de poco valor.
- Cualquier pieza que no permita la colocación de la película del lado opuesto a la fuente, no puede ser evaluada por este método.
- La radiografía se basa en las diferencias de densidad y de absorción de los materiales y por esto mismo tienen poco valor en la detección de pequeñas discontinuidades que no sean paralelas a la línea de radiación.
- Defectos laminares difícilmente son detectados.
- Las condiciones de seguridad radiológica impuesta para rayos X y gamma también pueden ser consideradas como limitaciones (Figura 54).



Figura 53. Inspección en banco fijo de radiografía industrial. Tomado de: <http://www.setsco.com/aerospace.asp?yK9CM>



Figura 54. Fuente de rayos gamma. Tomado de: http://www.ettesting.com/db_RTXDevice1.jpg

- La sumisión a los reglamentos de seguridad exigidos en los ensayos radiográficos, demanda tiempo y equipos especiales de protección aumentando los costos.
- La inspección radiográfica es un medio relativamente caro de ensayo no destructivo, se torna más económico cuando es aplicado a materiales de fácil manipulación y geometría simple.
- El examen de piezas de gran espesor exige equipos de alta energía encareciendo el método.

3.7.1 Principios básicos del ensayo por radiografía

El ensayo por radiografía tiene como fundamento la utilización de la radiación penetrante, cuyo nombre se origina en la propiedad que poseen ciertas formas de energía radiante de atravesar materiales opacos a la luz visible. Las características principales de la radiación penetrante son el poseer la misma velocidad de propagación de la luz (300000 km/s), su trayectoria siempre es en línea recta y no es afectada por campos eléctricos ni magnéticos, poseen la propiedad de impresionar emulsiones fotográficas, formando imágenes, son invisibles, no pueden ser focalizada y no sufre refracción (Figura 55).

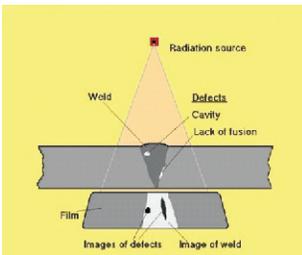


Figura 55. Principio de inspección de soldaduras por radiografía industrial. Tomado de: <http://www.nsf.ac/kaasimagesr13.JPG>

Los tipos de radiación penetrante conocidos y frecuentemente usados en los ensayos por radiografía son los rayos X y los rayos gamma, los rayos gamma son aquellos emitidos desde el núcleo de un átomo el cual se encuentra en un estado excitado de energía. Los rayos X, son aquellos emitidos desde las capas electrónicas de los átomos y pueden ser generados por efectos fotoeléctricos, efectos Compton⁴ o por producción de pares.

La técnica específicamente consiste en irradiar el material a inspeccionar por medio de una fuente de radiación penetrante (rayos x o rayos gamma) y recoger por medio de una placa recubierta de emulsión fotográfica o fluorescente la impresión latente de la estructura interna del material con base en la absorción diferencial de radiación (Figura 56). Una vez expuesta la placa se realiza un proceso de revelado y fijado de la imagen latente y se obtiene entonces el registro permanente de la



Figura 56. Placas radiográficas de uso industrial. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

⁴ Efecto Compton, difusión de fotones debida a las interacciones entre la radiación electromagnética y la materia. Este efecto fue descubierto por el físico estadounidense Arthur Holly Compton en 1922, durante su estudio de la difusión de los rayos X por el grafito.

estructura del material la cual es analizada bajo condiciones de luz adecuadas y se obtiene como resultado la evaluación de discontinuidades dentro del material inspeccionado.

3.7.2 Definiciones

- **Coefficiente de absorción**

Es la medida de la capacidad de un material para absorber radiaciones penetrantes, es así que cuanto mayor sea la densidad y el número atómico de un material, mayor será la cantidad de radiación por él absorbida, y por ende la radiación que lo atravesará tendrá valores bajos, igualmente para un mismo material, cuanto mayor sea la energía de la radiación incidente, menor será la cantidad de radiación absorbida y mayor cantidad de radiación atravesará el material.

- **Capa hemireductora**

Es el espesor de cierto material que es capaz de absorber la mitad de la intensidad de la radiación medida sin barreras.

- **Registro radiográfico**

El registro radiográfico es la imagen obtenida del procesamiento de la placa radiográfica irradiada, esta placa generalmente esta constituida de capas superpuestas de gelatina endurecida, emulsión de bromuro de plata, sustrato de adherencia y un acetato o base de la placa, adicionalmente puede contener pantallas reforzadoras o intensificadoras que generalmente son finas hojas de plomo cuyos espesores frecuentes son de 0.1 mm. para la pantalla anterior y 0.15 mm. para la pantalla posterior.

- **Distancia fuente película**

Es la distancia total entre la fuente de rayos X o la fuente de gamma grafía y la placa o película radiográfica (Figura 57).

