

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA**  
**“ANTONIO NARRO”**

**DIVISION DE INGENIERIA**



**Métodos de Pruebas No Destructivas**

Por:

**ALVARO MORELOS MORENO**

**MONOGRAFIA**

Presentada como Requisito Parcial para obtener el Título de:

**INGENIERO MECANICO AGRICOLA**

Buenavista Saltillo, Coahuila México.

Diciembre del 2000.

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISION DE INGENIERIA

**“Métodos de Pruebas No Destructivas”**

ALVARO MORELOS MORENO

MONOGRAFIA

Que somete a consideración del H. Jurado examinador como Requisito  
Parcial para obtener el Título de **Ingeniero Mecánico Agrícola.**

Aprobada:

---

**M.C. Héctor Uriel Serna Fernández**

Presidente del Jurado

---

**Dr. Aguinaldo E. García Santos**

Sinodal

---

**M.C. J. Gabriel Mendoza Santillán**

Sinodal

---

**M. C. Jesús R. Valenzuela García**

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista Saltillo, Coahuila México.

Diciembre del 2000.

## INDICE DE CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS .....	i(7)
DEDICATORIAS .....	ii(9)
I.- INTRODUCCION .....	11
II.- PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS .....	14
2.1.- Antecedentes .....	14
2.2.- Definición .....	18
2.3.- Importancia .....	20
2.4.- Limitaciones .....	21
2.5.- Equipo .....	21
2.6.- Aplicación .....	22
III.- ANALISIS DE ACEITES .....	24
3.1.- Antecedentes .....	24
3.2.- Definición .....	26
3.3.- Tipos de lubricación .....	27
3.4.- Clasificación de los aceites lubricantes .....	28
3.5.- Propiedades de los aceites lubricantes .....	31
3.6.- Funciones del aceite lubricante .....	33
3.7.- Contaminación del aceite lubricante .....	33
3.8.- Degradación del aceite lubricante .....	36
3.9.- Aditivos de los aceites lubricantes .....	37
3.10.- Fallas detectadas mediante el análisis de aceites .....	39
3.11.- Equipo .....	40
3.12.- Procedimiento del análisis de aceites .....	40
3.13.- Aplicación .....	48
IV.- TERMOGRAFIA INFRARROJA .....	49
4.1.- Antecedentes .....	49
4.2.- Definición .....	51
4.3.- Ventajas .....	54

	Página
4.4.- Limitaciones .....	54
4.5.- Equipo .....	55
4.6.- Aplicaciones .....	55
V.- INSPECCION VISUAL .....	59
5.1.- Antecedentes .....	59
5.2.- Definición .....	61
5.3.- Ventajas .....	62
5.4.- Limitaciones .....	63
5.5.- Factores que afectan el proceso de inspección visual .....	63
5.6.- Equipo .....	64
5.7.- Procedimiento de inspección visual .....	65
5.8.- Aplicación .....	66
VI.- LIQUIDOS PENETRANTES .....	67
6.1.- Antecedentes .....	67
6.2.- Definición .....	67
6.3.- Propiedades de los líquidos penetrantes.....	69
6.4.- Ventajas.....	70
6.5.- Limitaciones.....	71
6.6.- Equipo.....	71
6.7.- Procedimiento de líquidos penetrantes .....	72
6.8.- Aplicación .....	73
VII.- PARTICULAS MAGNETICAS .....	74
7.1.- Antecedentes .....	74
7.2.- Definición .....	75
7.3.- Propiedades de las partículas magnéticas.....	77
7.4.- Ventajas.....	78
7.5.- Limitaciones.....	78
7.6.- Equipo.....	79
7.7.- Procedimiento de partículas magnéticas .....	79
7.8.- Aplicación .....	81

	Página
VIII.- CORRIENTES DE REMOLINO .....	82
8.1.- Antecedentes .....	82
8.2.- Definición .....	84
8.3.- Conceptos relacionados con el magnetismo .....	86
8.4.- Factores que afectan el flujo de corriente .....	87
8.5.- Ventajas .....	89
8.6.- Limitaciones .....	90
8.7.- Procedimiento y equipo .....	90
8.8.- Aplicación .....	91
IX.- EMISION ACUSTICA .....	93
9.1.- Antecedentes .....	93
9.2.- Definición .....	97
9.3.- Conceptos relacionados con la emisión acústica .....	98
9.4.- Ventajas .....	99
9.5.- Limitaciones .....	100
9.6.- Equipo .....	101
9.7.- Aplicación .....	101
X.- ULTRASONIDO .....	103
10.1.- Antecedentes .....	103
10.2.- Definición .....	104
10.3.- Ventajas .....	106
10.4.- Limitaciones .....	107
10.5.- Equipo .....	108
10.6.- Aplicación .....	108
XI.- RADIOGRAFIA .....	112
11.1.- Antecedentes .....	112
11.2.- Definición .....	115
11.3.- Conceptos relacionados con la radiografía .....	116
11.4.- Radiación absorción .....	118
11.5.- Ventajas .....	120

	Página
11.6.- Limitaciones .....	120
11.7.- Equipo .....	122
11.8.- Aplicación .....	122
XII.- CONCLUSIONES .....	124
XIII.- BIBLIOGRAFIA .....	126

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios Nuestro Señor**: Por guiarme por el buen camino y darme fuerzas para vencer obstáculos y adversidades, y así seguir adelante.

A **mis padres**: Por el gran esfuerzo que han hecho al apoyarme incondicionalmente, por los sacrificios y desvelos que hicieron por mí, por el amor y cariño que me brindaron, por la fe que depositaron en mí, por sus recomendaciones y ánimos para continuar estudiando y superarme tanto moral como intelectualmente, por todo eso que formó parte fundamental en mis estudios.

A la **Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”**: Por mantener sus puertas abiertas para permitir que se formen agrónomos y darme la oportunidad de realizar mis estudios profesionales.

A **Lucia Morelos Moreno**: Por todo el apoyo y cariño que siempre tuvo hacia mí y hacia los suyos, desinteresadamente siempre estuvo ahí para corresponder con sus atenciones a toda su familia.

A **mis hermanos**: Por el apoyo, consejos y atenciones que siempre recibí por parte de ellos, que indudablemente me dio fuerzas para superarme.

A la **C.P. Dora Alicia Rodríguez Trejo**: Por el gran apoyo que siempre me brindó, por los valores y consejos que me inculcó, por sus palabras de aliento que me dieron fortaleza para conquistar un paso más en la interminable carrera del saber, por la gran amistad que cultivamos juntos, por esos momentos difíciles que logré superar gracias a su compañía, por toda esa sinceridad y nobleza que reinan en su corazón y que la convierten en una mujer excepcional, por saber que siempre contaré con ella.

A la **Lic. Graciela del Bosque de La Peña**, y a la **Sra. Oralia Hernández Torres**: Personas muy buenas que siempre me ofrecieron todo su apoyo durante mi estancia en esta Universidad.

A la **Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**: Por permitirme investigar en su acervo bibliográfico, principalmente a el T.L.Q. Ramiro Oropeza, Arq. Amado del Angel, Ing. Jorge Dávila, Delia Ramos y Karla Navarro.

A el **M.C. Héctor U. Serna Fernández**: Por su apoyo brindado y por sus recomendaciones en elaboración del presente trabajo.

A el **Dr. Aguinaldo E. García Santos**: Por sus recomendaciones acertadas y bien fundamentadas en la ejecución del presente escrito.

A el **M.C. Gabriel Mendoza Santillán**, a el **M.C. Jesús R. Valenzuela García** y a la **M.C. Blanca Elizabeth de La Peña Casas**: Por que siempre me brindaron su apoyo durante mi estancia en esta universidad.

## DEDICATORIAS

A mis padres; **Miguel Morelos Segura y Herminia Moreno Cortés**: Les dedico de todo corazón el presente trabajo, ya que gracias a sus atenciones, gran esfuerzo, dedicación y comprensión, he concluido satisfactoriamente mis estudios profesionales.

A mis hermanos; **Lucia, Estela, Rossio, Noemí, Hortensia, Yolanda, Carlos, Teles, Juan y Julio**: Por que siempre estuvieron ahí para motivarme, apoyarme y alentarme para continuar estudiando.

A mis sobrinos; **Flor, Viviana, Susana, Herminia, Marco Antonio, César, Erik, Fausto, Eder César, Julio Abraham, Abel y Edgar Enrique**: Por que debo ser un ejemplo para ellos, para que continúen formándose en sus escuelas.

A la **C.P. Dora Alicia Rodríguez Trejo**: Es para mi un honor el dedicarle sinceramente el presente trabajo, por ser partícipe en mi formación profesional, por brindarme su apoyo y su aliento, para poder forjarme como profesionista y seguir conquistando horizontes del conocimiento.

A los **maestros** de todos los estratos escolares, que han participado en mi formación profesional al instruirme en el mundo del saber, y a los que de alguna forma me han invitado a seguir adelante.

A mis compañeros y amigos; **Juan Luis Reyes Mestiza** (Mazatepec Pue.), **Alfredo Martínez Rivera** (Gto.), **Gregorio Martínez Zárata** (Cd. Acuña Coah.), **Sergio Santos Sánchez** (Sombrerete Zac.), **Reynaldo Velázquez Mendieta** (San Luis de la Paz Gto.), **Edgar Robles Jaramillo** (Ecatepec Méx.), **Francisco Corona Castuera** (Tehuacán Pue.), **Oscar Carlos Martínez** (Cuencamé Dgo.), **Elios Coyote Ortíz** (Tepalcingo Mor.), **Roberto Azorín Delgado** (Tepalcingo Mor.), **Francisco Solorzano Andrade** (Uruapan Mich.), **Miguel Sánchez Díaz** (Uruapan Mich.), **Yahir de Jesús Nava Urbina** (Nazas Dgo.), **Jorge Eduardo Ramírez Luna** (Galeana N. L.), **Emiliano Escamilla Pérez** (Ixmiquilpan Hgo.), **Miguel Angel Gutierrez Maltus** (Nazas Dgo.) y **Pedro Delgado Flores** (Irapuato Gto.): Porque compartí con ellos clases en diferentes estratos escolares y porque juntos convivimos alegrías y sufrimientos, y que de alguna forma participaron en mi formación profesional.

## I.- INTRODUCCION

Los materiales, productos y equipos que fallan para lograr sus requerimientos de diseño o vida proyectada debido a los defectos no detectados, pueden requerir reparaciones caras o ser reemplazados muy pronto. Tales imperfecciones también pueden ser la causa de condiciones inseguras o fallas catastróficas, y de la pérdida de ingreso debido a los paros de planta no programados.

Las condiciones inseguras son aquellas situaciones en las que se desconoce la condición y comportamiento de las estructuras y componentes, por lo que con pequeñas variaciones en la velocidad o carga de trabajo, pueden sufrir fracturas poniendo en peligro la integridad del personal operario. Un nivel catastrófico de falla es el estado que han alcanzado los materiales y componentes debido al desarrollo de discontinuidades y defectos presentes que no se detectaron a tiempo para corregirse y tomar las decisiones sobre el ajuste de capacidad de carga y velocidad de trabajo.

Para detectar tales anomalías o defectos en los materiales, se emplean diversos métodos que aplican diferentes principios y estándares de operación. Las evaluaciones para determinar la integridad y condición de los materiales, equipos y componentes estructurales, se clasifican en cinco categorías; (1) pruebas mecánicas, (2) pruebas de propiedades térmicas, (3) pruebas de propiedades eléctricas, (4) pruebas de resistencia a la corrosión, radiación y deterioro biológico, y (5) pruebas no destructivas.

Las pruebas mecánicas realizadas experimentalmente o por medio de un modelo matemático, permiten especificar que materiales pueden ser empleados sin riesgo. Las más comunes son la prueba de compresión y tensión estática, de flexión y de corte estático, ductilidad, dureza (Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop, Microdureza), impacto (Charpy e Izod), resistencia a la fractura, deslizamiento o desgarré, y fatiga. Las pruebas de propiedades térmicas incluyen la conductividad térmica, calor específico, expansión térmica, termofluencia y temperatura de transición. Las mediciones de propiedades eléctricas incluyen la conductividad eléctrica y la resistividad, entre otras.

Las pruebas de los materiales consisten en la medición de las características y comportamientos de sustancias tales como metales, cerámicos o plásticos bajo diversas condiciones. Los datos obtenidos pueden usarse para especificar la conveniencia de materiales. Pueden ser evaluados modelos complejos o a pequeña escala de máquinas o estructuras, los investigadores pueden construir modelos matemáticos que utilizan materiales con características y comportamientos conocidos para predecir las capacidades de la estructura. De acuerdo a la funcionalidad posterior de la muestra de prueba, las evaluaciones de los materiales se clasifican en pruebas destructivas y pruebas no destructivas.

Si se quisiera conocer la integridad de un vaso de vidrio, bastaría con golpearlo con un martillo y si no se destroza indica que aun puede usarse. Sin embargo este proceso podría agrietar al vaso en una proporción pequeña o grande, dependiendo de la fuerza repetitiva del golpeo, devolviéndolo prácticamente inservible, por lo que se clasificaría como una prueba destructiva. Otro ejemplo de prueba destructiva consiste en tomar una tira de acero y ponerla bajo tensión sujeta en sus extremos a una máquina universal, hasta que se desprenda o rompa. Esto nos diría que tan resistente era el acero, pero ya no sería capaz de utilizarse nuevamente.

Las evaluaciones destructivas, son aquellos ensayos en los cuales durante el proceso de recolección de datos la muestra es destruida, es decir, tal muestra ya no puede incorporarse al elemento o componente del que se extrajo. Este tipo de pruebas solo es aceptable cuando existe una cantidad abundante de materiales o si solamente se requiere conocer las propiedades de los materiales. Generalmente se consideran como pruebas destructivas todas las pruebas mecánicas.

Las pruebas no destructivas son aquellos procesos de evaluación aplicados a los componentes y estructuras para conocer su integridad sin destruir ni alterar en forma permanente sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, extendiendo de esta manera su serviceabilidad. Este tipo de pruebas es ideal para aquellos materiales que son costosos o difíciles de fabricar, o que han sido transformados en productos acabados o semiacabados.

En la producción híbrida durante los procesos de manufactura, intervienen una serie de parámetros, tales como la rugosidad del sustrato, ancho del trayecto de

conductancia, alteraciones en el espesor de capa y secciones de corte, entre otros. La precisión en la medición de dichos parámetros determina la calidad y confiabilidad de los productos y artículos obtenidos, y este propósito se logra mediante la aplicación de ensayos no destructivos, los cuales se llevan a cabo siguiendo un patrón establecido.

## **II.- PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS**

### **2.1.- ANTECEDENTES**

Hace cien años aproximadamente, con el descubrimiento de los rayos X por el físico Alemán Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) inmediatamente se empezaron a efectuar examinaciones en placas fotográficas, algo similar a las aplicaciones actuales de las pruebas no destructivas ([www.dgzfp.de](http://www.dgzfp.de)).

Las evaluaciones no destructivas han sido practicadas por muchas décadas, la instrumentación inició su desarrollo con los avances tecnológicos a partir de la segunda guerra mundial. Inicialmente, su propósito fue la detección de defectos como una parte del diseño de una vida segura, lo cual representaba una causa para remover el componente del servicio (Stanley, 1995).

A partir de 1970, el continuo desarrollo de la tecnología, en particular su habilidad para detectar pequeñas imperfecciones, llevó a una situación de insatisfacción donde gran cantidad de partes eran rechazadas, aun cuando la probabilidad de falla no había sido cambiada. Sin embargo surgió la disciplina de los mecanismos de fractura, los cuales no tenían la capacidad de predecir si una grieta de un tamaño dado fallase bajo una carga particular al conocer la propiedad del material de fractura frágil.

Otras leyes fueron desarrolladas para predecir la tasa de crecimiento de grietas bajo cargas cíclicas (fatiga), estas herramientas constituyeron las bases para la nueva filosofía de diseño por falla segura o daño tolerante. Componentes con defectos conocidos continuarían en servicio, asegurando que aquellos defectos establecidos no crecerían a una dimensión crítica, produciendo una falla mayor o catastrófica (Hands, 1999).

La detección no fue suficiente, surgió la necesidad de obtener información cuantitativa acerca del tamaño de las imperfecciones para servir de entrada a predicciones basadas en fracturas mecánicas de vida permanente, lo concerniente a esto

fue de interés principalmente en las industrias de la defensa y de energía nuclear. Esto condujo a la creación de programas de investigación en todo el mundo y el surgimiento de la evaluación cuantitativa no destructiva como una nueva disciplina.

Las tecnologías de las evaluaciones no destructivas están constantemente siendo mejoradas y perfeccionadas, y nuevos métodos se van desarrollando, particularmente en el campo de la investigación de materiales compuestos y sus aplicaciones. Los adelantos en el uso de láser y tecnologías de imagen tales como el vídeo, holografía y termografía, han hecho de las pruebas no destructivas de no contacto, más viables en muchas situaciones.

Las fibras ópticas y nuevos materiales piezoeléctricos permiten la creación de estructuras y materiales inteligentes, los cuales además de monitorear por si mismos, responden a su medio ambiente. Los avances en computación han permitido el uso de técnicas para procesar las señales y sistemas expertos para mejorar la calidad de la información obtenida, usando métodos no destructivos tradicionales y nuevos (NDTA, 1996). Hoy ningún abastecimiento de gas, despegue de una aeroplano o tiempo de operación de una estación de energía nuclear, serían imaginables sin el control previo mediante pruebas no destructivas ([www.dgzfp.de](http://www.dgzfp.de)).

Debido a la gran importancia de las evaluaciones no destructivas en la vida cotidiana de la sociedad, las naciones más desarrolladas como lo son Estados Unidos, Japón, Canadá y los países Europeos, han creado centros de investigación y asociaciones que se especializan en la materia. La función de estos centros de investigación consiste en desarrollar nuevos métodos de ensayos no destructivos, crear las normas y estándares, acreditar personal para la ejecución de estas pruebas, la caracterización de materiales y trabajar en proyectos de desarrollo e investigación en cooperación con universidades, industrias y con el gobierno.

El surgimiento de este tipo de sociedades fue gracias al descubrimiento de los rayos X en Alemania a finales del siglo XIX, de esta manera el 1 de Septiembre de 1933 fue fundada la Sociedad Alemana de Pruebas No Destructivas (DGZfP), considerada como la más antigua en el mundo de esta naturaleza, y posteriormente otras asociaciones en otros países.

Durante 1950 y 1960, las pruebas no destructivas experimentaron un crecimiento

dinámico y se empezaron a organizar conferencias y simposiums internacionales sobre ensayos no destructivos. La primera conferencia se llevó a cabo en Bruselas Bélgica en 1955, consecuentemente se realizaron en Tokio Japón (3a) cinco años más tarde, en Montreal Canadá (5a) en 1967 y en Hannover Alemania (6a) en 1970, entre muchas otras ([www.csndt.org](http://www.csndt.org) y [www.dgzfp.de](http://www.dgzfp.de)).

En 1998, se fundó la Federación Europea para las Pruebas No Destructivas en Copenhague Dinamarca, de la cual son miembros todas las sociedades de los países Europeos incluyendo a Japón, La India e Israel. Además de participar en eventos internacionales, estas asociaciones organizan La Conferencia Europea sobre Pruebas No Destructivas, considerada como el máximo evento sobre este rubro en Europa.