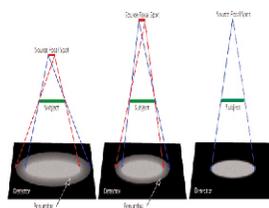


Figura 57. Efecto de la distancia fuente-objeto-película sobre la penumbra captada. Tomado de: <http://www.netled.org/Education/Resources/CommunityCollege/Radiograph>

- **Distancia fuente objeto**

Es la distancia medida entre la fuente de rayos X, o la fuente de gamma grafía y el objeto que esta siendo irradiado.

- **Distancia objeto película**

Es la distancia medida entre el objeto que esta siendo irradiado y la placa o película radiográfica, esta distancia debe ser lo menor como sea posible para evitar efectos de penumbra sobre la imagen obtenida.

- **Densidad radiográfica**

Es la medida del grado de oscurecimiento existente en una zona determinada de la película radiográfica expuesta y revelada, los valores comúnmente empleados y aceptados son para rayos X mínimo 1.8 y máximo 4.0 y para gamma grafía mínimo 2.0 y máximo 4.0.

- **Contraste radiográfico**

Es la diferencia de densidades entre dos regiones adyacentes en la película o la capacidad de la película de detectar intensidades y energías diferentes de radiación.

- **Definición radiográfica**

Al observar con detalle la imagen formada en la película radiográfica, se verá que el cambio de densidades de un área a otra no se hace de manera brusca.

3.7.3 Aplicación de la prueba

La aplicación del ensayo por radiografía, requiere del cumplimiento de las siguientes etapas en el proceso de inspección.

- **Exposición**

O toma de las películas, para lo cual se requiere la selección adecuada del tipo de película a emplear, tiempo de exposición, distancias y dosis de radiación a aplicar (Figura 58). Durante la toma de las películas se debe cumplir con todas las normas de seguridad y protección radiológica, demarcar el área de influencia de la radiación con avisos visuales o sonoros para evitar el tránsito de personal extraño o no calificado. Adicionalmente se debe efectuar la correcta identificación de las películas expuestas, con lo cual se tendrá referenciada el área de la pieza que ha sido irradiada.



Figura 58: Exposición de las películas en el proceso de inspección por radiografía industrial. Tomado de: <http://www.ndt.org/EducatorResourcesCommunityCollegeRadiograph-1>

- **Revelado**

Una vez se han hecho las tomas se procede con el procesamiento de las películas expuestas con lo cual se revelan y fijan las imágenes latentes presentes en la película radiográfica expuesta, se realiza revelando la película al sumergirla durante aproximadamente 5 minutos en una solución reveladora a una temperatura de 20 °C que actúa sobre los cristales de bromuro de plata reduciendo la plata iónica a su estado metálico. Posteriormente se aplica un baño de parada o enjuague intermedio con agua o una solución de agua y ácido acético, por un lapso de 1 minuto como mínimo, luego de esto se sumerge la película en una solución fijadora cuya función es remover el bromuro de plata de las porciones no expuestas de la película, sin afectar los que fueron expuestos a

la radiación y endurecer la emulsión gelatinosa. Seguidamente se aplica un baño de enjuague en agua corriente para eliminar los complejos solubles de plata formados en la emulsión de fijado. Ocasionalmente suele darse un último baño humectante a las películas con el fin de que la película se preserve de mejor manera, por último la película es secada al aire libre o en hornos de secado para posteriormente ser analizadas y evaluadas (Figura 59).



Figura 59. Proceso de revelado de las placas radiográficas expuestas. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

• Inspección

Una vez procesadas y secas las películas son observadas bajo un negatoscopio el cual permite magnificar la imagen y de acuerdo a la experiencia y conocimientos del inspector, se determina la presencia de algún tipo de defecto físico o discontinuidad en el material que fue inspeccionado (Figura 60).

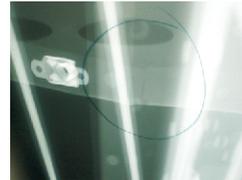


Figura 60. Componente aeronáutico defectuoso detectado mediante radiografía industrial. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

3.7.4 Equipos para inspección por radiografía

Los rayos x destinados al uso medico o industrial son generados en una ampolla de vidrio, resistente a la temperatura, la cual se encuentra al vacío y posee varias partes internas que son el ánodo, el cátodo, un filamento y un foco térmico o blanco que generalmente es de tungsteno. Al crear una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo los fotones emitidos por el filamento son acelerados a grandes velocidades incrementando su energía cinética y al impactar el blanco de tungsteno desprenden de éste las partículas X por los efectos fotoeléctricos, de Compton o por producción de pares. Estas partículas X son desviadas, en forma direccional o panorámica según sea la forma del foco, filtradas y finalmente dirigidas hacia el objeto que se desea irradiar. Operacionalmente los componentes externos de un equipo de emisión de rayos X son entre otros el interruptor principal, los botones de ajuste del KV, el medidor de tiempo de exposición, el medidor de mA., el botón de encendido, fusibles y conectores (Figura 61).



Figura 61. Tubos de Rayos X para radiografía industrial. Tomado de: http://www.nayak.aero/no_cache/services-offers/ndt/

Las fuentes radiactivas o de rayos gamma requieren de cuidados especiales de seguridad pues una vez activadas emiten radiación constantemente, los irradiadores o contenedores generalmente constan de un blindaje en plomo o uranio empobrecido dentro de un recipiente de acero, una fuente radiactiva encapsulada y sellada en un envoltorio metálico y un dispositivo para exponer la fuente bien sea mecánico, manual, eléctrico o neumático. Los tipos de fuente radiactiva comúnmente empleados en radiografía industrial son el Cobalto 60, Iridio 192, Tulio 170, Cesio 137, Europio, Selenio y Plata entre otros.

4. OTRAS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN

Adicionalmente a las técnicas de inspección y pruebas descritas anteriormente, el mantenimiento aeronáutico posee herramientas y procedimientos que permiten efectuar predicciones y evaluar el correcto funcionamiento o desgaste de los componentes dentro de los sistemas dinámicos, motores y motores de turbina. Con estos procedimientos se busca principalmente determinar el desgaste de los componentes internos de los motores y mecanismos, analizar el comportamiento térmico de funcionamiento o malfuncionamiento de los mismos y garantizar que el combustible que es suministrado para la generación de potencia cumpla con los requisitos de calidad necesarios para prevenir fallas o paradas de emergencia de las aeronaves.

4.1 TERMOGRAFÍA INDUSTRIAL

4.1.1 Los rayos infrarrojos

El descubridor de los rayos infrarrojos fue Sir Frederick William Herschel nacido en Hannover, Alemania en 1738, fue muy conocido como músico y astrónomo. En el año de 1757 emigró hacia Inglaterra donde con su hija Carolina construyeron un Telescopio. Su más famoso descubrimiento fue el del planeta Urano en el año 1781. En el año de 1800, Sir William Herschel hizo otro descubrimiento muy importante, se interesó en verificar cuanto calor pasaba por filtros de diferentes colores al ser observados al sol, se dio cuenta que esos filtros de diferentes colores dejaban pasar diferentes niveles de calor. Continuando con ese experimento, Herschel hizo pasar luz del sol por un prisma de vidrio y con esto se formó un espectro. Haciendo controles de temperatura en los distintos colores de ese espectro verificó que más allá del rojo, fuera de las radiaciones visibles al ojo humano, la temperatura era más elevada y encontró que esta radiación invisible por encima del rojo se comporta de la misma manera desde el punto de vista de la reflexión, refracción, absorción y transmisión que la luz visible. Era la primera vez que alguien demostraba que había otra forma de iluminación o radiación que era invisible al ojo humano. Esta radiación inicialmente la denominó Rayos caloríficos y luego Infrarrojos, es decir, por debajo del nivel de energía del rojo. Todos los materiales que estén a una temperatura por encima del cero absoluto (0°K , -273°C) emiten radiación infrarroja (Figura 62).



Figura 62. Termografía de instalación eléctrica de alta tensión con conexión mal fijada. Tomado de: <http://www.snewetsrisc.com/Aztectermografia.html>

4.1.2 La Termografía y el mantenimiento

La Termografía es el proceso que se ocupa de la medición desde una cierta distancia de la temperatura radiada por los cuerpos. Una Termografía Infrarroja es la técnica de producir una imagen visible de luz infrarroja invisible emitida por objetos de acuerdo a su condición térmica. La temperatura es el factor más crítico en la operación y el mantenimiento de instalaciones eléctricas, instalaciones de transformación de energía, equipo de alta rotación como motores, turbinas, compresores y rodillos, para mencionar unos ejemplos (Figura 63 a 67).

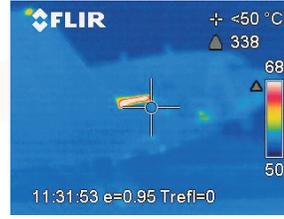


Figura 63. Termografía planta motriz AC-47T Fantasma de la FAC. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

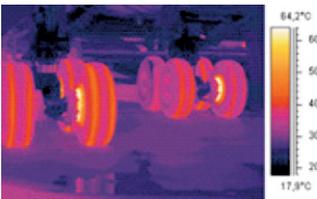


Figura 64. Termografía del conjunto de tren de aterrizaje que muestra el comportamiento del sistema de frenos. Tomado de: <http://www.snewetsrisc.com/Azctermografia.html>

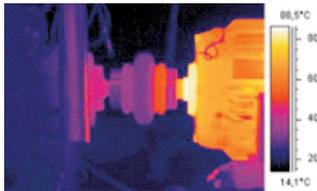


Figura 65. Termografía motor eléctrico con sobrecalentamiento del eje por desalineación. Tomado de: <http://www.snewetsrisc.com/Azctermografia.html>

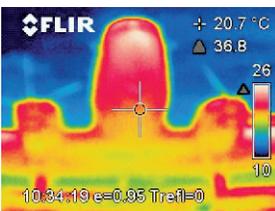


Figura 66. Perfil de temperaturas avión AC-47T Fantasma de la FAC obtenido por termografía. Visita LIAN/CAMAN/FAC.