Actualmente existen centros de investigación en pruebas no destructivas y van surgiendo otros que se especializan en algún método en particular. Algunas asociaciones son las siguientes:

- Organización Internacional de Estandarización (ISO), Ginebra Suiza.
- Sociedad Alemana de Pruebas No Destructivas (DGZfP), Berlín Alemania.
- Sociedad Americana de Pruebas No Destructivas (ASNT), Columbus Ohio.
- Federación Europea de Pruebas No Destructivas (EFNDT), Copenhague Dinamarca.
- Sociedad Canadiense de Pruebas No Destructivas (CSNDT), Montreal Canadá.
- Instituto Británico de Pruebas No Destructivas (BINDT), Northampton Inglaterra.
- Confederación Francesa de Ensayos No Destructivos (COFREND), París Francia.
- Sociedad Japonesa de Pruebas No Destructivas (JSNDI), Tokio Japón.
- Sociedad China de Pruebas No Destructivas (ChSNDT), Pekín China.
- Sociedad Sueca de Pruebas No Destructivas (FOP), Estocolmo Suecia.
- Comité Finlandés de Pruebas No Destructivas (TKK), Helsinki Finlandia.
- Sociedad Normanda de Pruebas No Destructivas (NSNDT), Billingstad Noruega.
- Sociedad Holandesa de Pruebas No Destructivas (KINT), BL Herkingen Holanda.
- Asociación Belga de Pruebas No Destructivas (BANT), Angleur Bélgica.
- Instituto Irlandés de Inspección de Ingeniería y Soldadura (IIWEI), Dublín Irlanda.
- Sociedad Danesa de Pruebas No Destructivas (DSNT), Broendby Dinamarca.
- Asociación Italiana de Pruebas No Destructivas (AIPnD), Brescia Italia.

- Sociedad Helénica de Pruebas No Destructivas (HSNT), Atenas Grecia.
- Asociación Española de Pruebas No Destructivas (AEND), Madrid España.
- Sociedad Checa de Pruebas No Destructivas (CNDT), Praga República Checa.
- Organización Húngara de Pruebas No Destructivas (HONDT), Budapest Hungría.
- Asociación Rumana de Pruebas No Destructivas (ARoEND), Bucarest Rumania.
- Sociedad Austríaca de Pruebas No Destructivas (ÖGZfP), Viena Austria.
- Sociedad Suiza de Pruebas No Destructivas (SGZP), Dübendorf Suiza.
- Sociedad Polaca de Pruebas No Destructivas y Técnicas de Diagnóstico (SIMP), Varsovia Polonia.
- Sociedad Polaca de Pruebas No Destructivas (PTBN), Chorzow-Batory Polonia.
- Sociedad Búlgara de Pruebas No Destructivas (BSNT), Sofía Bulgaria.
- Sociedad Croata de Pruebas No Destructivas (CrSNDT), Zagreb Croacia.
- Sociedad Eslovena de Pruebas No Destructivas (SSNDT), Ljubljana Eslovenia.
- Sociedad Eslovaca de Pruebas No Destructivas (SSNDT), Bratislava República de Eslovaquia.
- Sociedad Rusa de Pruebas No Destructivas y Técnicas de Diagnóstico (RSNTTD), Moscú Rusia.
- Asociación Bielorrusa de Pruebas No Destructivas y Técnicas de Diagnóstico (BANK), Minsk Rusia.
- Sociedad Ucraniana de Pruebas No Destructivas (USNDT), Kiev Ucrania.
- Sociedad Nacional Israelí de Pruebas No Destructivas (ISRANDT), Hashiva Israel.
- Sociedad Hindú de Pruebas No Destructivas (ISNT), Madras India.
- Instituto Fraunhofer de Pruebas No Destructivas (IZfP), Saarbrücken Alemania.
- Centro de Pruebas No Destructivas de la Universidad Estatal de Stuttgart (MPA), Stuttgart Alemania.
- Centro de Pruebas No Destructivas (NDTC), Harwell Inglaterra.
- Centro de Pruebas No Destructivas de la Universidad Estatal de Iowa (CNDE), Ames Iowa.
- Instituto de Pruebas No Destructivas de Canadá (NDEIC), Ontario Canadá.
- Centro de Análisis de la Información de Pruebas No Destructivas (NTIAC), San Antonio Texas.

- Asociación del Manejo de Pruebas No Destructivas (NTMA).
- Instituto Federal de Pruebas e Investigación de Materiales (BAM), Berlín Alemania.
- Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), Philadelphia Pennsylvania.
- Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), New York N. Y.
- Sociedad Científica de Ingeniería Mecánica (GTE), Budapest Hungría.
- Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), Estados Unidos.
- Instituto Americano del Petróleo (API), Estados Unidos.
- Asociación Alemana de Sociedades Técnicas y Científicas (DVT), Alemania.
- Sociedad Americana de Soldadura (AWS), Estados Unidos.
- Comité de Pruebas No Destructivas en Ingeniería Civil, Alemania.
- Cuerpo Alemán de Acreditación (TGA), Alemania.
- Centro para la Información Tecnológica (FIZ), Berlín Alemania.
- Grupo Europeo de Trabajo sobre Emisión Acústica (EWGAE).
- Asociación Francesa de Estándares (AFNOR), Francia.
- Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), Saltillo Coahuila.
- Centro de Mediciones Dinámicas y Vibraciones, ITESM Monterrey N. L.
- Sociedad Internacional de Ingeniería Optica (SPIE).
- Asociación de Ferrocarrileros Americanos (AAR), Washington D. C.
- Sociedad de Industrias de Plásticos (SPI), New York N. Y.
- Departamento de Transportación de Estados Unidos (DOT).
- Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC).
- Asociación de Gas Comprimido (CGA).
- Ejecutivo de Salud y Seguridad de Reino Unido (HSE).

## **2.2.- DEFINICION**

Pruebas no destructivas, es el nombre colectivo dado a los procesos de evaluación aplicados a los componentes y estructuras para conocer su integridad (Hands, 1999). Es un término descriptivo usado en la examinación de materiales y equipos, sin cambiar o destruir su utilidad (NDTA, 1996).

Es uno de los métodos más efectivos de supervisión técnica para detectar defectos latentes en las partes y estructuras de un componente con anterioridad y durante su operación, para predecir sucesos imprevistos, accidentes peligrosos y daños serios al material y medio ambiente. Estudia la integridad de los materiales y componentes sin afectar su uso subsecuente, y constituye un instrumento imprescindible para el control de calidad y garantía de calidad ([www.dgzfp.de](http://www.dgzfp.de)).

Es una familia de métodos de inspección técnica especializada que proporciona información sobre la condición de materiales y componentes sin destruirlos. Las evaluaciones no destructivas examinan la producción actual de piezas y revelan la presencia de imperfecciones que se pueden evaluar contra criterios de aceptación y rechazo, y constituyen una de las mejores herramientas de control de calidad ([www.csndt.org](http://www.csndt.org)).

Son aquellas técnicas de inspección y monitoreo que se utilizan para verificar las condiciones internas y externas de los materiales y estructuras, sin destruir, afectar o alterar en forma permanente sus propiedades físicas, químicas y mecánicas (Stanley, 1995), extendiendo de esta manera su serviceabilidad ([www.imagineering-inc.com](http://www.imagineering-inc.com)).

Las evaluaciones no destructivas juegan un papel crucial en la vida cotidiana y son necesarias para asegurar la seguridad y confiabilidad de los materiales, equipos, estructuras o componentes sujetos a inspección. Constituyen una herramienta de manejo de garantía de la calidad, la cual proporciona resultados impresionantes cuando se usa correctamente (NDTA, 1996), por lo que deben llevarse a cabo por personal competente y acreditado (Shankles, 1999).

Las tecnologías de las pruebas no destructivas y principalmente aquellas de no contacto, permiten realizar cálculos y un diagnóstico completo y preciso de las áreas y materiales monitoreados, proporcionando información relevante al personal de mantenimiento, ingenieros de diseño y operarios de planta. Estas detectan las fallas y problemas potenciales antes que se susciten, determinando oportunamente las prioridades de mantenimiento entre los paros programados y el remplazo de componentes y equipos, como parte de un programa de mantenimiento predictivo ([www.comimsa.com.mx](http://www.comimsa.com.mx)).

Para su ejecución, se requiere del entendimiento de los diversos métodos disponibles, sus capacidades y limitaciones, conocimiento de las especificaciones y estándares relevantes. La técnica a usarse depende de las propiedades físicas del material, y el personal que las realice debe tener un conocimiento completo de cada tecnología para hacer la selección correcta del método apropiado para cada aplicación (NDTA, 1996).

Las tecnologías de las pruebas no destructivas comúnmente usados para inspeccionar y monitorear materiales, estructuras, componentes, equipos y sistemas, son las siguientes:

- ❶ Análisis de Aceites.
- ❷ Termografía Infrarroja.
- ❸ Inspección Visual.
- ❹ Líquidos Penetrantes.
- ❺ Partículas Magnéticas.
- ❻ Corrientes Eddy (de Remolino).
- ❼ Emisión Acústica.
- ❽ Ultrasonido.
- ❾ Radiografía.

### **2.3.- IMPORTANCIA**

Las pruebas no destructivas son de gran importancia debido a que contribuyen a la sociedad en el mejoramiento de la calidad de vida, las razones por las cuales se aplican los ensayos no destructivos son las siguientes:

- ❶ Mejoran la confiabilidad del producto.
- ❷ Determinan la aceptación a un requerimiento dado.
- ❸ Proporcionan información sobre los criterios de reparación.
- ❹ Aseguran la calidad uniforme para bienes de consumo.

- ⦿ Hacen eficiente al mantenimiento predictivo, así como la reducción de costos por reparaciones innecesarias y paros imprevistos.
- ⦿ Incrementan la seguridad de vida y previenen accidentes personales, al localizar problemas potenciales y fallos antes de que ocurran.
- ⦿ Las técnicas de no contacto permiten monitorear diferentes procesos industriales sin interrumpir su funcionamiento.
- ⦿ Reducen riesgos de incendio, al detectar áreas calientes oportunamente.
- ⦿ Reducen paros inesperados y costosos.
- ⦿ Previenen pérdidas costosas de propiedades y daños.

#### **2.4.- LIMITACIONES**

Sin embargo, la aplicación de los ensayos no destructivos implica una serie de factores que se deben considerar para llevarse a cabo de la forma más precisa, algunos requerimientos se mencionan a continuación:

- ⦿ Requieren de personal entrenado y calificado.
- ⦿ Un procedimiento para conducir la prueba.
- ⦿ Un sistema para el reporte de los resultados.
- ⦿ Un estándar para interpretar los resultados.
- ⦿ Algunos equipos son muy sofisticados.

#### **2.5.- EQUIPO**

El equipo para llevar a cabo estas tecnologías varía de acuerdo al método de prueba, en forma general, las evaluaciones no destructivas emplean los siguientes equipos y dispositivos:

- ⦿ Guías y estándares de referencia.
- ⦿ Sistemas mecánicos hechos a la medida.
- ⦿ Controles lógicos programables (PLC's).

- ⊙ Aplicaciones en tiempo real.
- ⊙ Procesamiento análogo y digital de señales.
- ⊙ Desarrollo de software y hardware.
- ⊙ Exploradores.
- ⊙ Manipuladores.
- ⊙ Multicanales.
- ⊙ Graficadores.
- ⊙ Adquisición de datos, etc.

## **2.6.- APLICACION**

Las técnicas de las evaluaciones no destructivas emplean diferentes principios y procedimientos, que las hace ideales para todo tipo de materiales y situaciones, de forma general estas pruebas tienen las siguientes aplicaciones:

- ⊙ Las evaluaciones no destructivas se usan para detectar, clasificar y localizar imperfecciones y defectos superficiales y sub-superficiales, en estructuras y componentes.
- ⊙ Constituyen una herramienta del mantenimiento predictivo, debido a que predicen los problemas antes que se susciten y por ende permiten ordenar a tiempo las partes y refacciones para el mantenimiento programado, eficientando con todo esto el inventario actual de repuestos.
- ⊙ Participan en el control de calidad de cada uno de los procesos de producción y fabricación de piezas, en la examinación de materiales y soldaduras, para su aceptación, rechazo o reparación, y monitorean la integridad de la pieza o estructura a través de su diseño de vida.
- ⊙ Los métodos de no contacto permiten determinar las temperaturas apropiadas para cada proceso metalúrgico.

- ① Tienen aplicación en las industrias de generación de energía eléctrica, metalúrgica, de acero, de metales ferrosos y no ferrosos, química, petrolera, aeroespacial, marina, automotriz, ferroviaria, de la defensa, carreteras, infraestructura, nuclear, proceso de alimentos, textil, ingeniería civil y arquitectura, entre otras.
- ① Permiten inspeccionar una gran gama de equipos y estructuras, tales como naves aéreas, componentes automotores y aeroespaciales, motores, tuberías, puentes, trenes, estaciones de energía, refinerías, plataformas petroleras, calderas, soldaduras, rieles, ruedas, ejes, barras, lozas, placas, materiales compuestos, reactores nucleares y armamento, entre otros.
- ① Dan a conocer las características y propiedades de los materiales, tales como el espesor, conductividad, temperatura y otras propiedades físicas y químicas. También en el desarrollo de técnicas de pruebas en materiales, estudios de confiabilidad, control de calidad, y en la investigación y desarrollo de materiales nuevos.
- ① Tienen aplicación en la Medicina, en la caracterización del desgaste dental, análisis de arterias del corazón, detección y monitoreo de enfermedades como el cáncer, dermatología y diagnóstico, entre muchos otros.

### **III.- ANALISIS DE ACEITES**

#### **3.1.- ANTECEDENTES**

El uso de lubricantes, específicamente de las sustancias introducidas en la interface entre las superficies deslizables para disminuir la fricción, es una práctica muy antigua, pinturas Egipcias que datan de más de 4,000 años muestran la aplicación de lubricantes para reducir la fricción generada cuando se arrastraban monumentos pesados ([www.britanica.com](http://www.britanica.com) y [www.tribology.com](http://www.tribology.com)).

La lubricación se ha aplicado desde la evolución del fluido sinovial, el cual lubrica las articulaciones de los animales vertebrados, la gente prehistórica usó lodo y cañas para lubricar los trineos que arrastraban juegos de piedra y madera para la construcción. La grasa animal lubricó los ejes de los primeros vagones y continuó en amplio uso hasta que surgió la industria del petróleo en el siglo XIX, de la cual el petróleo crudo llegó a ser la fuente principal de los lubricantes.

La capacidad natural de lubricación del petróleo crudo ha sido constantemente mejorada mediante el desarrollo de una amplia variedad de productos diseñados para las necesidades específicas de lubricación en automóviles, aviones, locomotoras diesel, turbojets y maquinaria de potencia de cada descripción. Los mejoramientos en los lubricantes de petróleo han hecho a la vez posible el aumento en la velocidad y capacidad en la maquinaria industrial.

Desde el advenimiento de la Química, los investigadores han necesitado saber la identidad y cantidad de los materiales con los cuales ellos trabajan, consiguientemente los análisis químicos se han ido desarrollando paralelamente al desarrollo de esta ciencia.

El científico Sueco Torbern Bergman (1735-1784), es considerado como el fundador del análisis químico cualitativo y cuantitativo inorgánico. Antiguamente casi todos los ensayos eran desempeñados por métodos clásicos, y aun a finales del siglo

XIX cuando ya estaban disponibles instrumentos simples tales como fotómetros y aparatos para análisis electrogravimétricos, el análisis instrumental no floreció sino hasta el siglo XX.

El desarrollo de la electrónica durante la segunda guerra mundial y la subsecuente disponibilidad generalizada de computadoras digitales, aceleró el cambio del análisis clásico al instrumental en la mayoría de los laboratorios. Aunque la mayoría de los ensayos actualmente se llevan a cabo instrumentalmente, aun permanece la necesidad de aplicar algunos análisis clásicos.

De acuerdo a Bergman, los principales pasos que se desempeñan durante un análisis químico son el (1) muestreo, (2) pre-tratamiento de la muestra en campo, (3) tratamiento de laboratorio, (4) ensayo de laboratorio, (5) cálculos y (6) presentación de resultados. Este modelo es aplicable en los análisis y ensayos de las muestras de aceites lubricantes. Algunos químicos analíticos distinguen un análisis como aquel que involucra todos los pasos, y un ensayo como aquella porción del análisis que se lleva a cabo en el laboratorio ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

El primer anticongelante fue formulado por el químico Ucraniano Moses Gomberg en 1900 (Centella, 1998), actualmente muchos análisis de anticongelantes aplican los mismos principios que los análisis de aceites.

Para 1930, los aceites ya eran utilizados en mecanismos simples y cargas ligeras, el trabajo se desarrollaba en ambientes de baja velocidad y la contaminación que se introducía en los sistemas de lubricación era mínima. Actualmente las cargas pesadas y los ambientes de alta velocidad introducen más contaminantes en el sistema de lubricación, los cuales degradan las propiedades del aceite disminuyendo su efectividad, haciendo más necesario el continuo monitoreo y análisis de las propiedades del lubricante (Caterpillar, 1995).

El estudio sistemático del desgaste del aceite y de los componentes que lubrica inicio en la década de 1940, cuando los isótopos radioactivos de los metales comunes de Ingeniería (Hierro, Cobre, Cromo, etc.) llegaron a estar disponibles, las técnicas de trazado usando estos radioisótopos permitieron medir el desgaste. Esto ha hecho posible identificar los tipos de desgaste y descubrir las leyes que lo gobiernan. En la práctica moderna de lubricación, el interés principal es reducir el desgaste que acompaña el

deslizamiento y a la vez diseñar sistemas de lubricación que operen en períodos largos sin la inspección o mantenimiento ([www.tribology.com](http://www.tribology.com)).

La tribología, que es una ciencia que estudia los fenómenos de fricción, lubricación y desgaste, fue mencionada por primera vez en un informe elaborado por la Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de la Gran Bretaña el 9 de marzo de 1996. Los científicos Rusos Jruschov, Babichev, Kragelski y Kostetski, se consideran como los padres de la tribología (Martínez, 1997).

### **3.2.- DEFINICION**

El análisis de aceites lubricantes, es una técnica de monitoreo que permite la elaboración de tendencias y seguimiento del comportamiento de los equipos (Caterpillar, 1995). Este ensayo nos evalúa las condiciones del aceite y del equipo en sí. La interpretación de los datos obtenidos de muestras de aceites en uso, requiere de conocimientos básicos sobre aceites, materiales usados en los equipos y en pruebas de análisis de aceite ([www.comimsa.com.mx](http://www.comimsa.com.mx)).

En los equipos mecánicos existen numerosas partes que giran o resbalan una con otra, creando fricción, la cual se define como la resistencia al movimiento causada por el contacto de las superficies de los cuerpos. La lubricación es un método útil para evitar en lo posible el contacto directo entre dos superficies metálicas que se encuentran en movimiento. La lubricación disminuye la fricción, al poner una pequeña película entre las superficies móviles, debido a las propiedades de adhesión y cohesión que presentan las moléculas del lubricante para impedir el contacto real entre los dos cuerpos (Caterpillar, 1995).

La tribología es la ciencia que estudia las superficies de interacción en movimiento relativo, incluyendo el estudio de la lubricación, fricción y desgaste. Esta ciencia involucra todos los fenómenos relacionados con la lubricación y los aceites lubricantes ([www.oilanalysis.com](http://www.oilanalysis.com) y [www.noria.com](http://www.noria.com)). En los análisis de aceites usados, los límites de utilidad no son límites absolutos, debe considerarse la condición del equipo, antecedentes de reparación, tipos de aceites, lubricaciones anteriores y reparaciones mecánicas anteriores (Caterpillar, 1996).

### **3.3.- TIPOS DE LUBRICACION**

De acuerdo a ([www.britanica.com](http://www.britanica.com) y [www.oilanalysis.com](http://www.oilanalysis.com)), existen tres tipos básicos de lubricación los cuales se describen a continuación:

**LUBRICACION CON UNA PELICULA DE FLUIDO:** Tipo de lubricación en el que se interpone una película de fluido para separar completamente las superficies deslizables. Aunque el fluido comúnmente es un líquido, puede también ser un gas, principalmente aire. Para mantener las partes separadas, es necesario que la presión dentro de la película lubricadora equilibre la carga sobre las superficies deslizables.