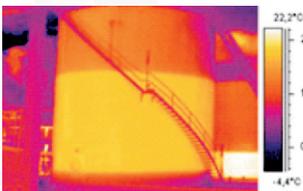


Figura 67. Medición del nivel de llenado de un tanque por medio de Termografía. Tomado de: <http://www.snewetsrisc.com/Azctermografia.html>

La temperatura nos “alerta” que una falla eléctrica está por ocurrir o, en un equipo mecánico un incremento en la temperatura de operación es “el aviso”, que una falla está por ocurrir. Es por esto que se habla de mantenimiento predictivo. El análisis mediante termografía infrarroja nos permite medir de forma exacta la temperatura en puntos predeterminados y así establecer las condiciones actuales de equipos o instalaciones críticos.

La termografía es, hoy en día, una ayuda inestimable en los programas de mantenimiento predictivo basados en inspecciones periódicas de los puntos críticos de las instalaciones: instalaciones eléctricas, equipos electromecánicos, paneles refractarios, tuberías etc. La imagen termográfica muestra en un solo cuadro bidimensional las temperaturas absolutas de todos los puntos del cuerpo fotografiado, permitiendo la identificación rápida y efectiva de los puntos sometidos a sobre calentamientos o sobre enfriamientos, de una manera más sencilla, ya que permite rastrear el objetivo de forma directa y precisa.

Las ventajas principales de la termografía son:

- Método de análisis sin detención de procesos productivos, ahorra gastos
- Baja peligrosidad para el operario por evitar la necesidad de contacto con el equipo
- Determinación exacta de puntos deficientes en una línea de proceso (hot spot)
- Reduce el tiempo de reparación por la localización precisa de la falla
- Facilita informes muy precisos al personal de mantenimiento
- Ayuda al seguimiento de las reparaciones previas
- Detecta problemas rápidamente sin interrumpir el funcionamiento del equipo.
- Minimiza el mantenimiento preventivo y el tiempo en localizar problemas.
- Puede ser utilizada por compañías de seguros para cerciorarse que el equipo o las instalaciones se encuentran en estado óptimo.
- Previene incendios o accidentes.

Las termografías pueden ser aplicadas en cualquier situación donde un problema o condición pueda ser visualizado por medio de una diferencia de temperatura. Una termografía puede tener aplicación en cualquier área siempre y cuando esta tenga que ver con variación de temperatura (Tabla 3).

Tabla 3. Aplicaciones comunes del ensayo por Termografía

APLICACIONES ELÉCTRICAS	APLICACIONES MECÁNICAS	APLICACIONES AERONÁUTICAS	APLICACIONES CIVILES	APLICACIONES AMBIENTALES
Instalaciones y líneas eléctricas de Alta y Baja Tensión.	Reductores, frenos, rodamientos, acoplamientos y embragues mecánicos. Fallos de alineamiento y acoplamiento.	Caracterización de materiales. Mantenimiento predictivo y preventivo.	Inspección de pérdida de energía atérmica para Edificios. Evaluación de la humedad para Edificios. Identifica pérdidas y fugas de energía.	Localización de áreas de acumulación de desechos antiguos.
Cuadros eléctricos, conexiones, bornes, transformadores, fusibles y empalmes eléctricos.	Hornos, calderas e intercambiadores de calor. Compresores. Bomba. Hornos y procesos de calentamiento.	Comportamiento de rodamientos y sistemas de frenos en trenes de aterrizaje.	Inspecciones de integridad del concreto.	Localización de tanques bajo tierra en zonas industriales. Huellas térmicas de minas enterradas, etc.
Motores eléctrico generadores, bobinados, etc.	Instalaciones de Frio industrial y climatización. Evaluación de equipos de aire acondicionado y calefacción	Flujo de fluidos en ductos y tuberías. Eficiencia energética de motores y turbinas. Flujo de gases de escape..	Inspecciones en pisos sobrecalentados, localización de fugas y distribución de temperatura.	Búsqueda de supervivientes. Localización de personas perdidas.
Localiza cables, conductores o tuberías sobrecalentados.	Líneas de producción, corte, prensado, foja, tratamientos térmicos. Detección de problemas de fluidos, aislamiento, maquinaria rotativa y transmisión de potencia.	Comportamiento térmico de soportes para sistemas de armamento y entrega.	Localiza aislamiento dañado o escaso.	Estudios de imágenes térmicas procedentes de objetos enterrados.
Inspecciones aéreas eléctricas de alto voltaje para líneas de transmisión.	Pérdidas de frío en cuartos fríos. Detección de fugas en el aislamiento en equipos de refrigeración	Distribución de perfiles de temperatura sobre planos y fuselaje.	Detección de Goteras para edificios y naves industriales.	Localización de incendios de baja intensidad en bosques densos.
Mantenimiento eléctrico. Sobrecarga de circuitos eléctrico. Termografía de subestaciones.	Transferencia de calor en fluidos. Capacidad de adiabores. Inspecciones mecánicas. Inspecciones de eficiencia energética.	Sistemas de visión nocturna (FLIR). Ubicación de blancos y entrega de armas por infrarrojo.	Identifica partes de techos dañadas por el agua, #pida y eficientemente.	Localización de personas atrapadas en incendios de edificios así como poder caminar a través del humo.

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Principios básicos del ensayo por termografía

La Termografía Infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y visualizar temperaturas de superficie con precisión, la Física permite convertir las mediciones de la radiación infrarroja en medición de temperatura, esto se logra midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético desde la superficie del objeto, convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas, los ojos humanos no son sensibles a la radiación infrarroja emitida por un objeto, pero las cámaras termográficas, o de termovisión, son capaces de medir la energía con sensores infrarrojos (microbolómetro), capacitados para "ver" en estas longitudes de onda, esto nos permite medir la energía radiante emitida por objetos y por consiguiente, determinar la temperatura de la superficie a distancia, en tiempo real y sin contacto.

La radiación infrarroja es la señal de entrada que la cámara termográfica necesita para generar una imagen de un espectro de colores, en el que cada uno de los colores, según una escala determinada, significa una temperatura distinta, de manera que la temperatura medida más elevada aparece en color blanco (Figura 68).

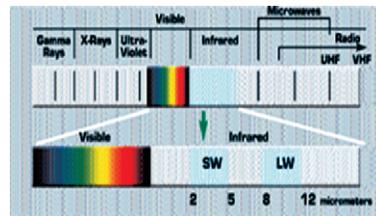


Figura 68. Espectro electromagnético y región de rayos infrarrojos. Tomado de <http://www.snewetisc.com/Actectermografia.html>

4.1.4 Definiciones

• Emisividad

La emisividad de un objeto se define a partir del concepto de cuerpo negro. Un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la radiación infrarroja que recibe, no refleja ni transmite por lo tanto nada. La radiación emitida por un cuerpo negro es función únicamente de la temperatura. La emisividad de un objeto para una temperatura se define como el cociente entre la energía infrarroja emitida por el objeto y la emitida por un cuerpo negro.

• Radiación infrarroja

Es aquella que tiene una longitud de onda entre $0,78 \mu\text{m}$. y $1000 \mu\text{m}$. (micras), los rayos infrarrojos se subdividen en función de la proximidad de longitud de onda a la luz visible como cercanos, medios o lejanos. La radiación infrarroja es una forma de radiación electromagnética como las ondas de radio, las microondas, rayos ultravioleta, rayos gamma, la luz visible, etc. Todas estas formas de radiación en conjunto dan lugar al espectro electromagnético. Tiene en común que todas ellas emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, se propagan a la velocidad de la luz y se pueden medir.

4.1.5 Aplicación de la Prueba

Las inspecciones termográficas deben ser llevadas a cabo por personas calificadas con un equipamiento adecuadamente calibrado y de acuerdo a una rutina preestablecida. La ruta de inspección debe ser diseñada sobre condiciones del entorno físico ambiental como la temperatura, humedad, luz solar, viento entre otras. Los resultados deben ser informados adjuntando las recomendaciones de corrección u opciones para mantener en buen estado de funcionamiento el equipo, la mayoría de equipos para realizar la inspección termográfica cuenta con sistemas de registro permanente de la toma que puede ser entregado con el informe de inspección en forma impresa (Figura 69).



Figura 69. Inspección termográfica para verificación del funcionamiento en un motor eléctrico. Tomado de: <http://us.fliike.com/Images/Products/Industrial/Thermal>

4.1.6 Equipos para inspección por Termografía

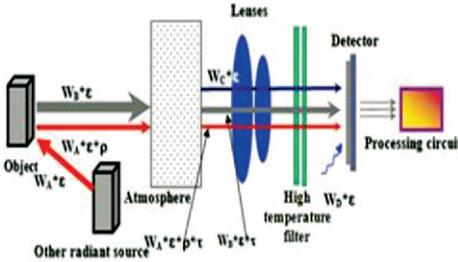


Figura 70. Diagrama de funcionamiento de una cámara termográfica básica. Tomado de: <http://www.snewetsnsc.com/Aztectermografia.html>

El equipo utilizado para la inspección termográfica es la cámara Termográfica, la cual produce una imagen en vivo (visualizada como una fotografía de la temperatura de la radiación). Las cámaras miden la temperatura de cualquier objeto o superficie de la imagen y producen una imagen con

colores que interpretan el diseño térmico con facilidad. Una imagen producida por una cámara infrarroja es llamada termografía o termograma (Figura 70).

Básicamente una cámara termográfica consta de: Lentes, Filtro, Detector o microbolómetro, Circuito de procesado de la imagen e Interfaz de usuario (pantalla, salida de vídeo, memoria, etc.)

Las cámaras termográficas que se emplean en la industria funcionan todas en la banda de infrarrojos medios (son las que detectan los llamados microbolómetros no refrigerados). Las cámaras termográficas detectan la radiación infrarroja invisible que emiten los objetos y lo transforma en una imagen dentro del espectro visible en la que la escala de colores (o grises) refleja las distintas



Figura 71. Cámara Termográfica. Tomado de: http://www.tiismarcal.com/auimages/fin_infraacam_sfd.jpg

intensidades. La intensidad de la radiación infrarroja es función de la temperatura pero no sólo de ella, influyen también las características superficiales del objeto, el color y el tipo de material (Figura 71).