Si la presión de la película lubricadora es abastecida por una fuente externa, se dice que el sistema se ha lubricado hidrostáticamente. Si la presión entre las superficies se genera como resultado de la forma y movimiento de las superficies por sí mismas, entonces el sistema ha sido lubricado hidrodinámicamente, este tipo de lubricación depende de las propiedades viscosas del lubricante.

**LUBRICACION DE FRONTERA:** Es aquella condición de lubricación en la cual la fricción entre las superficies es determinada por las propiedades de las superficies y del lubricante a excepción de la viscosidad. La lubricación de frontera rodea una porción significativa de los fenómenos de lubricación y comúnmente se realiza durante el inicio y paro de las máquinas.

**LUBRICACION SOLIDA:** Los sólidos tales como el Grafito y Bisulfuro de Molibdeno se usan ampliamente cuando los lubricantes normales no poseen resistencia suficiente a las cargas o temperaturas extremas. Además de las funciones familiares, los lubricantes sirven como superficies de deslizamiento en algunas máquinas sofisticadas.

### 3.4.- CLASIFICACION DE LOS ACEITES LUBRICANTES

Se optó en clasificar a los aceites lubricantes de acuerdo a su origen, presentación y función. Los principales lubricantes de cada categoría se mencionan como sigue:

#### a) Por su origen:

**LUBRICANTES DE PETROLEO:** Son productos principalmente de hidrocarburos extraídos de fluidos que ocurren naturalmente en el interior de la Tierra, se usan ampliamente como lubricantes debido a que poseen viscosidades apropiadas, baja volatilidad, son inertes, anticorrosivos y de bajo costo ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)). Se clasifican en aceites nafténicos, aromáticos y parafínicos, donde estos últimos son los más usados debido a su alto índice de viscosidad por la gran cantidad de cera que contienen (Caterpillar, 1995).

**ACEITES MINERALES:** Son aceites fabricados con productos de aceites crudos de petróleo refinados cuidadosamente y altamente tratados, se usan para engranes estándar que operan en condiciones normales.

**MEZCLA DE ACEITES MINERALES:** Mezcla que se obtiene de aceites minerales y aceites gruesos o jabones con base de Sodio o Grafito.

**ACEITES SINTETICOS:** Son aceites que se forman en un proceso de reacción química de aquellos materiales con una composición química específica para producir un compuesto con cualidades planificadas y predecibles. Su índice de viscosidad es más alto que el de los lubricantes minerales (Caterpillar, 1995). En ciertas formas son mejores a los productos de hidrocarburos, debido a que exponen mayor estabilidad de viscosidad con los cambios de temperatura, resistencia a la fricción, oxidación y al fuego. Como las propiedades de los sintéticos varían considerablemente, cada lubricante sintético tiende a encontrar una aplicación especial ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

## **b) Por su presentación:**

LUBRICANTES SOLIDOS: Son materiales sólidos elaborados de compuestos orgánicos, inorgánicos o de metal. Los lubricantes sólidos orgánicos se dividen en películas poliméricas, jabones, ceras y grasas. Los lubricantes sólidos inorgánicos se dividen en sólidos de capa-trama, sólidos suaves y recubrimientos de conversión química ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

- PELICULAS POLIMERICAS: Son sustancias sintéticas resistentes al deterioro durante la exposición a los elementos, principalmente de politetrafluoroetileno y policlorofluoroetileno. Algunos lubricantes metálicos son de Plomo, Estaño e Indio.

- JABONES: Esta clase incluye jabones metálicos de Calcio, Sodio y Litio.

- GRASAS LUBRICANTES: Las grasas son aceites minerales engrosados con jabón metálico, la función del jabón es hacer que el lubricante se adhiera al punto de aplicación (Caterpillar, 1995). Estas sustancias sólidas o semisólidas consisten de agentes espesantes en un lubricante líquido, principalmente de Aluminio, Bario, Calcio, Litio, Sodio y Estroncio. Existen otros espesantes de compuestos inorgánicos como arcillas modificadas o sílices finas. Otras grasas se elaboran a partir de ácidos grasos (esteárico y palmítico), de esteres grasos (manteca y sebo) y de materiales orgánicos como pigmentos de arilureas o ftalocianina ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

- LUBRICANTES SOLIDOS DE CAPA-TRAMA: Elaborados de Grafito y Bisulfuro de Molibdeno, los cuales son químicamente inertes y de alta estabilidad. Otros materiales son el Bisulfuro de Tungsteno, mica, Boro, Borax, Sulfato de Plata, Iodo de Cadmio y Plomo.

- LUBRICANTES SOLIDOS SUAVES: Lubricantes que se elaboran de sólidos inorgánicos como el Plomo Blanco, Lima, Talco, Bentonita, Iodo de Plata y Monóxido de Plomo.

- LUBRICANTES DE RECUBRIMIENTOS DE CONVERSIÓN QUÍMICA: Son compuestos inorgánicos que se aplican sobre superficies metálicas por reacción química, los más comunes son de Sulfido, Cloruro, Oxido, Fosfato y Oxalato.

LUBRICANTES GASEOSOS: La lubricación con un gas aplica los mismos principios de la lubricación de película de fluido. Aunque los gases y los líquidos son fluidos viscosos, ellos difieren en dos aspectos; la viscosidad de los gases es mucho más baja y la compresibilidad mucho más alta. Los gases usados como lubricantes incluyen el aire, vapor, gases industriales y vapores de metales líquidos ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

LUBRICANTES LIQUIDOS: Son aquellos que por sus características de fluidez se les designa como aceites lubricantes (Martínez, 1997). Estos aceites son los más diversificados y tienen múltiples aplicaciones, principalmente en los sistemas de lubricación.

**c) Por su función:**

ACEITES DE PRESION EXTREMA: Aceites que se utilizan principalmente en engranes hipoidales, los cuales por su corte en curva ejercen acción giratoria y de frotación, creando presiones que pueden exceder de 100,000 psi y una acción frotante o deslizante a un velocidad de 1,500 pies por minuto. Estos aceites contienen Sulfuro y Clorina, para impedir que el lubricante sea removido de entre los dientes y así evitar que la superficie de los dientes de un engrane se sude a los dientes del engrane opuesto, debido a las altas temperaturas que se generan por frotamiento (Caterpillar, 1995).

FLUIDOS DE TRANSMISION AUTOMATICA: Estos aceites consisten en una combinación de aceites de alta calidad con inhibidores de oxidación, aditivos antidesgaste, agentes antiespumantes y componentes detergentes. Este tipo de aceite es el medio para transmitir potencia en el convertidor de potencia y está expuesto a altas temperaturas, en la transmisión sirve como lubricante de los engranes y cojinetes, controla la fricción característica del embrague y las bandas que proveen las diferentes

relaciones de las velocidades, transfiere la presión necesaria para operar el embrague y las bandas, mantiene limpias las válvulas de control de ajuste e impide que los sellos usados en la transmisión se sequen (Caterpillar, 1995).

**ACEITES UNIVERSALES O MULTIPROPOSITO:** Son aceites que combinan todas las características de los aceites minerales puros, las mezclas de aceite mineral y los aceites de presión extrema. Estos lubricantes son ideales porque son anticorrosivos, estables y baratos, además cubren la mayoría de las necesidades de lubricación.

### **3.5.- PROPIEDADES DE LOS ACEITES LUBRICANTES**

Los aceites tienen características y propiedades que determinan su eficiencia (Caterpillar, 1995 y Martínez, 1997), las más importantes son las siguientes:

**ADHESION:** Es la propiedad que permite al lubricante permanecer entre las superficies que se deben lubricar.

**COHESION:** Se refiere a la fuerza de atracción entre las partículas del lubricante que se denomina viscosidad.

**VISCOSIDAD:** Es la resistencia a la fluencia que presentan los líquidos bajo la acción de la gravedad debido a la fricción de sus moléculas. La viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura.

**FLUIDEZ:** Propiedad que permite al lubricante fluir por los conductos del aceite y después distribuirse entre las superficies en movimiento. La fluidez es directamente proporcional a la temperatura.

**DENSIDAD:** Es una propiedad relacionada con la viscosidad, comportándose proporcionalmente entre sí, la densidad depende de la composición química de los aceites.

**CORROSIVIDAD:** La presencia de Azufre y Cloro en el aceite causa corrosión en juntas, sellos de goma y superficies de Cobre, Plomo y Cadmio.

**CONDUCTIVIDAD TERMICA:** Propiedad que determina la eficiencia de evacuación de calor de las superficies que forman pares de fricción, es útil para el cálculo de las temperaturas en las zonas de contacto.

**DILATACION VOLUMETRICA:** Se refiere al incremento de volumen que sufren los aceites, depende de la viscosidad, densidad del lubricante y temperatura. El coeficiente de dilatación volumétrica es inversamente proporcional a la viscosidad.

**ESTABILIDAD:** Es la capacidad que tiene el aceite para conservar sus propiedades bajo condiciones de trabajo y almacenamiento, es de gran importancia porque determina el período de vida útil del aceite.

**EMULSIBILIDAD:** Es la capacidad de un aceite lubricante para drenar fácilmente el agua que esté contenida en este, en aceites para motores y transmisiones el contenido de agua no debe exceder de 0.2 por ciento y en aceites para transformadores eléctricos, no se admiten más de 10 ppm de agua.

**HUMECTABILIDAD Y PEGAJOSIDAD:** Propiedades que permiten al aceite adherirse al área de aplicación, principalmente en sistemas abiertos o parcialmente abiertos para evitar salpicaduras y derrames.

**LAVABILIDAD:** Es la capacidad que presentan algunos aceites para ser removidos con agua debido a los aditivos especiales que contienen, esta propiedad tiene aplicación principalmente en la industria textil.

**COMBUSTIBILIDAD:** Es el grado de inflamabilidad de los aceites lubricantes, los más combustivos son los aceites derivados del petróleo.

**TOXICIDAD:** Los aceites no deben ser nocivos para la salud del hombre ni deben tener olores desagradables.

### **3.6.- FUNCIONES DEL ACEITE LUBRICANTE**

Algunas de las razones por las cuales se aplican aceites lubricantes, son las siguientes:

- ❶ Brinda una lubricación adecuada y protege los componentes durante la vida útil de un equipo.
- ❶ Actúa como un medio de transferencia de calor, al eliminar el calor de la zona lubricada.
- ❶ Es un medio de barrido o recolector de desechos e impurezas derivadas del funcionamiento del equipo.
- ❶ Disipa parte del calor del sistema, al actuar como refrigerante.
- ❶ Actúa como sellante y como aislante eléctrico.
- ❶ Transmite potencia al sistema hidráulico.
- ❶ Dispersa los contaminantes.
- ❶ Es un agente antiespumante.
- ❶ Mantiene las superficies limpias y libres de óxido y corrosión.
- ❶ Proporciona una película que reduce el contacto de metal con metal, y por ende la fricción y desgaste.

### **3.7.- CONTAMINACION DEL ACEITE LUBRICANTE**

La contaminación indica la presencia de materia o contaminantes indeseables en el aceite (Caterpillar, 1995), los contaminantes más comunes en el aceite son los siguientes:

**ELEMENTOS CONTAMINANTES:** Los elementos contaminantes del aceite lubricante son el Aluminio, Azufre, Boro, Plomo, Silicio y Sodio.

**ELEMENTOS DE DESGASTE:** La presencia de estos elementos indica desgaste de ciertas piezas o componentes, entre ellos se encuentran el Aluminio, Cobre, Cromo, Estaño, Fierro, Magnesio, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo y Vanadio.

**ALUMINIO (Al):** La presencia de este elemento se debe al desgaste de los cojinetes intermedios en las levas, turbinas, empuje del cigüeñal y pistón, y por el roce del faldón de los pistones.

**AZUFRE (S):** La presencia de Azufre indica que corren riesgo todas las piezas del motor, debido a que induce el desgaste corrosivo y acelera el consumo de aceite.

**COBRE (Cu):** Ciertos aditivos del aceite lo usan como componente, por lo que todo nivel alto de Cobre debe evaluarse en relación con el valor de la línea base del Cobre presente en el aceite nuevo.

**CROMO (Cr):** Puede provenir de dos lugares; del inhibidor de corrosión del agua refrigerante y por el desgaste de los anillos del pistón.

**FIERRO (Fe):** Se presenta en forma de herrumbre y se debe al desgaste severo de las camisas del cilindro, anillos, levas, botadores de válvulas o el tren de engranaje.

**PLOMO (Pb):** Su presencia en el aceite usado, se debe al desgaste de los cojinetes principales de las bielas y del cigüeñal, por el recubrimiento de babbitt.

**SODIO (Na):** El aumento repentino de Sodio indica fuga del refrigerante del sistema de enfriamiento, debido a que está contenido en este.

**SILICIO (Si):** Es el más importante, ya que indica la entrada de suciedad, principalmente por las tomas de aire y tapas de llenado. Grandes cantidades de Silicio en el aceite producen desgaste abrasivo en el metal de distintas piezas durante la operación.

**SILICIO-CROMO-FIERRO:** La presencia de esta combinación indica la entrada de polvo en el sistema de inducción y desgaste de anillos y camisas del cilindro.

**SILICIO-FIERRO-PLOMO-ALUMINIO:** Indica la presencia de polvo en la parte inferior del motor y defectos en el cigüeñal y sus cojinetes.

**POLVO:** Es un contaminante que se adhiere al aceite en las paredes de los cilindros, puede entrar por los sellos defectuosos.

**HOLLIN:** Es combustible parcialmente quemado, su presencia se detecta por el humo negro de escape y por la suciedad de los filtros de aire. Si el aceite se degrada hasta el punto que aumente el tamaño de las partículas de hollín, este puede acelerar el desgaste. La presencia de hollín en el aceite indica un filtro de aire sucio, motor sobrecargado, demasiada entrega de combustible o aceleración repetida con ajuste inadecuado del limitador de la cremallera, o combustible de baja calidad.

**COMBUSTIBLE:** La contaminación por combustible reduce las cualidades de lubricación del aceite y disminuye su viscosidad.

**AGUA:** La contaminación del aceite por agua ocurre cuando el agua que deriva de la combustión se condensa en el cárter y no sale por el tubo de escape, debido a la baja temperatura de operación del motor. El agua junto con el aceite forma un ácido que corroe las piezas del metal.

**GLICOL ETILENICO-ANTICONGELANTE:** La presencia de glicol indica contaminación de refrigerante en el aceite, forma depósitos que pueden taponar el filtro.

### **3.8.- DEGRADACION DEL ACEITE LUBRICANTE**

Además de los contaminantes, existen otros factores que degradan o disminuyen la eficiencia del aceite (Caterpillar, 1995), tales factores son:

**PRODUCTOS DE NITRACION:** Los productos de Nitrógeno creados por la combustión, espesan el aceite, disminuyen las cualidades de lubricación del aceite, taponan los filtros y forman depósitos y laca.

**PRODUCTOS DE OXIDACION:** La oxidación es el resultado de la reacción química entre el aceite y el Oxígeno, los agentes que aceleran la oxidación son la temperatura y contaminantes como el Cobre y glicol. Al aumentar la oxidación del aceite, este pierde sus cualidades de lubricación.

**BAJA TEMPERATURA DEL AGUA DE LAS CAMISAS:** La temperatura de salida del agua de las camisas del motor induce la formación de ácidos corrosivos, a temperaturas inferiores a 79 °C se forman vapores acídicos y comienza el ataque corrosivo, al disminuir la temperatura aumenta el contenido de agua en el aceite, la cual diluye a los aditivos y reduce la calidad de lubricación del aceite. Esto puede causar la formación de depósitos, barniz y carbono, pulido de las camisas del cilindro y atascamiento de los anillos del pistón.

**ALTA HUMEDAD:** En condiciones de humedad del 85 por ciento o mayor, se forman ácidos gaseosos por el alto contenido de agua en el aire, aumentando los efectos corrosivos.

**RELACION INADECUADA DE CARGA-VELOCIDAD:** Al reducir la carga con el motor trabajando a la velocidad de régimen, los sistemas de lubricación y enfriamiento continuarán operando eficientemente pero puede enfriarse demasiado el motor y formarse condensación, afectando las camisas y anillos, y aumentando los gases que van al cárter.

**CONSUMO DE ACEITE:** Los cambios graduales o repentinos en el consumo de aceite, indican desgaste en anillos y camisas del cilindro o atascamiento de anillos del pistón.

**COMBUSTIBLE INADECUADO:** Los combustibles de destilación más alta, pueden deteriorar al motor debido a que estos productos no se queman completamente, por lo que el motor está sujeto a altas concentraciones de hollín y otros derivados sin quemar.

**MANTENIMIENTO INADECUADO:** La extensión de los intervalos de cambio de aceite y filtros, junto con otras prácticas inadecuadas de mantenimiento, fomentan la formación de incrustaciones, las cuales no se pueden eliminar con los cambios subsecuentes y normales de aceite.

### **3.9.- ADITIVOS DE LOS ACEITES LUBRICANTES**

Caterpillar (1995) menciona que los aditivos son sustancias químicas que se adicionan al aceite de base, con el propósito de fortificarlo y evitar que se degrade y deteriore con rapidez en algunas condiciones de operación.

La materia prima en la elaboración de los aditivos consiste en petróleo, sintéticos y elementos tales como el Bario, Boro, Calcio, Fósforo, Magnesio, Molibdeno, Silicio, Sodio y Zinc. Los aditivos más comunes son los siguientes:

**MEJORADORES DEL INDICE DE LA VISCOSIDAD:** Son productos químicos que reducen los cambios de viscosidad causados por los cambios de temperatura, evitando con esto el enrarecimiento del aceite a altas temperaturas. Los más comunes son los polisobutilénicos, polimetacrilatos, poliestérs a base de estirenos, copolímeros a base de estirenos y copolímeros etilénicos propilénicos.

**AGENTES ALCALINOS:** Son agentes que convierten los ácidos de la combustión en sales neutralizadas inofensivas.

**INHIBIDORES DE OXIDACION:** Impiden el aumento de la viscosidad, el desarrollo de ácidos orgánicos y la formación de materia carbonacea. Algunas sustancias químicas antioxidantes consisten en ditiafosfatos de Zinc, sulfuros de fenato, aminas aromáticas, esteres sulfurizados y fenoles.

**AGENTES ANTIDESGASTE O ANTICORROSIVOS:** Reducen la fricción al formar una película sobre las superficies metálicas, protegiéndolas contra la acción corrosiva. Los tipos principales de agentes anticorrosivos son detergentes alcalinos, ditiafosfatos de Zinc y ditiocarbamatos.

**AGENTES ANTIESPUMANTES:** Son agentes que contienen pequeñas cantidades de Silicio para evitar la formación de espuma en el aceite lubricante.

**DETERGENTES:** Son agentes que ayudan a mantener limpio el motor reaccionando químicamente con los productos de oxidación para evitar la formación de depósitos de compuestos insolubles y neutralizan los ácidos derivados del Azufre para retardar la corrosión. Contienen elementos metálicos como Calcio, Sodio, Magnesio y Bario, y si se queman en el motor pueden producir residuos o cenizas. Los detergentes usados son sales metálicas que incluyen sulfonatos, fenatos, fosfenatos o salicilatos.

**DISPERSANTES DEL PUNTO DE FLUIDEZ:** Mantienen el aceite fluido a bajas temperaturas impidiendo la acumulación y aglomeración de cristales de cera. Estos dispersantes son polimetacrilatos, poliésteres a base de estirenos, fenoles y naftalenos alquílicos.

**DISPERSANTES:** Impiden la formación de sedimentos, disseminando los contaminantes y manteniéndolos en suspensión. No contienen ningún elemento metálico y si se queman en el motor no dejan residuos ni cenizas, son átomos de Nitrógeno u Oxígeno, o de ambos. Los tipos comunes de dispersantes incluyen los succinimidas polisobutilénicos y los esteres succinicos polisobutilénicos.