4.2 ANÁLISIS DE ACEITES

4.2.1 Análisis de aceites en el mantenimiento aeronáutico

El empleo del análisis de aceites usados como procedimiento de mantenimiento tiene sus inicios en los primeros años de la década de los 40 por las compañías ferroviarias en los Estados Unidos. Incentivados en la compra de una nueva flota de locomotoras diesel, los técnicos utilizaron equipos básicos de espectrografía y pruebas físicas para supervisar los motores de estas locomotoras; a medida que las locomotoras de vapor cedieron su posición ante las locomotoras diesel, las prácticas de análisis de aceites para ferrocarriles crecieron y hacia los años 80 el análisis de aceites ya era parte fundamental del mantenimiento por condición en la mayoría de los ferrocarriles en Norteamérica.

Debido al éxito del análisis de aceites en la industria de ferrocarriles, la marina de guerra Norteamericana a mediados de los años cincuenta empezó a utilizar técnicas de espectrometría para supervisar los motores jet en sus aviones. Por el mismo momento, el fabricante de turbinas Rolls Royce también experimentaba con el análisis de aceites para sus turbinas jet. El análisis de aceite comenzó entonces a expandirse como programa de mantenimiento y durante los años 50 e inicios de los 60, la Fuerza Aérea y el Ejército de los estados unidos desarrollaron sus propios programas.

El análisis del aceite usado es comparable con un análisis médico humano de análisis de sangre. Así como la sangre, el aceite lubricante usado contiene gran cantidad de información sobre el medio en el cual circula. El desgaste de piezas metálicas, por ejemplo, produce muchas partículas microscópicas que son llevadas por el lubricante. Estas partículas de metal pueden dar información sobre los elementos de la máquina que se están desgastando y se pueden detectar por métodos como la espectrofotometría de absorción atómica. La detección de partículas más grandes se puede hacer usando microscopía óptica o electrónica, o ferrografía. De igual manera, el análisis de aceites permite determinar la condición del mismo en cuanto a oxidación, acidez, niveles de humedad y viscosidad entre otros.

El análisis de aceites y el análisis de desgaste de partículas se efectúan mediante la combinación de la espectrofotometría de absorción atómica, el análisis ferrográfico y el análisis de filtros, cuando hacen parte de un programa de aseguramiento de calidad podrán detectar modos anormales de desgaste en los

sistemas aeronáuticos mucho antes de que este desgaste pueda terminar en una falla grave. El programa de análisis puede indicar la cercanía de falla de algunos componentes, permitiendo planear su mantenimiento o cambio. Las paradas de la flota se evitan por fallas críticas imprevistas. Se pueden detectar modos específicos de desgaste de los componentes y revelar errores de instalación o desalineamiento de componentes. En general el programa permitirá la reducción de costos en el equipo de mantenimiento y un aumento en la disponibilidad y confiabilidad de las aeronaves. Dentro de las ventajas del análisis de aceites y del análisis de desgaste de partículas como parte de un programa de mantenimiento aeronáutico se puede mencionar:

- Previene la parada en vuelo de motores (IFSD's)⁵
- Reducción en el mantenimiento no programado
- Aumento de disponibilidad del equipo
- Reducción en costos de mantenimiento
- Minimización de los errores de instalación

4.2.2 Espectrofotometría de absorción atómica

La espectrofotometría es el método de análisis óptico más usado en las investigaciones biológicas. El espectrofotómetro es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto y una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia. Todas las sustancias pueden absorber energía radiante, aun el vidrio que parece ser completamente transparente absorbe longitud de ondas que pertenecen al espectro visible; el agua absorbe fuertemente en la región del infrarrojo. La absorción de las radiaciones ultravioleta, visibles e infrarrojas depende de la estructura de las moléculas, y es característica para cada sustancia química. Cuando la luz atraviesa una sustancia, parte de la energía es absorbida; la energía radiante no puede producir ningún efecto sin ser absorbida. El color de las sustancias se debe a que éstas absorben ciertas longitudes de onda de la luz blanca que incide sobre ellas y solo dejan pasar a nuestros ojos aquellas longitudes de onda no absorbidas (Figura 72).