### **3.10.- FALLAS DETECTADAS MEDIANTE EL ANALISIS DE ACEITES**

La falta de aceite lubricante así como la contaminación y degradación del mismo, producen fallas en los diferentes componentes de rodamientos y transmisiones (Caterpillar, 1995). Algunos problemas típicos se mencionan como sigue:

**COJINETES:** La falta de lubricación y la presencia de polvo en el aceite, inducen al desgaste abrasivo en los cojinetes por el desprendimiento de partículas. El daño del roce entre el muñón del cigüeñal y el cojinete se da en tres etapas; corrimiento de la capa de Plomo-Estaño normalmente en el centro del cojinete, corrimiento de la capa de Aluminio y un agarrotamiento total del cojinete.

**CIGÜEÑALES:** La falta de lubricación induce al roce entre el muñón del cigüeñal y el cojinete, aumenta la fricción y temperatura, y en ocasiones el cojinete se adhiere al cigüeñal.

**TURBOALIMENTADORES:** La falta de lubricación, contaminación del aceite y prácticas inadecuadas de operación, causan fallas en los turboalimentadores, las cuales consisten en el rayado y desgaste del cojinete de empuje, perforaciones de aceite corroídas, roce en los álabes por el juego del eje, roce de la rueda compresora con la caja, doblamiento y rotura del eje, y desgaste en las arandelas de empuje.

**PISTONES:** El aceite contaminado induce al desgaste abrasivo en el faldón del pistón, pasador de la biela y corona del pistón, y generalmente la superficie desgastada se torna de un color gris opaco.

**ANILLOS DEL PISTON:** La falta de lubricación causa desgaste en la ranura del resorte y atascamiento de los anillos.

**CAMISAS DEL CILINDRO:** Las partículas abrasivas y la falta de lubricación causan el pulido del cilindro y dejan una superficie brillante.

VALVULAS: La falta de lubricación y contaminación del aceite, dan origen a la acumulación de depósitos y por ende al agarrotamiento del vástago de las válvulas y acampanamiento en los guía-válvulas.

### **3.11.- EQUIPO**

El equipo utilizado en el análisis de aceites es muy sofisticado, la mayoría de las empresas que realizan este tipo de análisis, contratan el servicio a compañías que cuentan con laboratorios especiales, en donde se analizan las muestras de aceite lubricante (Caterpillar, 1995). El material utilizado es el siguiente:

- |   |                          |
|---|--------------------------|
| ❶ Guías y estándares de referencia.           | ❶ Viscosímetros.         |
| ❶ Espectrofotómetro de absorción atómica.     | ❶ Termómetro infrarrojo. |
| ❶ Bomba de extracción de muestras de fluido.  | ❶ Probetas.              |
| ❶ Adaptador de temperaturas del termopar.     | ❶ Equipo de destilación. |
| ❶ Juego de prueba de aditivos suplementarios. | ❶ Densímetros.           |
| ❶ Probadores de aceite y refrigerante.        | ❶ Medidor de refracción. |
| ❶ Bomba de presurización.                     | ❶ Soporte universal.     |
| ❶ Estufas y mecheros.                         | ❶ Tubos de ensayo.       |

### **3.12.- PROCEDIMIENTO DEL ANALISIS DE ACEITES**

El procedimiento de un análisis de aceite generalmente consiste en el muestreo, drenado, análisis y reporte (Caterpillar, 1995):

#### **1.- TOMA DE MUESTRA**

La forma correcta de realizar el muestreo, es tomar una muestra homogénea y representativa a temperatura de operación, en recipientes limpios y secos, de plástico o vidrio. Los métodos de muestreo que existen son el método del tapón del drenaje, de la pistola de muestreo y del grifo.

## 2.- DRENADO

Para determinar el intervalo adecuado de drenado del aceite, se requiere de la experiencia y del análisis de aceites para tomar una decisión lógica. Las variables que afectan la duración del intervalo de drenado son el tipo de servicio del aceite, calidad del aceite, prácticas de mantenimiento e índice de consumo ([www.comimsa.com.mx](http://www.comimsa.com.mx)).

### 3.1- ANALISIS EN ACEITES NUEVOS

Para la certificación de aceptación o rechazo del lubricante, a los aceites nuevos se les hacen los siguientes análisis:

- ❶ Análisis de aceites lubricantes nuevos.
- ❶ Análisis de glicol o anticongelante.
- ❶ Análisis de grasas nuevas.
- ❶ Caracterización de aceites crudos.
- ❶ Caracterización de gases crudos.

### 3.2 ANALISIS EN ACEITES USADOS

Una gran cantidad de parámetros se evalúan en una prueba de aceite usado, los más comunes son los siguientes:

**VISCOSIDAD:** Este análisis se realiza a 40 y 100 °C en cSt de acuerdo a la norma ASTM D445, y consiste en determinar la velocidad de fluidez de una cantidad determinada de aceite a través de un diámetro determinado, a una temperatura determinada (<http://packers.pmaint.com>). Los cambios en la viscosidad revelan dilución excesiva, separación sedimentaria o contaminación. Habitualmente es medida con un viscosímetro y su valor se expresa en segundos Saybolt universal (SSU), centistokes (cSt) centipoises (cP), metro-pascales (mPa), milímetros cuadrados por segundo (mm<sup>2</sup>/seg) y número de Reynolds ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

En los intervalos recomendados de cambios de aceite, la viscosidad del aceite usado medida en centistokes a una temperatura de 100 °C no debe aumentar más de 3 cSt por encima de la viscosidad del aceite cuando era nuevo (Caterpillar, 1995).

Una viscosidad alta, más del 40 por ciento de su grado original, es el resultado de la contaminación durante largos períodos o del uso incorrecto del producto. El aumento de la viscosidad causa los siguientes problemas; sobre calentamiento del combustible, obstrucción de las entradas de aire, desgaste interno en anillos y camisas, inyectores defectuosos, exceso de potencia máxima, prolonga el intervalo de drenaje de aceites y enfriamiento inadecuado.

Una viscosidad baja, menos del 15 por ciento de su grado original, provoca que no se desarrolle una película lubricante adecuada entre las piezas móviles. La disminución de la viscosidad está relacionada con problemas de fuga en válvulas, inyectores demasiado grandes, con filtraciones y rocío inadecuado, inmovilización de los anillos.

**INDICE DE VISCOSIDAD:** Se utiliza en la medición de la variación que puede experimentar la viscosidad con los cambios de temperatura y está asociado con la determinación de la viscosidad a 100 y 40 °C. Un alto índice indica una baja pérdida de las propiedades viscométricas del lubricante (<http://packers.pmaint.com>).

**INSPECCIONES PRELIMINARES:** Las inspecciones preliminares proporcionan información de las observaciones visuales de la muestra antes de realizar las pruebas de laboratorio, a simple vista se detecta la presencia de agua libre y de partículas grandes metálicas brillantes, color del aceite drenado y sedimentación de materiales insolubles.

**PUNTO DE FUEGO:** Ensayo para la detección de materiales o compuestos volátiles inflamables que pueden contaminar al lubricante, se realiza de acuerdo a la norma ASTM D92 (<http://packers.pmaint.com>).

**PUNTO DE INFLAMACION:** Este ensayo determina la temperatura en grados Celcius a la cual un lubricante puede inflamarse cuando se expone a una llama abierta, se determina de acuerdo a la norma ASTM D92 (<http://packers.pmaint.com>).

**PRUEBA DE FRIO:** Prueba que se utiliza para determinar la temperatura a la que se congela el aceite y deja de fluir. El punto de nublado de un aceite es la temperatura a la que los sólidos de aceite empiezan a cristalizarse o a separarse de la solución.

**PRUEBA DE CARBON RESIDUAL:** Prueba que sirve para determinar la cantidad de carbón que queda cuando una cantidad de aceite se ha evaporado.

**ANALISIS DE CENIZA:** El contenido de ceniza de un aceite es el residuo no combustible de un lubricante, los aceites derivados de metales contiene aditivos detergentes de Bario, Calcio y Magnesio, los cuales son fuentes comunes de ceniza. Estos compuestos metalorgánicos proporcionan el TBN para la alcalinidad del aceite. Un exceso de ceniza produce depósitos que reducen la eficiencia y la potencia del motor (Caterpillar, 1995).

**CONTEO DE PARTICULAS:** Monitoreo que permite un control sobre la cantidad y tamaño de partículas sólidas que contaminan principalmente los fluidos hidráulicos y aceites, la clasificación de tales partículas es de acuerdo a la norma ISO 4416. Si existe agua a niveles superiores a 300 ppm, este ensayo es impracticable (<http://packers.pmaint.com>).

**ANALISIS INFRARROJO:** Ensayo que determina el estado del aceite usado y entrega información sobre hollín sulfatos, productos de oxidación y nitración, glicoles, agua y correlación total de productos de degradación. Muestra los antecedentes sobre las condiciones del lubricante y controla los cambios que se producen en las estructuras químicas de los componentes del aceite. Es un método muy confiable para optimizar los períodos de cambio del lubricante (<http://packers.pmaint.com> y Caterpillar, 1995).

**FERROGRAFIA ANALITICA:** Ensayo de laboratorio de gran potencial para el diagnóstico y detección de partículas grandes de desgaste mayores a 100 micrones, cuyo análisis microscópico determina el tipo de desgaste que está ocurriendo e identifica los contaminantes o partículas suspendidas en el aceite en uso (<http://packers.pmaint.com>).

**FERROGRAFIA CUANTITATIVA:** Ensayo que permite estudiar las tendencias de los distintos niveles de partículas grandes y pequeñas de tipo ferroso, que indican cambios en la tasa y severidad de desgaste en elementos rodantes, tales como engranajes y rodamientos (<http://packers.pmaint.com>).

Consiste en pasar un volumen de fluido sobre una diapositiva de microscopio tratada químicamente, la cual se apoya sobre un campo magnético. Los imanes permanentes se colocan de tal manera para crear una resistencia de campo variante sobre la longitud del sustrato. Esta resistencia variante ocasiona que las partículas de desgaste se precipiten en una distribución con respecto al tamaño y masa sobre el Ferrogramo, estas partículas de desgaste sirven para el análisis óptico del desgaste de sus componentes ([www.oilanalysis.com](http://www.oilanalysis.com) y [www.noria.com](http://www.noria.com)).

**NUMERO DE ACIDEZ TOTAL (TAN):** Prueba que mide la cantidad total de ácidos presentes en el lubricante, se realiza de acuerdo a la norma ASTM D664. Un incremento de TAN indica oxidación o contaminación del aceite por productos ácidos (<http://packers.pmaint.com>). Los resultados son expresados en valores numéricos correspondientes a la cantidad de Hidróxido de Potasio en miligramos que se requiere para neutralizar los constituyentes alcalinos formados en un gramo de aceite ([www.oilanalysis.com](http://www.oilanalysis.com) y [www.noria.com](http://www.noria.com)).

**NUMERO BASE TOTAL (TBN):** Ensayo que mide la alcalinidad de los aditivos detergentes y alcalinos del aceite, que neutralizan la formación de ácidos producidos durante la combustión, este análisis se realiza de acuerdo a la norma ASTM D2896 (<http://packers.pmaint.com>).

Generalmente un valor alto de TBN indica una buena capacidad de neutralización de ácidos y por ende mayor protección del motor. Cuando se analiza una muestra de lubricante, el valor de TBN debe ser mayor de la mitad del TBN del aceite cuando era nuevo (Caterpillar, 1995).

Los resultados son expresados en valores numéricos correspondientes a la cantidad de Hidróxido de Potasio en miligramos que se requiere para neutralizar los ácidos formados en un gramo de aceite ([www.oilanalysis.com](http://www.oilanalysis.com) y [www.noria.com](http://www.noria.com)).

**SOLIDOS TOTALES:** Un incremento en sólidos indica la presencia de contaminantes abrasivos que causan sobre calentamiento y desgaste excesivo.

**ANALISIS ESPECTRO-QUIMICO:** Se miden e identifican las partículas microscópicas suspendidas en el aceite.

**ANALISIS DE SUBSTANCIAS INSOLUBLES:** De acuerdo a la norma ASTM D893, la cantidad máxima permisible de sustancias insolubles de Pentano (hollín, polvo y derivados de oxidación) es del 3 %, el límite máximo permisible de sustancias insolubles de Tolueno (hollín y polvo) es del 2 % y el máximo permisible de sustancias solubles de Tolueno (material oxidado) es del 1 %. En los aceites con altas cualidades de dispersión, esta prueba no es tan relevante como con los aceites antiguos (Caterpillar, 1995).

**ANALISIS ESPECTROGRAFICO O DE DESGASTE:** Este análisis se hace con un espectrofotómetro de absorción atómica, su propósito esencial es detectar la contaminación gradual por polvo y vigilar el ritmo de desgaste de un componente determinado, mediante la identificación y medición de la concentración de elementos de desgaste en el aceite. Los límites máximos de tales elementos se establecen basándose en datos conocidos de concentración normal.

Se hace un análisis de tendencias para definir el desgaste normal y para indicar cuando ocurre un desgaste excesivo que puede acortar la vida útil del componente y se identifica el riesgo de fallas cuando las tendencias establecidas de dichos elementos difieren de la norma establecida (Caterpillar, 1995).

Este ensayo monitorea a 20 elementos metálicos asociados con el desgaste, contaminación del lubricante y aditivos empleados en su formulación. Se lleva a cabo de acuerdo a la norma ASTM D5185. Es muy efectivo cuando el tamaño de partícula es menor a 6 micrones (<http://packers.pmaint.com>).

**DILUCION CON COMBUSTIBLE:** Ensayo que verifica y mide la presencia de combustible en el aceite, se realiza de acuerdo a la norma ASTM D3828. La dilución se

puede asociar a malos ajustes o calibraciones y al mal funcionamiento de los sistemas de inyección. Una dilución excesiva puede causar una pérdida de las características viscométricas del lubricante incrementándose también el riesgo de fuego y explosiones (<http://packers.pmaint.com>).

El contenido de combustible se establece a un límite del 4 por ciento que representa el límite permisible de combustible en el aceite, el probador de destello evalúa una dilución mínima del combustible del 3 por ciento sin cambio de llama, un aumento en el tamaño de la llama con un porcentaje del 3 al 4 por ciento y una llamarada si la dilución del combustible es mayor del 4 por ciento (Caterpillar, 1995).

**ANALISIS DE AGUA KARL FISCHER:** Este ensayo mide los contaminantes disueltos en agua que promueven la corrosión y degradan el funcionamiento del lubricante, se lleva a cabo según la norma ASTM D4928 (<http://packers.pmaint.com>).

La presencia y cantidad aproximada de agua se determina por la prueba de "chisporroteo", la cual consiste en colocar una gota de aceite en una plancha caliente a una temperatura de 110 a 121 °C, la presencia de agua se indica por la formación de burbujas en el aceite en la superficie caliente. La gama aceptable de agua es de 0.1 a 0.5 por ciento (Caterpillar, 1995).

**ANALISIS DE GLICOL:** Ensayo para determinar la presencia de glicol proveniente principalmente de los sistemas de refrigeración de los vehículos. Una contaminación con glicol provoca desgaste, corrosión y degradación del lubricante. Se realiza según la norma ASTM D2982 (<http://packers.pmaint.com>). La presencia de anticongelante en una muestra de aceite se determina con una prueba química, cualquier indicio es inaceptable (Caterpillar, 1995).

**DESTILACION:** Consiste en destilar una muestra de fluido en presencia de un solvente soluble en la muestra e insoluble en el agua, el agua destilada del fluido es condensada y segregada en un tubo receptor diseñado especialmente y graduado para indicar directamente su volumen. Se realiza de acuerdo a la norma ASTM D95 ([www.oilanalysis.com](http://www.oilanalysis.com) y [www.noria.com](http://www.noria.com)).

ANALISIS DE CREPITACION: Determina los niveles de contaminación del lubricante por agua. El exceso de contaminación puede causar una pérdida de las propiedades de lubricación de los fluidos contaminados, corrosión y herrumbre del sistema lubricado (<http://pmain.com>).

### 3.3 ANALISIS EN REFRIGERANTES

Algunos parámetros que se determinan mediante el análisis del refrigerante (Caterpillar, 1989), son los siguientes:

CONTENIDO DE ADITIVO REFRIGERANTE SUPLEMENTARIO: Cuando la mezcla de refrigerante tiene una concentración de sal de más de 200 ppm por la evaporación o adición de agua, el refrigerante suplementario tiene poco efecto.

CONTENIDO DE ANTICONGELANTE: Se determina de acuerdo a la norma ASTM D2982, el glicol etilénico es el agente utilizado como anticongelante, las concentraciones de glicol etilénico y agua varían de acuerdo a la temperatura. Todos los motores diesel con post-enfriamiento de aire a aire requieren una concentración mínima del 30 por ciento de anticongelante para evitar la cavitación de la bomba de agua.

CONTENIDO DE GLICOL PROPILENICO: El glicol propilénico substituye al glicol etilénico con una mezcla de 50/50 con agua. Su medición se realiza con un medidor de refracción de acuerdo a la norma ASTM D2982.

% DE ACEITE RESIDUO NO VOLATIL: El incremento en los residuos no volátiles puede reducir la eficiencia del refrigerante y contribuir a una alta acidez.

NUMERO DE ACIDEZ TOTAL (TAN): Prueba que se realiza según la norma ASTM D664, la falta del mantenimiento apropiado puede crear productos de corrosión indeseables en los sistemas de refrigeración.

ANALISIS DE AGUA KARL FISHER: Mide el agua contenida en el refrigerante en partes por millón, el incremento de agua puede ser perjudicial para el funcionamiento de los sistemas refrigerantes. Se realiza de acuerdo a la norma ASTM D4928. El refrigerante debe cumplir con los niveles adecuados en cuanto a Cloruros, Sulfatos, dureza total, cantidad total de sólidos y nivel de pH.

#### 4.- REPORTE

El informe de resultados de un análisis de aceites debe contener los datos del área o componente de donde se extrajo la muestra, condición del equipo, fecha de muestreo y de análisis, fecha del informe anterior, nombre de la prueba o ensayo, resultados, severidad de los daños relacionados con el aceite y recomendaciones.

#### 3.13.- APLICACION

Los análisis de aceites se llevan a cabo en la mayoría de las industrias, y principalmente en aquellas en donde los procesos y actividades, se controlan por medio de sistemas hidráulicos y mecánicos.

Algunas industrias que aplican esta evaluación no destructiva son las siguientes:

- ❶ Industria petrolera.
- ❶ Industria automotriz.
- ❶ Industria aerospacial.
- ❶ Industrias de equipo minero.
- ❶ Industrias de equipo agrícola.
- ❶ Industrias de equipo marino.
- ❶ Industrias metalúrgicas.
- ❶ Industrias de acero.

## **IV.- TERMOGRAFIA INFRARROJA**

### **4.1.- ANTECEDENTES**

A inicios del siglo XIX, el astrónomo Inglés John William Herschel (1792-1871) descubrió la existencia de la radiación infrarroja mientras estudiaba el fenómeno de la luz solar. Al dirigir rayos de luz solar a través de un prisma de vidrio, Herschel generó el espectro del arco iris por la descomposición de la luz en sus colores y midió la temperatura de cada color. Notó que la temperatura de los colores se incrementaba de la luz violeta a la roja del espectro.

Después midió la temperatura en una región aparentemente desprovista de luz solar más allá de la porción roja del espectro y encontró que esa región tenía la temperatura más alta, además observó que estos rayos caloríficos eran reflejados, refractados, absorbidos y transmitidos como la luz visible. Estos rayos caloríficos más tarde se renombraron rayos infrarrojos o radiación infrarroja ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

La termoelectricidad es la conversión directa de calor en energía eléctrica o viceversa. El término se restringe generalmente a la conversión irreversible de electricidad en calor descrito por el físico Inglés James P. Joule (1818-1899) y a tres efectos reversibles llamados Seebeck, Peltier y Thomson, por sus descubridores respectivos.