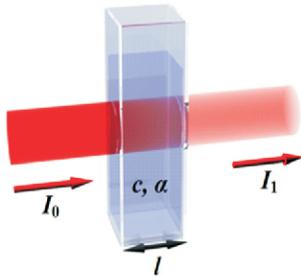


Figura 72. Espectrofotómetro de Absorción Atómica. Tomado de: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Atomic_absorption_spectroscopy.jpg

4.2.3 Principios básicos de la Espectrofotometría de Absorción Atómica

La espectrofotometría proveniente del sol, es decir la radiación ultravioleta-

⁴ Efecto Compton, difusión de fotones debida a las interacciones entre la radiación electromagnética y la materia. Este efecto fue descubierto por el físico estadounidense Arthur Holly Compton en 1922, durante su estudio de la difusión de los rayos X por el grafito.



$$T = \frac{I}{I_0} = 10^{-\alpha \ell} = 10^{-\epsilon \ell c}$$

Figura 73. Esquemización gráfica de la Ley de Beer-Lambert. Tomado de: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Beer_lambert.png

visible usa haces del espectro electromagnético y radiaciones del campo UV⁶ de 80 a 400 nm.⁷, principalmente de 200 a 400 nm., y usa haces de luz visible de 400 a 800 nm., por lo que es de gran utilidad para caracterizar las soluciones en la región ultravioleta y visible del espectro. Al campo de luz UV de 200 a 400 nm., se le conoce también como rango de UV cercano, la espectrofotometría visible solamente usa el rango del campo electromagnético de la luz visible, de 400 a 800 nm. A este tipo de técnicas se conoce en conjunto como técnicas físico-bioquímicas, en relación a la espectrofotometría se tiene una ley muy importante, la ecuación de Beer-Lambert (Figura 73).

Donde:

I = intensidad de luz que sale de la cubeta y que va a llegar a la celda fotoeléctrica o detector donde es captada, medida y transformada en unidades de absorbancia o de densidad óptica.

I_0 = intensidad incidente

ϵ = capacidad de la muestra para la captación del haz del campo electromagnético

l = longitud de la cubeta de espectrofotometría que recorre la radiación

c = concentración de la muestra ya ubicada en la cubeta

La ecuación simplificada de la ley de Beer-Lambert comprende a la mínima ecuación que relaciona la concentración, la absorbancia de la muestra y el factor de calibración. El factor de calibración relaciona la concentración y la absorbancia de los estándares.

Como uso práctico de la espectroscopia de absorción atómica en la química analítica la técnica es usada para determinar la concentración de un elemento metálico en particular de una muestra preparada, mediante la espectroscopia de absorción atómica se puede llegar a analizar la concentración hasta de 62 diversos metales en una solución.

La técnica de inspección, hace uso de la espectroscopia de absorción atómica para determinar la concentración de un elemento analizado en una muestra como se mencionó anteriormente, esto es posible dado que los electrones de los átomos pueden ser instantáneamente promovidos a niveles orbitarios más altos o de mayor energía absorbiendo una cantidad de energía del sistema, para este

caso de la luz a una longitud de onda dada. Esta cantidad de energía o de longitud de onda es específica para cada transición de electrones para cada elemento metálico en particular y a cada longitud de onda corresponde generalmente solamente un elemento, esto da a la técnica su selectividad elemental, que permite identificar la concentración de un determinado elemento en la muestra, dado que la cantidad de energía que entra al sistema se conoce a través de la potencia de la luz incidente y la cantidad residual de energía se mide en el detector, mediante la ley de Beer-Lambert se puede calcular cuántas de estas transiciones ocurrieron y se consigue así una señal proporcional a la concentración del elemento que es medido.

4.2.4 Definiciones

• Excitación atómica

El átomo está constituido por un núcleo rodeado por electrones, cada elemento tiene un número específico de electrones que junto con el núcleo da una estructura orbital que es única para cada elemento. Los electrones ocupan posiciones orbitales en una forma predecible y ordenada. La configuración más estable y de más bajo contenido energético es conocida como “estado fundamental”. Si a un átomo se le aplica energía, ésta será absorbida por él e inducirá que el electrón exterior sea promovido a un orbital menos estable o “estado excitable” como este estado es inestable, el átomo tiende inmediata y espontáneamente a retornar a su estado fundamental, haciendo que el electrón regrese a su orbital fundamental o estable y en ese tránsito emite energía radiante equivalente a la cantidad de energía absorbida en el proceso de excitación (Figura 74).

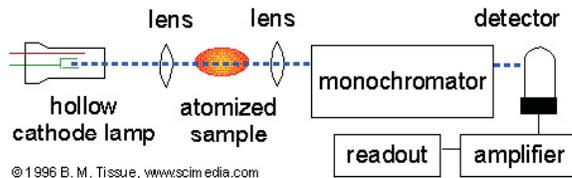


Figura 74. Principio de Funcionamiento de un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica.
Tomado de: <http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/spec/atomic/graphics/aa-expt.gif>

• Absorción Atómica

La absorción atómica ocurre cuando una luz de una longitud de onda determinada incide sobre un átomo libre, haciendo que éste absorba energía y pase al estado excitado. La propiedad de un átomo de absorber una luz de longitud de onda específica es utilizada en la espectrofotometría de absorción atómica dado que al retornar este átomo a su estado no excitado, libera la energía absorbida en forma de energía radiante a determinada longitud de onda característica a la estructura electrónica del material. La longitud de onda de la luz emitida así es una propiedad específica de cada elemento.

- **Transmitancia**

Es la razón de la intensidad final medida en el sensor respecto de la intensidad inicial o incidente proporcionada por la luz. La transmisión es la indicación de la fracción de luz inicial que pasa a través de la llama para incidir en el detector. El porcentaje de transmisión es simplemente la transmitancia expresada en términos de porcentaje.