El físico Alemán Thomas J. Seebeck (1770-1830) descubrió en 1820 que si un bucle se forma al unir los extremos de dos tiras de metales diferentes y los dos empalmes de los metales están a temperaturas diferentes, se genera una fuerza electromotriz o voltaje, que es proporcional a la diferencia de temperaturas entre las uniones. Un circuito de este tipo se llama termopar y un número de termopares conectados en serie se llama termopila.

En 1834, el físico Francés Jean C. A. Peltier descubrió un efecto inverso al efecto Seebeck, en el cual si una corriente pasa a través de un termopar, la temperatura en un

empalme aumenta y en el otro disminuye, por lo que el calor es transferido de un empalme al otro. La relación del calor transferido es proporcional a la corriente y la dirección de traslado se revierte si la corriente se revierte.

El físico Inglés William Thomson Kelvin (1824-1907) descubrió en 1854 que si existe una diferencia de temperaturas en cualquiera de los dos puntos de un conductor portador de corriente, el calor es generado y absorbido dependiendo del material. Este calor producido no es igual al calor de Joule (<http://lycos.infoplease.com>).

En 1888, el botánico Austríaco Freidrich Reinitzer descubrió los sólidos cristalinos líquidos, los cuales fueron los primeros materiales con cambio de color reversible. Con el aumento de temperatura, estos materiales se derriten creando un color compuesto que cambia a través de rojo, verde, azul y al final desaparece en negro, una vez que el compuesto se ha convertido en un líquido verdadero, se enfría y los colores se revierten.

Inicialmente estos materiales se usaron para uso común y fue hasta 1960 cuando se desarrollaron para utilizarse en los programas de la defensa y del espacio. Las mediciones termográficas han evolucionado con los materiales reversibles desde 1895 hasta 1991, cuando se separaron los cristales líquidos termocrómicos ([www.thermographics.com](http://www.thermographics.com)).

En la década de 1920, se hicieron las primeras observaciones infrarrojas de objetos estelares por los astrónomos Norteamericanos W.W. Coblentz, Edison Pettit, y Seth B. Nicholson. Los filtros de interferencia especial para telescopios, se introdujeron a inicios de la década de 1960. Las técnicas infrarrojas modernas emplean sistemas de detectores criogénicos para eliminar la obstrucción debida a la radiación infrarroja liberada por el equipo de detección ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

La termografía infrarroja inicio sus aplicaciones en la industria comercial como una herramienta del mantenimiento predictivo a mediados de la década de 1960 en Suecia. La Swedish Power Board usó esta tecnología para identificar "manchas calientes" en sus subestaciones ([www.ircameras.com](http://www.ircameras.com)).

En la década de 1970, los astrónomos comenzaron a considerar la posibilidad de poner un telescopio infrarrojo sobre un satélite en la órbita alrededor la Tierra. En 1977, Holanda, Estados Unidos y Gran Bretaña desarrollaron el satélite astronómico infrarrojo IRAS, el cual fue lanzado exitosamente seis años después, además de nuevos

descubrimientos astronómicos, este satélite detectó aproximadamente 350,000 fuentes infrarrojas y la emisión infrarroja muy fuerte de la interacción de las galaxias y de los rastros de polvo caliente llamados cirros infrarrojos.

A mediados de 1985, un telescopio infrarrojo voló a bordo del transbordador Space Shuttle's Spacelab 2 para complementar las observaciones hechas por la misión de IRAS. Cuatro años después, la NASA lanzó el satélite COBE para estudiar las características de las radiaciones infrarrojas y de microondas de la radiación cósmica. En marzo de 1995, Japón lanzó al espacio su primer satélite infrarrojo IRTS.

En noviembre de 1995, la Agencia Espacial Europea lanzó el observatorio espacial infrarrojo ISO, el cual también inspeccionó fuentes infrarrojas. En abril de 1996, fue lanzado el experimento espacial de medio curso MSX, que estudió la emisión infrarroja de gas y polvo ([isowww.estec.esa.nl](http://isowww.estec.esa.nl)).

Recientemente esta tecnología no destructiva de no contacto, se ha empezado a utilizar para reunir nueva información sobre objetos, estructuras y monumentos arquitectónicos y de interés histórico, y para ayudar en su conservación y restauración.

De esta manera, en 1993 un investigador usó fotografía infrarroja para dar a conocer detalles anteriormente invisibles sobre fragmentos de manuscritos del Mar Muerto y también en ese mismo año, la restauración de la Basílica de San Pedro en Roma se llevó a cabo por medio de varios métodos no destructivos incluyendo la termografía infrarroja ([www.eni.it](http://www.eni.it) y [www.ipac.caltech.edu](http://www.ipac.caltech.edu))

#### **4.2.- DEFINICION**

El monitoreo de termografía infrarroja es una tecnología de las evaluaciones no destructivas que utiliza instrumentos sensibles a la energía infrarroja, para determinar la distribución de temperaturas en áreas y equipos que a menudo son inaccesibles. La imagen de la cámara infrarroja es digitalizada y alimentada a una computadora, la cual asigna diferentes colores para diferentes temperaturas y así poder ver si hay puntos calientes en el equipo monitoreado (White, 1997). Esta técnica permite desarrollar una imagen térmica de la superficie de un material determinado para medir la radiación infrarroja emitida por dicho material ([www.eni.it](http://www.eni.it)).

Es un método no destructivo de no contacto y bastante simple para detectar problemas eléctricos inminentes, localiza manchas calientes que pueden ser descuidadas por inspecciones visuales ([www.x26.com](http://www.x26.com) y [www.heatseekr.com](http://www.heatseekr.com)). Las imágenes infrarrojas han sido empleadas para detectar continuidad en materiales y estructuras complejas ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

El sistema de imágenes térmicas infrarrojas, proporciona termografía cuantitativa avanzada y consiste en un método rápido, preciso y seguro de comprobar y mantener, además de identificar puntos calientes permite realizar cálculos y un diagnóstico preciso, dando así información útil al departamento de mantenimiento, ingenieros de diseño y operarios de la planta. Detecta problemas potenciales a menudo meses antes de ser detectados visualmente, determinando con esto las prioridades de mantenimiento entre los paros programados y el remplazo de componentes y equipos, como parte de un programa de mantenimiento predictivo ([www.comimsa.com.mx](http://www.comimsa.com.mx)).

La mayoría de los equipos mecánicos se componen de partes que están en constante movimiento. De la energía suministrada a un sistema o equipo, una cierta cantidad de energía es transformada por fricción o esfuerzo en energía térmica, la cual incrementa la temperatura de los componentes. Como los componentes mecánicos empiezan a fallar u operar en un modo indeseable, habrá un cambio en el modelo térmico normal del equipo frente al modelo térmico de un sistema adecuadamente activo.

El principio de esta aplicación se basa en la primera ley de la termodinámica, la cual dice que la energía no se crea ni se destruye, solo cambia desde una forma a otra. En general, la energía que usa un sistema eléctrico es definida por  $P = I^2R$ . En el caso de una conexión pobre u otro problema de alta resistencia, la energía eléctrica se transforma en energía térmica, la cual incrementa la temperatura al punto de resistencia más alta ([www.ircameras.com](http://www.ircameras.com)). La mayoría de la radiación emitida por una superficie moderadamente caliente es infrarroja en forma de un espectro continuo ([www.ipac.caltech.edu](http://www.ipac.caltech.edu)).

Esta evaluación no destructiva también se basa en el principio básico de que todos los objetos que se encuentran por arriba del cero absoluto irradian energía infrarroja, el nivel y longitud de onda de esta energía son proporcionales a la temperatura del objeto

([www.ipac.caltech.edu](http://www.ipac.caltech.edu) y [www.heatseekr.com](http://www.heatseekr.com)). La mayoría de los problemas eléctricos dentro de las instalaciones industriales son acompañados por incrementos de temperatura, las cámaras infrarrojas pueden recobrar cambios pequeños en la temperatura no identificables por el ojo humano ([www.x26.com](http://www.x26.com)).

La radiación infrarroja es una porción invisible del espectro de luz que se extiende desde 0.75 a 1,000 micrones y puede detectarse como una sensación de calor, todos los objetos más calientes que el cero absoluto emiten radiación infrarroja dentro de dicho rango ([www.infraredtraining.net](http://www.infraredtraining.net)). Esta gama infrarroja se divide en tres regiones que son infrarrojo cercano con longitudes de onda de 0.78 a 2.5 micrómetros, medio infrarrojo de 2.5 a 50 micrómetros y lejano infrarrojo de 50 a 1,000 micrómetros ([www.ipac.caltech.edu](http://www.ipac.caltech.edu)).

La imagen térmica ubica el área de alta resistencia remotamente para identificar áreas con temperaturas más altas, como la resistencia se eleva la severidad del problema se incrementa y si no se interviene el componente alcanzará un estado de falla catastrófica, que puede resultar en un incendio eléctrico o un paro total del sistema involucrado, lo que representa una situación peligrosa y costosa en cualquier industria.

Los instrumentos infrarrojos identifican estas anomalías eléctricas en un modo preciso, eficiente y seguro. La severidad del problema y la prioridad de reparación pueden ser determinadas por la categoría del incremento de temperatura de la falla y a los componentes activos bajo las mismas condiciones de carga ([www.ircameras.com](http://www.ircameras.com)).

Una luz visible o fotografía muestra la señal térmica del componente en cuestión. Estas imágenes son proyectadas lado por lado para una referencia rápida en un reporte para cada discrepancia. Mediante detectores, la radiación infrarroja se transforma en señales eléctricas o en una imagen visual la cual es proyectada a través de un monitor ([www.ipac.caltech.edu](http://www.ipac.caltech.edu)).

Comúnmente se establece una base de datos que contiene información del equipo relacionada con la temperatura permisible de funcionamiento e incrementos permisibles por arriba de la temperatura ambiente. Esta información se va registrando de acuerdo al avance del programa de inspección y el equipo se puede monitorear observando los cambios desfavorables en la temperatura a través del tiempo.

Es un hecho establecido que por cada 10 °C arriba de la temperatura máxima permisible de funcionamiento de un motor eléctrico, la vida de dicho motor se reduce a la mitad. Este daño es irreversible y se traduce en pérdidas de ganancias millonarias ([www.ircameras.com](http://www.ircameras.com)).

#### **4.3.- VENTAJAS**

Las principales ventajas que ofrece esta prueba no destructiva de no contacto, son las siguientes:

- ② Debido a que es una técnica de no contacto físico, permite monitorear equipos en operación sin interrumpir su funcionamiento, detectando con precisión y rapidez los problemas y sus características.
- ② Reduce los tiempos de paro de los equipos al disminuir la probabilidad de averías imprevistas.
- ② Muestra los antecedentes sobre las condiciones del lubricante y controla los cambios que se producen en las estructuras químicas de sus componentes. Es un método muy confiable para optimizar los períodos de cambio del lubricante.
- ② Determina las prioridades de mantenimiento entre los paros programados.

#### **4.4.- LIMITACIONES**

Las principales limitantes para llevar a cabo esta aplicación, estriban en que requiere de personal acreditado y competente, aunado a que el equipo necesario es muy sofisticado y a menudo poco disponible.

#### 4.5.- EQUIPO

El equipo básico que emplea la termografía infrarroja para monitorear materiales y estructuras, es el siguiente:

- ② Guías y estándares de referencia.
- ② Sensores de temperatura.
- ② Amplificador de señales.
- ② Termómetro infrarrojo.
- ② Monitor o proyector.
- ② Cámara infrarroja.
- ② Detectores.
- ② Termopares.
- ② Transductores.
- ② Cables y conectores.

#### 4.6.- APLICACIONES

La termografía infrarroja constituye una tecnología de las pruebas no destructivas de no contacto que se utiliza ampliamente, algunas aplicaciones son las siguientes:

- ② El monitoreo de termografía infrarroja se aplica durante el equipamiento de cualquier infraestructura industrial para determinar la eficiencia de aislamiento, optimizar el control de montaje y localizar puntos calientes y pérdidas de calor.
- ② Se emplea antes de los paros programados del mantenimiento para identificar áreas que requieren atención inmediata y después de estos para verificar y evaluar los trabajos de reparación.
- ② Inspecciona hornos, calderas, trampas de vapor y sistemas de vapor, donde detecta fugas de gas caliente, sobre-calentamiento, fallas en aislamientos refractarios y fugas subterráneas y evalúa la condición de las válvulas.
- ② Inspecciona la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, y sirve como una herramienta de inspección de primer nivel para la mayoría del equipo rotativo.

- ② Detecta líneas en mala condición, falsos contactos, fugas de vapor o fluidos en válvulas, circuitos abiertos, desbalanceo en acoplamientos, calentamiento de fusibles, incrementos de flujo de corriente y sobrecargas, determina el nivel de aceite en transformadores y evalúa la condición de instalaciones eléctricas, cableado, rodamientos, rotores, reductores y motores.
  
- ② Los equipos y componentes electrónicos y mecánicos que se monitorean con termografía infrarroja incluyen motores, bombas, ventiladores, cojinetes, ejes, mandos, poleas, cajas de engranajes, engranajes, conductores, conexiones, interruptores, circuitos, uniones, paneles de control, contactos, centros de carga, descargadores, control de motores, generadores, turbinas, transformadores, compresores, sistemas de transporte, instalaciones eléctricas y equipo de robótica.
  
- ② Monitorea sistemas de refrigeración y calefacción, radiadores, compresores, bombas, abanicos, estufas, tuberías de hornos, quemadores, aislamientos refractarios, en los cuales detecta pérdidas de energía, sobre-calentamiento, determina la eficiencia de intercambio de calor, distribución de vapor y temperaturas.
  
- ② Inspecciona construcciones de concreto, techos y envolventes, donde determina el deterioro en las edificaciones, localiza agua fría o caliente, líneas de vapor, daños por humedad en aislamiento y mala instalación, detecta fugas, pérdidas de calor y filtración de aire.
  
- ② Los satélites infrarrojos monitorean el estado del tiempo de la Tierra, rutinariamente miden las temperaturas de los océanos, monitorean la convección dentro de las nubes ayudando a identificar oportunamente tormentas y fenómenos meteorológicos potencialmente destructivos que comúnmente impactan al clima en todo el mundo.
  
- ② Mediante un análisis infrarrojo se determina el estado del aceite, proporcionando información sobre hollín sulfatos, productos de oxidación y nitración, glicoles, agua y correlación total de productos de degradación.

- ② En tanques de almacenamiento determina el nivel de llenado y detecta fugas de líquidos o gases, y válvulas defectuosas.
- ② En astronomía, los satélites infrarrojos y telescopios infrarrojos se utilizan para escudriñar los hoyos negros en la formación de estrellas y los corazones de galaxias de polvo.
- ② La imagen térmica infrarroja se emplea para descubrir miles de senderos y caminos antiguos, proporcionando información valiosa sobre civilizaciones desvanecidas.
- ② La tecnología infrarroja se usa en actividades de conservación de arte, en la autentificación y fechado de obra de arte, restauración de estructuras arquitectónicas y edificios antiguos, iglesias y pinturas. Detecta elementos estructurales ocultos, grietas, emplastos y depósitos en la humedad, pigmentos ajados en las pinturas antiguas de roca, mide la infiltración del agua en paredes y techos.
- ② En Geología la termografía infrarroja estudia los patrones de vegetación mediante satélites infrarrojos.
- ② En Arqueología, estudia la distribución de rocas, minerales y suelos.
- ② Es un instrumento de diagnóstico preventivo en la ingeniería civil para la inspección y control de estructuras, evalúa la existencia y magnitud de dispersión de calor de paredes, así como también la presencia de fugas de agua y rupturas.
- ② En el combate contra incendios, las cámaras infrarrojas localizan gente y animales atrapados en el humo, y detectan manchas calientes en incendios forestales.
- ② En la industria automotriz, monitorea la suspensión y el contacto de llantas en carros de carreras, evalúa los sistemas del motor y frenado, y determina la eficiencia de enfriamiento.

- ② En la medicina, la imagen infrarroja es una herramienta de diagnóstico muy útil, se usa para el análisis no invasivo de fluidos y tejidos del cuerpo. Examina daños médicos por contusión de la espina cervical, lesiones en la espalda y caja torácica. Monitorea enfermedades como el cáncer de seno, la artritis, lesiones o disfunción de la mandíbula, evaluación de daños deportivos y progreso de terapia. Es una herramienta utilizada por la Odontología, Oncología, Oculística y Ginecología. Examina lesiones, fracturas y cojera en caballos, rumiantes y animales domésticos.
  
- ② La imagen infrarroja se emplea en trabajos de seguridad y vigilancia secreta.
  
- ② Monitorea el medio ambiente y los niveles de contaminación.
  
- ② Se aplica en la evaluación de prototipos de diseño.
  
- ② Evalúa placas de circuitos impresos.

## V.- INSPECCION VISUAL

### 5.1.- ANTECEDENTES

La inspección visual se ha ido desarrollando paralelamente con el descubrimiento de las propiedades que intervienen en esta técnica y con la innovación de instrumentos con los cuales se lleva a cabo, principalmente de aquellos dispositivos que se utilizan para explorar partes internas de los equipos y materiales (Algaier et al, 1993).

A finales del siglo XVI, el Holandés Hans Jansen y su hijo Zacharias, inventaron el microscopio compuesto. A principios del siglo XVII el físico astrónomo Italiano Galileo Galilei (1564-1642) construyó un microscopio y un telescopio. Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723), fue el primer microscopista en ver protozoarios y bacterias y el primero en describir los glóbulos rojos de la sangre ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

El físico astrónomo Holandés Cristian Huygens (1629-1695), desarrolló la Teoría Ondulatoria, la cual dice que la luz resulta de la vibración molecular en materiales luminosos, tales vibraciones son transmitidas a través de éter en movimientos similares a las ondas y actúan sobre la retina del ojo estimulando a los nervios ópticos para producir la sensación visual.

La Teoría Corpuscular fue desarrollada por el físico matemático Inglés Isaac Newton (1642-1727), la cual dice que los cuerpos luminosos emiten energía radiante en partículas, las cuales son expulsadas intermitentemente en líneas rectas. Las partículas actúan sobre la retina del ojo, estimulando a los nervios ópticos para producir la sensación de luz (Algaier et al, 1993).

En 1714, el físico Alemán Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736) inventó el termómetro de mercurio, el cual a partir de 1866 se empezó a utilizar como una herramienta clínica de uso general ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)). En 1806, Philipp Bozzini anunció en Frankfurt la invención del Lichtleiter, considerado como el primer endoscopio, el cual fue utilizado en la medicina durante la guerra napoleónica.

En 1816, René-Théophile-Hyacinthe Laënnec (1781-1826) inventó el estetoscopio y años más tarde, Hermann von Helmholtz (1821-1894) desarrolló el oftalmoscopio. En 1866, Thomas Clifford Allbutt desarrolló un termómetro de bolsillo.

El físico Escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), desarrolló la Teoría Electromagnética, la cual dice que los cuerpos luminosos emiten luz en forma de energía radiante, la cual es propagada en forma de ondas electromagnéticas, mismas que actúan sobre la retina del ojo estimulando a los nervios ópticos para producir la sensación de luz.

El físico Alemán Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), desarrolló la Teoría del Quantum que se desprende de la Teoría Corpuscular, y dice que la energía es emitida y absorbida en discretos cuantos (fotones) y que la energía en cada quantum es el producto de  $h\nu$ , donde  $h$  es la constante de Planck e igual a  $6.626 \times 10^{-34}$  J/s y  $\nu$  la frecuencia en Hz.