- **Absorbancia**

El porcentaje de absorción es el complemento del porcentaje de transmisión y define el porcentaje de luz inicial que es absorbido en la llama. El termino absorbancia, es una expresión puramente matemática y es la más conveniente para caracterizar la absorción de luz en la espectrofotometría de absorción atómica, pues ésta característica de un elemento guarda una relación lineal con la concentración y es definida mediante la ley de Beer-Lambert.

4.2.5 Aplicación de la prueba

Para analizar una muestra en orden de cuantificar sus componentes atómicos constituyentes, ésta tiene que ser atomizada y atravesada por un haz de luz incidente, la luz transmitida a través de la muestra finalmente es medida por el detector y mediante la ley de Beer-Lambert cuantificados sus componentes, en este proceso y con el fin de reducir los efectos de emisión del atomizador (radiación de cuerpo negro) o del medio ambiente se emplea normalmente entre el atomizador y el detector un espectrómetro que permite corregir estos efectos. El atomizador entonces es el mecanismo por el cual la muestra en análisis se separa en átomos sobre los cuales incidirá el haz de luz generado por el equipo, de este modo cada átomo absorberá la energía incidente desde el haz de luz y de acuerdo a los cambios de estado de los electrones excitados, permitirán la transmisión de cierta cantidad de luz incidente que finalmente es medida en el detector y así caracterizado el elemento presente en la muestra. En vista de que el atomizador (gas o sólido) igualmente absorbe cierta cantidad de luz afectando las mediciones, con el uso del espectrofotómetro se filtra la incidencia ocasionada por el mismo puesto que se conoce la naturaleza y concentración de este.



Figura 76. Espectrofotómetro de Absorción Atómica de llama. Tomado de: <http://elchem.kaist.ac.kr/vi/chem-ed/spec/atomic/graphics/aa.jpg>

Para realizar la atomización de la muestra se emplean comúnmente atomizadores de llama (Figura 75) aunque también se encuentran atomizadores de horno de grafito (Figura 76) y de plasma.



Figura 76. Espectrofotómetro de Absorción Atómica de horno de grafito.
Tomado de: <http://elchem.kaist.ac.kr/Vt/chem-ed/spec/atomic/graphics/gfaa.jpg>

El atomizador de llama emplea una llama larga y delgada generalmente de unos 10 centímetros que puede ser controlada ajustando el flujo de la mezcla del combustible en el equipo, es a través del eje mas largo de esta llama que se hace incidir el haz de luz que posteriormente incidirá sobre detector. Para el análisis de muestras en

estado líquido, ésta se lleva a gas atómico mediante los siguientes pasos:

- Disolución: El solvente líquido es evaporado quedando solo restos de la muestra en forma sólida.
- Vaporización - La muestra sólida se evapora transformándose en gas.
- Atomización - los compuestos que componen la muestra son separados en átomos libres.

Como fuentes de radiación o luz incidente normalmente se emplean lámparas de cátodo o láser de diodos, las lámparas de cátodo son la fuente más común de radiación en espectroscopia de absorción atómica, dentro de la lámpara que se encuentra llena de gas argón o neón se ubica un cátodo cilíndrico del metal para el cual se va a excitar la muestra y un ánodo. Al hacer circular un alto voltaje entre el ánodo y el cátodo las partículas del gas interior se ionizan adquiriendo suficiente energía para expulsar átomos del cátodo metálico que en su estado excitado emiten luz con la frecuencia característica al metal del cátodo y que irán a incidir sobre la muestra en análisis, aunque por lo general se requiere una lámpara por cada metal en estudio, se pueden encontrar lámparas de cátodo modernas que permiten analizar varios metales.



5. BIBLIOGRAFIA

ASTM E2104 - 09 Standard Practice for Radiographic Examination of Advanced Aero and Turbine Materials and Components.

BERRY, FC. ASNT Recommended Practice for Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification (SNT-TC-1A) and Its Use. 1977. ASTM. ID. STP27016S.

MAYAGOITIA, José de Jesús. Tecnología e ingeniería de materiales. 1ª Edición. McGraw Hill. 2004. ISBN 9701046692.

PERO-SANZ ELORZ, José Antonio. Ciencia e ingeniería de materiales. 5ª Edición. CIE Inversiones Editoriales Dossat 2000. 2006. ISBN 8496437442.

SMITH, W. Fundamentos de ingeniería y ciencias de materiales. 4ª Edición. McGraw Hill. 2006. ISBN 9789701056387.

VAN VLACK, Lawrence H. Materiales para ingeniería. 1967. CECSA. México CECSA. ISBN 9682601312.

DIRECCIONES ELECTRÓNICAS

AMPERIS. Equipos de medida y mantenimiento eléctrico, <http://www.amperis.com>

TEXTOS CIENTÍFICOS. Recopilación de información y trabajos sobre diversos temas relacionados con la química, física, informática, ecología y otras áreas de ciencia, <http://www.textoscientificos.com>

VOLIUM. Portal del Material Eléctrico, <http://www.voltium.es>