La Teoría Unificada de la energía radiante fue desarrollada por el físico Franco-Italiano Luis De Broglie (1892-?) y el físico Alemán Werner Heisenberg (1901-1976), la cual dice que cada movimiento de un elemento de la masa es asociado con una onda, cuya longitud está dada por  $\lambda = h/(mv)$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda del movimiento ondulatorio, medido en metros,  $h$  es la constante de Planck e igual a  $6.626 \times 10^{-34}$  J/s,  $m$  es la masa de la partícula en kg y  $\nu$  la velocidad de la partícula en m/s (Algaier et al, 1993).

En 1876, el científico Suizo Max Nitze desarrolló el primer cistoscopio práctico al que más tarde le adaptaron una bombilla eléctrica antes que la luz eléctrica se usara en Estados Unidos. Dos años más tarde el físico Estadounidense Thomas Alva Edison (1847-1931) inventó la lámpara incandescente. En 1900, Reinhold Wappler revolucionó el sistema óptico del cistoscopio y produjo los primeros modelos Americanos. Después se introdujo el sistema de visión oblicua que tuvo grandes aplicaciones en la medicina y en los materiales.

El boroscopio fue desarrollado en 1921 por George Sumner Crampton y una década después el gastroscopio flexible por Rudolph Schindler, a partir de estos instrumentos con fines médicos se innovó el boroscopio flexible, el cual se enfocó a la aplicación industrial. Con la invención del boroscopio, la inspección visual adquirió

importancia durante la segunda guerra mundial por su gran aplicación en la inspección de armamento, turbinas de vapor en barcos de guerra, tanques de guerra y en las posiciones de avance de los soldados.

Este dispositivo fue el primer instrumento óptico confiable en la inspección de vidrios resistentes a la radioactividad. En 1946 se desarrolló un boroscopio de luz ultravioleta para pruebas fluorescentes en el interior de hélices cóncavas de acero. A finales de la década de 1950, se adaptó al boroscopio un monitor de televisión para realizar una evaluación automática en hélices en helicópteros, este sistema tuvo aplicación durante la guerra de Vietnam. En 1962, John Lang desarrolló la resistencia óptica a la radiación del boroscopio para ampliar su uso en ambientes de altas temperaturas (Algaier et al, 1993).

En 1976, la Sociedad Americana de Pruebas No Destructivas (ASNT) inició la certificación de inspectores visuales y un año después, la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) implementó un programa para certificar inspectores para las pruebas visuales en soldaduras. Hasta 1993, la inspección visual no había sido considerada como un método no destructivo separado de otras evaluaciones dentro de la Organización Internacional de Estándares (ISO). Actualmente esta es citada en la mayoría de los estándares y prácticas de las sociedades más importantes relacionadas con las pruebas no destructivas (ILOG, 1996).

## **5.2.- DEFINICION**

La inspección visual es una técnica de las evaluaciones no destructivas usada extensivamente para evaluar la condición y calidad de soldaduras y componentes (NDTA 1996), utilizando solamente la vista entrenada o auxiliándose de accesorios externos, sin alterar o destruir el objeto de prueba (ILOG, 1996).

Su principal aplicación es la inspección de soldaduras donde detecta rápidamente y corrige defectos y problemas relacionados a este proceso. Es el método de evaluación primaria de muchos programas de control de calidad (NDTA 1996). El proceso de diagnosis consiste en determinar la naturaleza de un defecto o desorden, el término proviene del vocablo griego “gnosis” que significa conocimiento ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

Esta prueba no destructiva requiere de buena visión e iluminación y conocimiento de lo que se está mirando. Además de descubrir discontinuidades y anomalías, se deben evaluar y conocer las causas que hacen el producto defectuoso, por lo que debe llevarse a cabo por un inspector visual acreditado y calificado, con un programa eficiente de garantía de calidad capaz de detectar y disuadir fallas (Shankles, 1999).

La inspección visual puede ser mejorada por varios instrumentos que consisten desde lentes de aumento de bajo poder hasta boroscopios que emplean sistemas de cámaras de televisión. Mediante esta técnica se identifica donde una falla es más probable que ocurra y el momento en que esta ha comenzado. Posterior a esta prueba, se aplican otros métodos no destructivos de inspección superficial para identificar defectos no detectables a simple vista.

El examen visual directo se efectúa cuando hay acceso suficiente para colocar el ojo a menos de 60 cm de distancia y a un ángulo de 30" de la superficie examinada, y con buena iluminación. El examen visual remoto se realiza con boroscopios en áreas no accesibles y carentes de iluminación (ILOG, 1996).

Los boroscopios utilizan fibra óptica constituida por un filamento de 0.01 mm de diámetro, transparente y revestido por una capa reflectora de aluminio u otro material similar. La luz se transmite a través del filamento por reflexiones sucesivas sobre la pared cilíndrica del hilo, de modo que la luz sigue el mismo trayecto de este. Un haz de hilos o fibras ópticas es capaz de transmitir una imagen de un punto del espacio a otro siguiendo un trayecto cualquiera (Algaier et al, 1993).

### **5.3.- VENTAJAS**

La inspección visual como una tecnología de las pruebas no destructivas, ofrece las siguientes ventajas:

- ③ Su aplicación es muy simple y rápida.
- ③ Es una técnica no cara.
- ③ No requiere mucho entrenamiento.
- ③ El equipo que se requiere es mínimo.

- ③ Usualmente no requiere de equipo especializado.
- ③ Puede llevarse a cabo con el equipo en operación.
- ③ Proporciona confianza en los sistemas de seguridad y da las bases para mejorar y perfeccionar aquellas actividades que pueden resultar extremadamente desagradables y costosas, cuando se trabaja con presiones y temperaturas muy elevadas.

#### **5.4.- LIMITACIONES**

A pesar de su simplicidad, la inspección visual implica una serie de aspectos relacionados con el alcance de la misma y con el punto de vista del personal que la realiza. Algunas desventajas son las siguientes:

- ③ Debe realizarse por personal calificado.
- ③ Solo se detectan discontinuidades superficiales.
- ③ Puede producir errores de apreciación del técnico.
- ③ Depende de la capacidad visual del técnico.
- ③ Algunos equipos son costosos.

#### **5.5.- FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE INSPECCION VISUAL**

Los principales factores que afectan la detección de discontinuidades en el proceso de inspección visual, son los siguientes:

**ACABADO O TEXTURA:** Existen estándares que se refieren a las irregularidades geométricas superficiales, tales como la rugosidad y los instrumentos para medirla.

**LIMPIEZA:** Las superficies sujetas a inspección deben estar libres de cualquier material que pudiera interferir con la inspección.

**ILUMINACION:** La iluminación es un factor indispensable para realizar el examen visual, el personal debe someterse periódicamente a exámenes de la vista.

**BRILLO:** El brillo fotométrico o luminancia en la inspección visual es importante debido a que el ojo no ve iluminación sino brillo.

**CONTRASTE:** El contraste compensa los altos niveles de iluminación y los escasos niveles de brillo.

**TEMPERATURA:** Las temperaturas extremas pueden contraer o dilatar las superficies de los objetos de prueba y causar errores en la interpretación de la condición.

**TAMAÑO:** Es el factor más aceptado y reconocido en el proceso visual, ya que cuanto mayor sea el ángulo bajo el cual se ve el objeto, más rápidamente podrá ser visto.

**TIEMPO:** El proceso visual utiliza cámaras fotográficas, las fotografías son de larga exposición en condiciones de escasa luz e instantáneas con buena iluminación.

**RESOLUCION:** Es la facultad para distinguir dos puntos o líneas cercanas entre sí, el ojo humano resuelve un minuto de arco equivalente de 0.17 mm a 60.8 cm.

## **5.6.- EQUIPO**

El equipo básico para llevar a cabo la inspección visual, consta de los siguientes accesorios:

- ③ Guías y estándares de referencia.
- ③ Espejos planos y curvos.
- ③ Lentes y lupas.
- ③ Microscopios.
- ③ Boroscopios rígidos y flexibles.
- ③ Cámaras de televisión.
- ③ Patrones de calibración.
- ③ Fuentes de iluminación.

## **5.7.- PROCEDIMIENTO DE INSPECCION VISUAL**

El proceso de inspección visual se define mediante la aplicación de la metodología Fidrier, la cual consiste en lo siguiente:

1.- FENOMENO PRIMARIO: Consiste en conocer las propiedades de la vista y de la luz tales como la reflexión, refracción, dispersión y difracción.

2.- INTERACCION: Estas propiedades interaccionan con los materiales translúcidos, transparentes y opacos, para mostrar sus características tales como la composición química, condiciones superficiales, configuración geométrica, características dimensionales y condiciones de servicio a las que están expuestos.

3.- DETECCION: Se obtiene información detectando los defectos que presentan los materiales, auxiliándose con el equipo necesario.

4.- REPRESENTACION: La información obtenida se representa mediante fotografías, réplicas, dibujos, diagramas o croquis.

5.- INTERPRETACION: Las indicaciones detectadas se identifican, clasifican y caracterizan, para conocer su forma, orientación, magnitud, distribución y localización.

6.- EVALUACION: Integrar toda la información para determinar si son condiciones normales, anormales, si están dentro o fuera de especificación o normativa, para dar un dictamen técnico de aceptación o rechazo de la parte examinada.

7.- REGISTRO: Todo el proceso se describe en registros de inspección y un informe final, para servir como base de datos para inspecciones futuras y aclaraciones.

## 5.8.- APLICACION

Las principales aplicaciones de la inspección visual como una prueba no destructiva, son las siguientes:

- ③ Determina la condición de las superficies de componentes con relación a fracturas, desgaste, corrosión, erosión, daños físicos, evidencias de fuga, condiciones mecánicas y estructurales, partes faltantes, tipos de ajuste, lecturas, sellos, juntas y acoplamientos en mal estado, entre otros.
  
- ③ Tiene aplicación industrial en la inspección de los procesos metalúrgicos y en el monitoreo de estructuras. En materiales metálicos permite detectar inclusiones, falta de homogeneidad, grietas, imperfecciones, indicaciones y discontinuidades apreciables a simple vista.
  
- ③ Es un método efectivo de control de calidad en soldaduras de estructuras, en donde la inspección visual se realiza antes, durante y al terminar el proceso de soldadura. Detectando discontinuidades tales como desgarres, grietas, contracciones, inclusiones de escoria, porosidad, venas, colas de rata, lapaduras, foleaduras, rayaduras, marcas de corte, depresiones, insertos, reparaciones por soldadura y rugosidad superficial.
  
- ③ Mediante esta prueba se inspeccionan recipientes de reactores a presión, bombas, válvulas, ensamble y atornillado de estructuras, análisis de textura y acabado de automóviles, estructuras de aeronaves, cerámicas, conductos de gas, materiales compuestos.

## **VI.- LIQUIDOS PENETRANTES**

### **6.1.- ANTECEDENTES**

La inspección con líquidos penetrantes es un método no destructivo muy antiguo, sus primeras aplicaciones se llevaron a cabo a finales de 1890 en equipo de ferrocarril, para la detección de grietas gruesas en rieles mediante el método de aceite y blanco de España (McKelvey, 1980).

En 1930, esta técnica empleaba aceite sucio de motor como líquido penetrante, gasolina y paños para limpiar las superficies, y tiza en polvo como un medio absorbente (Hands, 1999). El método de penetrante fluorescente lavable en agua fue desarrollado a finales de 1941, un año más tarde por medio de líquidos penetrantes se inspeccionaron materiales no magnéticos con alta sensibilidad, tales como el Cobre, Aluminio y bronce.

En 1957, se desarrolló el método de los emulsificantes y tres años después, los avances y desarrollos en esta técnica se centraron en el mejoramiento de penetrabilidad y visibilidad de los líquidos penetrantes. A principios de la década de 1970, se estudió sobre la remoción de los excesos de penetrante en las superficies para poder aplicar el desarrollador, de esta manera surgieron los procesos de remoción hidrofílica y lipofílica (Boisvert et al, 1986)

### **6.2.- DEFINICION**

La prueba de líquidos penetrantes es una técnica de las evaluaciones no destructivas que consiste en la aplicación de líquidos especiales a la superficie bajo inspección, para detectar y revelar imperfecciones abiertas a la superficie (McKelvey, 1980). Es un método que revela la presencia de discontinuidades superficiales por el drenado de un tinte coloreado o fluorescente desde la imperfección (NDTA, 1996).

Aunque es el método menos complejo de las pruebas no destructivas, es altamente sensitivo ([www.csndt.org](http://www.csndt.org)). Esta evaluación se emplea para complementar otros métodos de examinación y es una herramienta de inspección en servicio (Shankles, 1999), se aplica en una amplia gama de materiales no porosos, tales como metales ferrosos y no ferrosos, plásticos, vidrios, y es una de las pocas técnicas de inspección que puede inspeccionar cerámicas ([www.mr-chemie.de](http://www.mr-chemie.de) y Hands, 1999).

Los líquidos penetrantes son químicos generalmente basados en aceite, con colorantes, tintes visibles o fluorescentes, que pueden viajar a través de las superficies abiertas por acción capilar. Los líquidos penetrantes tienen características específicas, tales como una alta capacidad de penetración, no se evaporan, tienen alta afinidad con el revelador, forman partículas muy finas, generalmente son de color o fluorescencia muy estable, no reaccionan con el material sujeto a inspección, son inodoros, atóxicos e inflamables (McKelvey, 1980).

El principio de operación de este ensayo se basa en la habilidad que tiene un líquido para ser extraído dentro de una imperfección superficial por acción capilar (NDTA, 1996). Después de un período de tiempo de reposo, los excesos del penetrante de la superficie son removidos y se aplica un desarrollador, el cual absorbe y extrae el penetrante desde las discontinuidades para revelar su presencia ([www.britanica.com](http://www.britanica.com) y [www.imagineering-inc.com](http://www.imagineering-inc.com)).

Existen tres tipos de líquidos penetrantes; fluorescentes, que emiten radiación visible cuando son excitados por luz ultravioleta, de tinte visible, que requieren de luz blanca, y de sensibilidad dual o doble propósito, que producen contrastes fluorescentes y de colores visibles (McKelvey, 1980). Los penetrantes coloreados requieren de buena luz blanca mientras que los penetrantes fluorescentes requieren de condiciones oscuras con luz ultravioleta o luz negra.

La aplicación del líquido penetrante se puede realizar por cepillado, rociado o inmersión y sus límites de detección dependen de la rugosidad de la superficie del área a ser inspeccionada. La detección de las dimensiones de las discontinuidades más pequeñas bajo condiciones óptimas está en el orden de 1.0 a 3.0 mm de largo por 0.05 a 0.1 mm de profundidad (Hands, 1999).

### 6.3.- PROPIEDADES DE LOS LIQUIDOS PENETRANTES

Los líquidos penetrantes deben tener características y propiedades específicas para que la inspección mediante esta prueba no destructiva se realice eficientemente, las principales propiedades de tales líquidos son las siguientes (McKelvey, 1980):

**PENETRABILIDAD:** Propiedad de los líquidos que incluye variables que dependen de la condición de la superficie, tipo de material y penetrante, temperatura y contaminación.

El parámetro de penetración estática (SPP), se define por  $SPP = r_l \cos\theta$ , donde  $r_l$  es la tensión de la superficie de la interface aire-líquido y  $\cos\theta$ , el ángulo de contacto entre la interface aire-líquido y la interface sólido-líquido de la grieta.

El parámetro de penetración cinética (KPP), expresa la habilidad del penetrante para formar una indicación suficientemente grande para ser detectada visualmente, y se define por la relación  $KPP = (r_l \cos\theta)/n$ , donde  $(r_l \cos\theta)$  es el parámetro de penetración estática y  $n$ , la viscosidad del líquido penetrante.

**VISCOSIDAD:** Es el resultado de la fricción interna o molecular, debe ser baja en los líquidos penetrantes para facilitar su atomización y penetración en las cavidades de las discontinuidades.

**HABILIDAD DE MOJADURA:** Propiedad que afecta la penetración de los líquidos y características de remoción, es controlada por el ángulo de contacto y tensión de la superficie del penetrante.

**GRAVEDAD ESPECIFICA:** Es una comparación de la densidad de un penetrante con la densidad del agua destilada a 4 °C, el penetrante debe tener una gravedad específica menor a 1 para asegurar que el agua no flotará sobre el penetrante.

**FLAMABILIDAD:** La flamabilidad de los aceites penetrantes se refiere a su punto de inflamación, la temperatura mínima de flamabilidad es de 60 °C.

**VOLATILIDAD:** Se caracteriza por la presión del vapor o punto de ebullición de un líquido, una baja volatilidad es deseable para penetrantes almacenados en tanques abiertos, penetrantes con una alta volatilidad se secarán más rápidamente durante el tiempo de reposo en la superficie de prueba y dejarán una película difícil de remover.

**ACTIVIDAD QUIMICA:** Se refiere a la compatibilidad entre el penetrante y el material de prueba, los penetrantes con Cloro, Clorina o Azufre son restringidos en Aceros Austeníticos, Titanio y Aceros al alto Níquel.

**LAVABILIDAD:** Se refiere a que los penetrantes sean lavables en agua, la rugosidad de la pieza a prueba tiene un efecto en la prueba.

**CONDUCTIVIDAD ELECTRICA:** Esta se incrementa cuando se aplica el penetrante con pistolas, la viscosidad debe ser baja para que al atomizarlo se divida en componentes muy pequeños y penetre con facilidad en las grietas.

#### **6.4.- VENTAJAS**

Las principales ventajas que ofrece la prueba no destructiva de líquidos penetrantes, son las siguientes:

- ④ Sus principios de aplicación son simples.
- ④ Se puede inspeccionar una amplia gama de materiales.
- ④ Las indicaciones aparecen directamente en la pieza que se está analizando.
- ④ Se adapta rápidamente a la inspección en producción.
- ④ Alta sensibilidad en grietas superficiales finas y estrechas.
- ④ Es una evaluación rápida y no-cara.

## 6.5.- LIMITACIONES

Las desventajas que presenta la inspección utilizando líquidos penetrantes, son las siguientes:

- ④ Solo se detectan fallas abiertas a la superficie.
- ④ La superficie de prueba debe estar limpia y seca.
- ④ No se pueden inspeccionar componentes de hule o plástico.
- ④ No es aplicable en materiales o superficies porosas.
- ④ El método de prueba requiere que todos los materiales sean compatibles.
- ④ Requiere de protección para evitar contacto con la piel o la respiración de humos y vapores.

## 6.6.- EQUIPO

El material para realizar la prueba no destructiva de líquidos penetrantes consta de equipo portátil y estacionario:

### **Equipo portátil:**

- ④ Penetrantes.
- ④ Fluorescentes.
- ④ Solventes.
- ④ Revelador.
- ④ Limpiador.
- ④ Brochas.
- ④ Lámparas de luz ultravioleta.
- ④ Guías y estándares de referencia.

### **Equipo estacionario (tanques en línea):**

- ④ Estación de secado.
- ④ Estación de aplicación.
- ④ Estación de emulsificación.
- ④ Estación de enjuague.
- ④ Estación de revelado.
- ④ Estación de drenado.
- ④ Estación de inspección.
- ④ Tablero de control.

## **6.7.- PROCEDIMIENTO DE LIQUIDOS PENETRANTES**

El procedimiento para llevar a cabo esta prueba no destructiva (McKelvey, 1980 y [www.mr-chemie.de](http://www.mr-chemie.de)), consta de los siguientes pasos:

1.- PRE-LIMPIEZA: Consiste en eliminar de la superficie de prueba grasas, aceites, herrumbre y otros contaminantes, utilizando solventes, agentes lavables, agua, detergentes, vapor, removedores o ultrasonido.

2.- APLICACION: La aplicación del penetrante se hace por rociado, cepillado o inmersión, el tiempo de penetración puede variar desde 5 hasta 30 minutos de acuerdo a la especificación.

3.- REMOCION DEL PENETRANTE EXCESIVO: La aplicación del medio de remoción se hace de tal forma que ningún penetrante es removido desde las discontinuidades. El tipo de removedor depende del tipo de penetrante, siendo de agua y solventes para líquidos lavables en agua, emulsificantes para penetrantes post-emulsificables y luz ultravioleta para penetrantes fluorescentes.

4.- SECADO: Consiste en absorber el penetrante de las discontinuidades mediante un horno secador a 107 °C o al aire libre por 5 minutos.

5.- APLICACION DEL REVELADOR: El revelador es un material que se aplica mediante inmersión o un rociado delgado y uniforme a la superficie de prueba para atraer al penetrante de las discontinuidades y contrastar las indicaciones, el tiempo de revelado es de 7 a 30 minutos. En penetrantes fluorescentes se emplea un polvo seco como revelador.

6.- INSPECCION: La inspección es el examen visual, interpretación y evaluación de las indicaciones de la pieza de prueba. Esta se hace con luz del día en penetrantes visibles y con luz ultravioleta si se aplicaron penetrantes fluorescentes.

7.- POST-LIMPIEZA: Es la remoción de líquidos penetrantes residuales de la pieza de prueba para prevenir la corrosión, puede realizarse por cualquier método apropiado.

## **6.8.- APLICACION**

Las principales aplicaciones de la prueba no destructiva mediante líquidos penetrantes, son las siguientes:

- ④ Se aplica en la industria metalúrgica para detectar imperfecciones en los procesos de fundición, soldaduras, forjado, maquinado y ensamble. Detectando discontinuidades tales como porosidad, contracciones, cavitación, inclusiones de arena o escoria, grietas, venas, dobleces, laminaciones, esmerilados, rechupes, quemaduras, escamas, deformación, desgarres, insertos, adherencia deficiente y juntas soldadas en circuitos electrónicos, entre otras.
- ④ Se aplican en materiales no metálicos, tales como plásticos y cerámicas, en donde inspeccionan los procesos y equipos que incluyen el moldeado y fraguado térmico de plásticos, cerámicas no porosas y vitrificadas, bujías, enchufes, implantes ortopédicos de nylon y teflón, piedra ornamental para aplicaciones arquitectónicas, repisas de laboratorio, fregaderos y vidrios. En aislantes de plástico esta prueba permite detectar a tiempo grietas y desperfectos que pueden causar cortos circuitos.
- ④ La industria aeroespacial aplica los líquidos penetrantes en el mantenimiento y revisión de la estructura, fuselaje y motores de aviones y naves aéreas, debido a que muchos de los metales usados son no magnéticos.

## **VII.- PARTICULAS MAGNETICAS**

### **7.1.- ANTECEDENTES**

En 1868, la publicación de ingeniería británica reportó la localización de discontinuidades en cañones usando un compás magnético para registrar el flujo, y ocho años después A. Hering por medio de un compás de aguja detectó discontinuidades en rieles ferroviarios (Shmidt et al, 1989).

En 1918, William E. Hoke descubrió la magnetización longitudinal y observó que las rebabas eran atraídas hacia las grietas en partes sostenidas en un portaaguja magnético, mediante la operación de pulido. Una década después Alfred Victor de Forest descubrió la magnetización circular y seis años después junto con F. B. Doane, inició MAGNAFLUX Corporation.

En 1935, las compañías Wright y General Electric, aplicaron partículas finas suspendidas en líquidos similares al petróleo y en aceite ligero, y un año más tarde, F. Hunder y R. S. Hilpert sugirieron que las partículas magnéticas podían ser suspendidas en agua mediante la adición de agentes humectantes e inhibidores de herrumbre.

A finales de la década de 1930, la técnica de partículas magnéticas fue utilizada para detectar grietas por fatiga y discontinuidades en rieles ferroviarios, partes móviles de locomotoras de vapor y en la industria automotriz, e inició la innovación sobre aparatos para realizar ésta prueba. En 1941 se introdujeron las partículas magnéticas fluorescentes. Años más tarde, esta prueba y la de penetrantes fluorescentes, permitieron la construcción de la primera bomba atómica y del primer reactor atómico.

A partir de 1940, la industria petroquímica inspeccionó su infraestructura y equipo con partículas magnéticas, y muchas industrias de acero consideraron ésta técnica como un medio que incrementaba los rendimientos. Durante la segunda guerra mundial, se inspeccionaban estructuras soldadas en armamento, vehículos y naves aéreas.

## 7.2.- DEFINICION

La prueba con partículas magnéticas es una tecnología de las evaluaciones no destructivas que consiste en la aplicación de un material ferromagnético finamente dividido con la capacidad de ser magnetizado individualmente y atraído a las distorsiones en un campo magnético, para detectar la presencia de grietas y otras discontinuidades no lineales en aleaciones de acero y otros materiales similares (Shmidt et al, 1989 y [www.mr-chemie.de](http://www.mr-chemie.de)), en donde la superficie del componente a ser inspeccionado se magnetiza completa o localmente (Hands, 1999).

Es una prueba electromagnética que sirve de ayuda a la examinación visual y revela imperfecciones no detectadas por radiografía, su efectividad disminuye rápidamente dependiendo del tipo y profundidad del defecto (NDTA, 1996), se puede aplicar en cualquier material ferromagnético (Shankles, 1999). Es más efectiva en la detección de discontinuidades alargadas que en las de forma redondeada ([www.csndt.org](http://www.csndt.org)).

El principio de operación de este ensayo consiste en que el flujo magnético en un objeto magnetizado es localmente distorsionado por la presencia de una discontinuidad, esta distorsión causa que parte del flujo magnético salga y vuelva a entrar en la discontinuidad del objeto a prueba y al aplicar partículas finas de hierro al área de interés, se revela su presencia (NDTA, 1996 y [www.imagineering-inc.com](http://www.imagineering-inc.com)).

El flujo magnético escapa desde los lados de la ruptura indicando su localización debido a que la corriente magnética está en una apropiada dirección relativa a la discontinuidad (Hands, 1999), la imperfección puede mostrarse mejor si el campo magnético es vertical a esta ([www.mr-chemie.de](http://www.mr-chemie.de)).

La magnetización del material ferromagnético, consiste en la aplicación de un campo magnético mediante una corriente por contacto directo a través de un material no conductor y mediante corriente inducida a través de una bobina, conductor central o yugo magnético (Shmidt et al, 1989). Comúnmente esta se realiza con un yugo, el cual se instala en un banco de prueba para que el material sea completamente magnetizado, si las discontinuidades se muestran en direcciones diferentes se pueden aplicar dos o más métodos de magnetización simultáneamente.

Se emplean polvos secos o tintes, que pueden ser fluorescentes o coloreados. El método húmedo utiliza tintas y es más sensitivo que el método seco, en este el polvo magnético es suspendido en un agente húmedo que puede ser aceite o agua con aditivos. En el método seco el material se rocía con polvo magnético seco, este método es aplicado para mostrar discontinuidades grandes y para inspeccionar materiales calientes ([www.mr-chemie.de](http://www.mr-chemie.de)).

Las partículas son suspendidas en un medio líquido para mejorar la fluidez a menudo de hidrocarburos y se colorean para mejorar el contraste. En las aplicaciones más sensibles se usan partículas cubiertas con fluorescentes y la inspección se efectúa con luz ultravioleta (Hands, 1999). La evaluación consiste de tres operaciones básicas; se establece el flujo magnético adecuado en el objeto de prueba, se aplican las partículas magnéticas, secas o húmedas, suspendidas en un líquido colorante o fluorescente, y se examina el objeto de prueba bajo condiciones adecuadas de iluminación para interpretar y evaluar las discontinuidades.

Los factores que afectan la inspección con partículas magnéticas incluyen la composición de la aleación, condición de la pieza, geometría de la parte a prueba, tipo de corriente eléctrica, dirección del campo magnético, determinación del amperaje y secuencia de operación, condiciones de iluminación, medios de contraste (Shmidt et al, 1989).

La detección de las imperfecciones depende de la condición superficial del área a ser inspeccionada, los defectos deben ser menores a tres veces la rugosidad de la superficie. Bajo condiciones óptimas y con buenas superficies, se pueden detectar imperfecciones de aproximadamente 0.5 mm de largo y 0.02 mm de profundidad (Hands, 1999).

### **7.3.- PROPIEDADES DE LAS PARTICULAS MAGNETICAS**

Las partículas magnéticas deben tener características y propiedades específicas para que la inspección mediante esta prueba no destructiva se realice eficientemente, las principales propiedades de tales partículas son las siguientes (Shmidt et al, 1989):

**PERMEABILIDAD:** Es la facilidad que tiene un material para ser magnetizado y la habilidad del mismo para conducir líneas magnéticas de fuerza.

**RELUCTANCIA:** Es la resistencia magnética o posición de un material para conducir líneas de fuerza.

**RETENTIVIDAD:** Es la habilidad de un material para retener o mantener una porción del magnetismo después de ser influenciado por un campo magnético.

**PUNTO DE SATURACION:** Es el punto para un material magnetizante donde con cualquier incremento en la fuerza magnetizante ya no se incrementa la densidad del flujo.

**MAGNETISMO RESIDUAL:** Es la cantidad de magnetismo que un material retiene después de que la fuerza magnetizante ha sido removida.

**DIAMAGNETICO:** Aquellos materiales que no son atraídos por el magnetismo, repelen las líneas de fuerza de regreso al aire, como el Cobre.

**PARAMAGNETICO:** Son materiales que tienen ligera atracción al magnetismo, como el Aluminio.

**FERROMAGNETICO:** Materiales que tienen una alta atracción al magnetismo, como Hierro, Níquel, Cobalto y aleaciones de acero.

#### **7.4.- VENTAJAS**

Las ventajas que ofrece la prueba no destructiva de partículas magnéticas, son las siguientes:

- ⑤ Es una prueba de operación rápida y simple.
- ⑤ Sensitiva para la detección de grietas superficiales poco profundas.
- ⑤ Las indicaciones se observan sobre la pieza de prueba.
- ⑤ El método a menudo puede trabajar a través de contaminantes y recubrimientos.
- ⑤ El método puede ser automatizado.
- ⑤ Ciertas formas del método pueden ser relativamente poco costosas.

#### **7.5.- LIMITACIONES**

Las desventajas que presenta la inspección mediante partículas magnéticas, son las siguientes:

- ⑤ Solo se pueden inspeccionar materiales ferromagnéticos.
- ⑤ No se pueden inspeccionar materiales no magnéticos, tales como el vidrio, cerámica, plásticos, Aluminio, Cobre, Magnesio y aleaciones de acero inoxidable austenítico.
- ⑤ La detección de fallas sub-superficiales está limitada.
- ⑤ Su efectividad disminuye rápidamente dependiendo de la profundidad y tipo de imperfección.
- ⑤ Debe existir una relación apropiada entre la dirección del campo magnético y la discontinuidad o imperfección.
- ⑤ En algunas ocasiones se requiere desmagnetizar los materiales que se van a inspeccionar, principalmente en soldaduras para evitar chisporroteo con el arco.
- ⑤ En piezas con geometría compleja, pueden surgir problemas para determinar el amperaje y la distribución del campo magnético.
- ⑤ Hay riesgos de quemaduras y arcos en las piezas de prueba cuando se usan métodos de contacto directo.

## 7.6.- EQUIPO

El equipo básico requerido para llevar a cabo la inspección con partículas magnéticas, es el siguiente:

- ⑤ Guías y estándares de referencia.
- ⑤ Lámparas de luz ultravioleta.
- ⑤ Puntas de contacto.
- ⑤ Bulbo para aplicar polvo seco.
- ⑤ Medidor del campo magnético.
- ⑤ Cables, conectores y adaptadores.
- ⑤ Amperímetros.
- ⑤ Cámara desecante higroscópica.
- ⑤ Balanza y microscopio.
- ⑤ Lentes.
- ⑤ Yugos.
- ⑤ Partículas magnéticas (polvo de hierro).
- ⑤ Lámparas de luz visible.
- ⑤ Sistemas de revestimiento.
- ⑤ Equipo de rociado.
- ⑤ Control de corriente.
- ⑤ Conductor central.
- ⑤ Fibroscopio.
- ⑤ Bomba de vacío.
- ⑤ Bobina.
- ⑤ Limpiador y agitadores.
- ⑤ Equipo de desmagnetización.

## 7.7.- PROCEDIMIENTO DE PARTICULAS MAGNETICAS

El procedimiento para llevar a cabo esta prueba no destructiva, consta de los siguientes pasos (Shmidt et al, 1989):

1.- PRE-LIMPIEZA Y SECADO DE LA PIEZA DE PRUEBA: Consiste en eliminar grasas, aceites, herrumbre y otros contaminantes de la superficie de prueba, con solventes, agentes lavables, agua, detergentes, vapor, removedores o ultrasonido.

2.- ESTABLECIMIENTO DE UN CAMPO CIRCULAR: Consiste en pasar una corriente longitudinalmente a través del conductor central. Si una grieta cruza el flujo circular de inmediato se crean los polos norte y sur en cualquier parte de la discontinuidad, y las partículas magnéticas aplicadas son atraídas por este flujo magnético.

3.- INSPECCION DE INDICACIONES LONGITUDINALES: Es el examen visual, interpretación y evaluación de las indicaciones longitudinales de la pieza de prueba. Requiere de iluminación con luz negra.

4.- DESMAGNETIZACION (opcional): Es la reducción del magnetismo residual a un nivel aceptable para que no interfiera en los procesos adicionales o servicios de limpieza. Esta se realiza por fuerza a través de presión o vibración, exposición a altas temperaturas o exposición a un campo magnético adicional. Para desmagnetizar el campo de flujo, se debe tener un cambio reversivo continuo de polaridad y una reducción gradual de la fuerza del flujo magnético a un nivel eventual de cero.

Se deben desmagnetizar aquellos instrumentos con sensibilidad magnética y partes en movimiento, tratamientos adicionales como soldadura de arco eléctrico, maquinado y pulido, recubrimiento, pintura y post-limpieza. No se deben desmagnetizar las piezas con baja retentividad, piezas con post-tratamiento térmico por arriba del punto Curie, como vaciados, soldaduras estructurales, tanques y recipientes.

5.- ESTABLECIMIENTO DE UN CAMPO LONGITUDINAL: Consiste en enderezar un magneto semicircular hasta formar una barra magnética con polos norte y sur, por los cuales sale y entra el flujo magnético. Si las líneas del campo magnético son interrumpidas por una discontinuidad, se forman polos adicionales norte y sur, los cuales atraen a las partículas magnéticas aplicadas.

6.- INSPECCION DE INDICACIONES TRANSVERSALES: Es el examen visual, interpretación y evaluación de las indicaciones transversales de la pieza de prueba. Requiere de luz negra.

7.- DESMAGNETIZACION (opcional).

8.- POST-LIMPIEZA: Es la remoción de partículas magnéticas que quedan en la pieza de prueba para prevenir la corrosión, esta puede realizarse por cualquier método apropiado.

## 7.8.- APLICACION

Las principales aplicaciones de la prueba no destructiva mediante partículas magnéticas, son las siguientes:

- ⑤ Tiene aplicación en la industria metalúrgica en los procesos de moldeo de lingotes, vaciado, forjado, rolado, soldadura, acabado y en el área de servicio. Las discontinuidades que detecta incluyen porosidad, rechupes, concavidades, costuras, desgarramientos, escoria, falta de fusión y penetración, gas, grietas, hojuelas, inclusiones, laminaciones, rupturas internas, segregaciones, socavados, sopladuras y traslapes. Se pueden inspeccionar soldaduras bajo el agua.
- ⑤ Determina espesores menores a 0.003 plg en recubrimientos ferrosos y hasta de 0.001 plg en recubrimientos no ferrosos como pintura.
- ⑤ En los aceites lubricantes, esta evaluación no destructiva se emplea para observar los aspectos de magnetización del aceite desde el punto de vista del inspector y en las especificaciones usadas para muestras de aceites.
- ⑤ Inspecciona una gran gama de estructuras y componentes, tales como radiadores, hélices, componentes de naves aéreas, automotores, equipo aerospacial, ingeniería civil y armamento, entre otros.

## VIII.- CORRIENTES EDDY (DE REMOLINO)

### 8.1.- ANTECEDENTES

Las fuerzas eléctricas y magnéticas pueden detectarse en regiones llamadas campos eléctricos y magnéticos, los cuales son fundamentales en la naturaleza y pueden existir en el espacio desde la carga o corriente que los generó. Los campos eléctricos pueden producir campos magnéticos y viceversa, y son independientes de cualquier carga externa.

Un campo magnético cambiante produce un campo eléctrico, como lo descubierto por Faraday y que es la base de la generación de energía eléctrica. Recíprocamente, un campo eléctrico cambiante produce un campo magnético, como lo deducido por Maxwell en las ecuaciones que llevan su nombre ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

El físico Francés Charles Augustin Coulomb (1736-1806), investigó las leyes de la electricidad y el magnetismo, demostró que la ley de la inversa de los cuadrados se cumple respecto a los efectos eléctricos y magnéticos.

En 1820, el físico Danés Hans Cristian Ørsted (1777-1851) descubrió el electromagnetismo al observar la presencia de un campo magnético alrededor de un conductor que llevaba corriente, y observó un campo magnético desarrollado en un plano perpendicular a la dirección del flujo de corriente en un alambre.

En ese mismo año, el físico y matemático Francés Andrés María Ampere (1775-1856), descubrió que el flujo de corrientes iguales en direcciones opuestas en conductores adyacentes cancela el efecto magnético. Este descubrimiento ha conducido al desarrollo de bobinas modernas, resistores de precisión y técnicas de protección.

En 1824, el físico y astrónomo Francés François Arago (1786-1853) descubrió que la oscilación de un magneto era interrumpida rápidamente cuando un disco conductor no magnético era colocado cerca del magneto y observó que por rotación del disco, el magneto era atraído hacia este. Por medio de un campo magnético variable logró generar

corrientes de remolino en el disco para atraer al magneto. Actualmente los velocímetros de muchos automóviles parten del modelo simple de Arago.

En 1831, el físico y químico Inglés Michael Faraday (1791-1867), investigó la corriente inducida por medio del movimiento relativo de un magneto y una bobina, y descubrió los principios de inducción electromagnética, al observar el cambio de dirección de la corriente en una segunda bobina conectada a un galvanómetro, por el cierre o apertura del interruptor que conecta una batería a una primera bobina. Sus investigaciones sobre las corrientes inducidas constituyen el fundamento de las máquinas eléctricas (Lucero, 1983).

En 1840, el físico Inglés James Prescott Joule (1818-1889), famoso por sus aportaciones a la termodinámica, identificó y estudió sistemáticamente el efecto magnetostriectivo (Birks et al, 1991). Nueve años más tarde el físico Inglés William Thompson Kelvin (1824-1907), aplicó las ecuaciones de Bessel para resolver los elementos de un campo electromagnético.

El físico Francés Juan Bernard León Foucault (1819-1868), efectuó numerosas investigaciones, entre las cuales destacan la determinación de la velocidad de la luz y la demostración del movimiento de rotación de la tierra mediante el péndulo. A él se debe el nombre de corrientes de remolino o corrientes Foucault.

En 1873, el físico Escocés James Clerck Maxwell (1831-1879) predijo que un campo eléctrico cambiante tiene un campo magnético asociado y formuló las ecuaciones que llevan su nombre, las cuales describen matemáticamente la mayoría de las propiedades del electromagnetismo (Lucero, 1983).

El fenómeno de auto-inducción fue reconocido primeramente por el físico Norteamericano Joseph Henry (1797-1878), en cuyos experimentos fue capaz de generar arcos eléctricos grandes por interrupción de la corriente en una bobina grande de cobre con muchas vueltas.

El físico Ruso Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), postuló la ley que lleva su nombre para sistemas magnéticos que también se conoce como la ley de inducción electromagnética, la cual dice que lo que sucede es aquello que se opone a cualquier cambio en el sistema ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

## 8.2.- DEFINICION

La prueba de corrientes de remolino es una tecnología de las evaluaciones no destructivas que emplea la variación y tiempo de los campos electromagnéticos como un medio de prueba para detectar discontinuidades, propiedades, dimensiones y variaciones geométricas de los materiales de prueba (McMaster, 1986). Es una técnica electromagnética que solo puede ser aplicada en materiales eléctricamente conductivos y solamente se puede inspeccionar una área pequeña ([www.csndt.org](http://www.csndt.org)).

Como las características magnéticas de un material son influidas por su estructura total, las técnicas magnéticas pueden usarse para caracterizar la ubicación y tamaño relativo de rupturas y cavidades ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)). Su rango de aplicación oscila desde la detección de grietas hasta la clasificación rápida de componentes pequeños, de acuerdo a las imperfecciones y variaciones de tamaño o tipo de material (NDTA, 1996).

Su principio de operación se basa en la generación de pequeños campos magnéticos en la superficie, los cuales al interactuar con el componente conductivo generan corrientes de remolino, estas a la vez generan sus propios campos magnéticos alternos secundarios los cuales interactúan con los campos primarios. Al estudiar esta interacción, se analizan las discontinuidades y los cambios en la conductividad y permeabilidad de la superficie (Hands, 1999).

Las corrientes de remolino son inducidas dentro del espécimen cuando se aproxima una bobina energizada a la superficie de un componente metálico, estas corrientes generan campos magnéticos que tienden a oponerse al campo magnético original. Cuando las corrientes de remolino en el espécimen son distorsionadas por la presencia de las discontinuidades o variaciones del material, la impedancia en la bobina se modifica, este cambio se mide y se proyecta de tal manera que indica el tipo de imperfección o condición del material (NDTA, 1996).

Al inducir un campo magnético dentro del espécimen de prueba por una bobina eléctrica energizada, la fluctuación del campo magnético genera una corriente eléctrica de remolino (White, 1997). La presencia de una discontinuidad aumenta la resistencia al flujo de las corrientes de remolino, este cambio se analiza electrónicamente para conocer la severidad del defecto ([www.ndt.ca](http://www.ndt.ca) y [www.csndt.org](http://www.csndt.org)).

La bobina energizada por corriente alterna, opera en una o más frecuencias, la impedancia eléctrica de la bobina de prueba se modifica por las discontinuidades metalúrgicas y mecánicas, conductividad eléctrica, tipo y dimensión del material, permeabilidad magnética. La respuesta electromagnética causada por el paso de estas variables produce señales eléctricas las cuales son procesadas electrónicamente para producir una respuesta visual característica del cambio encontrado. Estas señales eléctricas se comparan con los patrones de defecto, para determinar la causa del daño encontrado y la acción correctiva más apropiada (Hands, 1999).

Una bobina grande de alambre (bobina primaria) fluye una corriente alterna constante y dentro de esta una bobina más corta (bobina secundaria) adjunta a un dispositivo medidor eléctrico, en la cual se inserta un material ferromagnético de prueba. La corriente constante en la bobina primaria ocasiona que la corriente fluya en la bobina secundaria mediante el proceso de inducción. Las imperfecciones que reposan en la trayectoria de la corriente alteran la resistencia del material de prueba, estos cambios bruscos en la corriente secundaria se miden y analizan para conocer la naturaleza del defecto ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

La mayor intensidad del flujo de las corrientes inducidas ocurre en la superficie excitada de las partes a prueba, y dentro de material la densidad de las corrientes de remolino decrece exponencialmente con la profundidad (McMaster, 1986). La severidad de las discontinuidades se determina mediante el análisis de amplitud y fase de las corrientes de remolino. La amplitud de la señal es un indicador del volumen de la discontinuidad y el ángulo de fase determina su profundidad y origen superficial (Lucero, 1983).

Los límites de detección dependen de la condición superficial de la pieza a ser evaluada, generalmente no se detectan defectos menores a tres veces la rugosidad de la superficie del componente. La longitud perceptible de imperfecciones depende de la integridad del patrón de observación. En condiciones aceptables, se detectan discontinuidades en el orden de 0.05 a 0.1 mm de profundidad (Hands, 1999).

### **8.3.- CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL MAGNETISMO**

Para entender los principios que aplica esta técnica no destructiva, es necesario conocer los fenómenos y propiedades que están relacionados con el magnetismo, algunos conceptos afines son los siguientes (Lucero, 1983 y [www.britanica.com](http://www.britanica.com)):

**ELECTRICIDAD:** La electricidad tiene que ver con el comportamiento de los agregados de carga, incluyendo la distribución de carga dentro de la materia y el movimiento de carga de lugar a lugar. Los diferentes tipos de materiales se clasifican como conductores o aisladores sobre la base de que si las cargas se pueden mover libremente a través de su materia constituyente.

**CORRIENTE ELECTRICA:** La corriente eléctrica es la medida de la corriente de carga; las leyes que gobiernan a las corrientes en la materia son importantes en la tecnología, particularmente en la producción, distribución y control de energía.

**VOLTAJE:** El voltaje es una medida de la propensión de carga para fluir de un lugar a otro; las cargas positivas generalmente tienden a moverse desde una región de alto voltaje a una región de voltaje más inferior.

**CARGA:** La carga es una propiedad básica de la materia, cada constituyente de la materia tiene una carga eléctrica con un valor que puede ser positivo, negativo o igual a cero. De esta manera los electrones están cargados negativamente y los núcleos atómicos positivamente. La mayoría de la materia voluminosa tiene una cantidad igual de carga positiva y negativa, que en suma es igual a cero.

**AUTO-INDUCTANCIA E INDUCTANCIA MUTUA:** La auto-inductancia de un circuito se usa para describir su reacción a una corriente cambiante en el mismo, mientras que la inductancia mutua describe la reacción a una corriente cambiante en un segundo circuito.

#### **8.4.- FACTORES QUE AFECTAN EL FLUJO DE CORRIENTE**

Los principales factores que afectan el flujo de corriente para detectar las discontinuidades y defectos en los materiales de prueba, son los siguientes (Lucero, 1983):

**CONDUCTIVIDAD:** La conductividad puede disminuir o aumentar con el tratamiento con calor por la redistribución de elementos en el material, dependiendo del material y del grado del tratamiento térmico. Los esfuerzos en un material debidos al trabajo en frío, producen distorsión reticular o dislocación. Este proceso mecánico cambia la estructura del grano y la dureza del material, y por ende su conductividad. En ciertas aleaciones de Aluminio la conductividad eléctrica se comporta inversamente proporcional a la dureza.

La conductancia es recíproca a la resistencia, por lo que un buen conductor es un resistor pobre. La impedancia es inversamente proporcional a la conductividad, por lo que un material con una conductividad alta tiene un valor bajo de impedancia.

**TEMPERATURA:** La temperatura es un factor que afecta directamente a la conductividad en los metales, ya que al aumentar esta, la conductividad decrece, excepto en los compuestos de carbón, los cuales tienen un coeficiente de temperatura negativo y cuya conductividad se incrementa al aumentar la temperatura.

**GEOMETRIA:** La trayectoria del flujo de corrientes de remolino, es distorsionada y restringida por la geometría y discontinuidades dentro del material.

**PERMEABILIDAD MAGNETICA:** La permeabilidad es la facilidad con la que son alineados los átomos o la facilidad de cómo se establecen las líneas de fuerza. Los materiales ferromagnéticos y aleaciones de Níquel, Hierro y Cobalto, tienden a concentrar estas líneas de flujo magnético. El magnetismo residual dentro de los aceros y materiales ferromagnéticos, afecta las indicaciones de corrientes de remolino y a veces resulta extremadamente difícil separar los efectos deseados de los no deseados.

**EFEECTO PELICULAR:** También llamado efecto Kelvin o efecto Thomson, es el resultado de la interacción mutua de las corrientes de remolino, frecuencia de operación, conductividad del objeto y permeabilidad. La concentración de corrientes de remolino en el objeto de prueba más cercano a la bobina de prueba, incrementa los valores de los demás factores con los que interactúan estas corrientes para formar tal efecto.

**EFEECTO DE BORDE:** Este efecto se produce cuando las corrientes de remolino son distorsionadas por la transición de amplitud de la señal debido a que la bobina aproxima los límites del objeto de prueba. El campo electromagnético producido por una bobina de prueba excitada se extiende en todas direcciones desde la bobina. Este efecto es más aplicable en la inspección de placas y láminas.

**EFEECTO DE PUNTA O DE EXTREMIDAD:** Es la señal observada cuando el extremo del objeto de prueba se aproxima a la bobina de prueba. Este efecto es más aplicable a la inspección de barras o tubos.

**DESPEGUE:** Así se denomina al espacio entre la bobina de prueba y objeto de prueba, el acoplamiento de ambas partes varía de acuerdo a este espaciamiento. Es un efecto no deseable que incrementa el ruido y reduce el acoplamiento resultando en una habilidad pobre de medición. Es un efecto deseable cuando se mide el espesor de recubrimientos no conductivos como pintura o plástico sobre bases conductivas. Es más aplicable en la inspección de las superficies de objetos.

**FACTOR DE LLENADO:** Es un término que describe que tan bien un objeto de prueba será acoplado electromagnéticamente a una bobina de prueba que rodea o que se inserta en este. El factor de llenado siempre será menor a 1 y es más deseable cuando su valor se aproxime a 1, debido a que permite que la bobina sea suficientemente cargada por el objeto de prueba.

**DISCONTINUIDADES:** Cualquier discontinuidad que cambie apreciablemente el flujo normal de las corrientes de remolino puede ser detectada, la conductividad efectiva

del objeto de prueba es reducida generalmente por discontinuidades tales como grietas, picaduras, ranuras, daños vibracionales y corrosión. La respuesta de la discontinuidad es máxima cuando se encuentra perpendicular al flujo de las corrientes de remolino.

**RELACION SEÑAL A RUIDO:** Es el cociente entre la amplitud de la señal útil y la amplitud del ruido. Cualquier cosa que interfiera con la habilidad del sistema para definir una medición se considera ruido, las variaciones de rugosidad, geometría y homogeneidad del objeto de prueba son fuentes de ruido. En las evaluaciones no destructivas la relación señal a ruido debe ser de 3 a 1, esto implica que una señal de interés tiene que responder por lo menos tres veces el ruido en ese punto.

### **8.5.- VENTAJAS**

Las ventajas que ofrece la prueba no destructiva mediante la inducción de corrientes de remolino, son las siguientes:

- ⑥ Esta evaluación no destructiva puede ser usada en líneas de producción, debido a que proporciona una medición casi instantánea, a menudo en una fracción de segundo.
- ⑥ Es una técnica de bajo costo para altas velocidades, inspección a gran escala de materiales metálicos, tales como nucleares, aerospacial, marino, alta presión, alta velocidad, alta temperatura donde fallas prematuras pueden representar desastres o peligro de vidas humanas.
- ⑥ Determina espesores de metales específicos y aleaciones cuantitativamente con una precisión del 1 por ciento o menor.
- ⑥ Las pruebas se pueden repetir con un alto grado de confiabilidad. Los instrumentos con capacidad de señal de amplitud, permiten un gran rango de interpretaciones, al separar la fase se suprimen las señales no deseadas y solo provee las deseadas.
- ⑥ Determina el espesor de capas no conductoras sobre superficies metálicas.
- ⑥ Puede detectar imperfecciones en áreas no accesibles por otros métodos no destructivos, como en tuberías instaladas en grandes contenedores con un arreglo de alta densidad.

## **8.6.- LIMITACIONES**

Las desventajas que se presentan al desarrollar esta evaluación no destructiva, son las siguientes:

- ⑥ En la medición de las propiedades o dimensiones de un material, la cantidad de señales de amplitud proyectadas, valores de componentes o ángulos de fase, no tienen un significado directo para un observador no entrenado y al comparar tales resultados en una carta o libro para encontrar el significado real de las indicaciones de la prueba, se producen errores.
- ⑥ La profundidad de penetración está limitada de 5 a 10 mm, y la bobina magnetizante y el detector difícilmente se adaptan a las superficies rugosas y a contornos irregulares.
- ⑥ No detecta las condiciones y discontinuidades locales, las cuales producen solo pequeñas distorsiones en trayectorias de flujo de corrientes de remolino.
- ⑥ Su limitación a altas frecuencias de prueba y grandes ángulos de fase sobre el plano complejo, debido a que estas frecuencias requieren altos voltajes de energía para alimentar la corriente en las bobinas de prueba.

## **8.7.- PROCEDIMIENTO Y EQUIPO**

Usualmente se requiere de cinco elementos para producir un instrumento viable de corrientes de remolino, estas funciones son excitación, modulación, preparación de la señal, desmodulación y análisis, y proyección de la señal (Lucero, 1983):

1.- EXCITACION: El generador proporciona señales de excitación a la bobina de prueba. De acuerdo al tipo de material u objeto de prueba, se utilizan los siguientes tipos de bobinas; bobina exploradora, circundante, de carrete, absoluta, híbrida o diferencial.

2.- MODULACION DE LA SEÑAL: La modulación de la señal ocurre en el campo electromagnético de la bobina de prueba.

3.- PREPARACION DE LA SEÑAL: En la sección de la preparación de la señal, una red de balance prepara la señal para su desmodulación y análisis, esta red también anula el valor estacionario de salida de señales de corriente alterna, los amplificadores y filtros mejoran la relación señal a ruido y elevan los niveles de la señal para la desmodulación y análisis subsecuente.

4.- DESMODULACION Y ANALISIS: La sección de desmodulación y análisis se conforma por detectores, analizadores, circuitos discriminadores, circuitos de muestreo y filtros.

5.- PROYECCION DE LA SEÑAL: La proyección de la señal es el vínculo entre el equipo de prueba y su utilización, los proyectores incluyen tubos de rayos catódicos, osciloscopios, medidores, registradores, alarmas visuales y audibles, terminales de computadora y señalamiento automático de equipo rechazado.

## **8.8.- APLICACION**

Las principales aplicaciones de la prueba no destructiva de corrientes de remolino, son las siguientes:

- ⑥ Detecta discontinuidades y daños que reposan en planos transversales a la dirección del flujo de las corrientes de remolino, tales como corrosión, erosión, agrietamiento por fatiga, costuras, dobleces, marcas, laminaciones y daños mecánicos.
- ⑥ Determina el espesor de recubrimientos no magnéticos sobre materiales magnéticos, en láminas metálicas, placas, paredes de tubos y partes maquinadas mide sus grosores con solo tener acceso en un solo lado del objeto de prueba.
- ⑥ Mide la conductividad en materiales metálicos, principalmente en Aluminio, donde esta varía no solo con la aleación sino también con la dureza y resistencia a la tensión.

- ⑥ Es aplicada en la industria de energía química y eléctrica, aeroespacial, automotriz, marina y de manufactura, entre muchas otras.
- ⑥ Inspecciona conductos en los motores de turbinas de gas, paredes de tuberías intercambiadoras de calor, estructuras de naves aéreas y compresores de turbinas.
- ⑥ Determina la profundidad de templado en aceros y algunas aleaciones ferrosas.
- ⑥ Mide diámetros internos de tuberías, cojinetes y anillos de rodadura.
- ⑥ Determina la aleación correcta al permitir seleccionar precisa y adecuadamente los especímenes de referencia, define las características del objeto de prueba, tales como su geometría, tratamiento térmico, acabado superficial, esfuerzos residuales y estructuras metalúrgicas.
- ⑥ Evalúa rápidamente la efectividad de todos los procesos metalúrgicos, los cuales incluyen el moldeo, conformación, tratamiento térmico, recocido, homogeneización y endurecimiento de los materiales y aleaciones, y al mismo tiempo detecta los materiales dañados durante cada proceso.
- ⑥ Mide los efectos de los procesos mecánicos, tales como el maquinado, barrenado, laminado y deformación en frío o en caliente.
- ⑥ Mide la temperatura, el caudal de metales líquidos, vibraciones sónicas y condiciones anisotrópicas, y mide la dureza en materiales de acero.
- ⑥ Identifica y separa los materiales por su composición y estructura, sincroniza los movimientos de partes ocultas de mecanismos, cuenta objetos metálicos en líneas transportadoras, determina el espaciamiento, localización, posición y proximidad de una pieza con otra, localiza objetos metálicos ocultos, tubos subterráneos, yacimientos minerales, bombas enterradas y minas.

## **IX.- EMISION ACUSTICA**

### **9.1.- ANTECEDENTES**

El uso de la emisión acústica para definir la integridad física de estructuras y materiales es muy antiguo, en los antiguos barcos para calcular la integridad de la embarcación, los marinos hacían uso de los sonidos chirriantes de los timbres y del mástil, (Parry, 1988).

El origen de la ciencia de acústica se atribuye al filósofo Griego Pitágoras (580-500, siglo VI a. C.), quien hizo experimentos sobre las propiedades de cuerdas vibrantes y de martillos, que producían agradables intervalos musicales. Su compatriota, el filósofo Aristóteles (384-322, siglo IV a. C.) sugirió correctamente que una onda de sonido se propaga en el aire a través del movimiento del aire, sin embargo, él también sugirió incorrectamente que las frecuencias altas se propagan más rápido que las frecuencias bajas, un error que persistió por muchos siglos.

El ingeniero arquitectónico Romano Marco Vitruvius Polión (siglo I a. C.), determinó el mecanismo correcto para la transmisión de ondas sónicas y contribuyó considerablemente al diseño acústico de teatros. Su compatriota, el filósofo Boethius (siglo VI, d. C.) documentó varias ideas que relacionan la ciencia con la música, en donde mencionaba que la percepción humana del tono es relativa a la propiedad física de frecuencia.

El estudio moderno sobre acústica se originó con las aportaciones del físico, matemático y astrónomo Italiano Galileo Galilei (1564-1642), quien elevó al nivel de ciencia el estudio de vibraciones y la correlación entre el tono y frecuencia de la fuente del sonido. En 1636, el matemático Francés Marin Mersenne (1588-1648) estudió la vibración de cuerdas estiradas y proporcionó las bases para la música acústica moderna, sus experimentos los resumió en las tres leyes que llevan su nombre.

Años más tarde, el físico y astrónomo Inglés Robert Hooke (1635-1703), fue el primero en producir una onda sónica de frecuencia conocida usando una rueda dentada que giraba como un dispositivo medidor. En 1830, el físico Francés Félix Savart desarrolló el disco que lleva su nombre, dispositivo que se usa frecuentemente en las demostraciones durante las conferencias de física en la actualidad.

A finales del siglo XVII e inicios del siglo XVIII, el físico Francés Joseph Sauveur efectuó estudios detallados sobre la interrelación entre la frecuencia, tono y ondas en cuerdas estiradas, y dejó un legado de términos acústicos usados hoy en día, en los cuales sugirió por primera vez el nombre de acústica para el estudio del sonido. También por estas fechas, muchos filósofos y científicos creían que el sonido propagado por medio de partículas invisibles se originaba en la fuente del sonido y de movimientos a través del espacio para afectar el oído del observador.

El concepto de sonido como una onda, fue establecido en 1650 por el Alemán Athanasius Kircher con el experimento de la campana en el vacío. Una década después, el científico Anglo-Irlandés Robert Boyle (1627-1691) mejoró la tecnología de vacío al punto donde se podía observar la intensidad del sonido que disminuía virtualmente a cero conforme el aire era bombeado hacia fuera, y llegó a la conclusión correcta de que un medio tal como el aire se requiere para la transmisión de ondas de sonido.

En el siglo XVII, el filósofo y científico Francés Pierre Gassendi (1592-1655) hizo el primer intento conocido en la medición de la velocidad del sonido en el aire, asumiendo correctamente que la velocidad de la luz es efectivamente infinita comparada con la velocidad del sonido, obtuvo un valor de 478.4 metros por segundo y concluyó correctamente que la velocidad del sonido es independiente de la frecuencia. En la década de 1650, los físicos Italianos Giovanni Alfonso Borelli y Vincenzo Viviani obtuvieron un valor mucho mejor de 350 metros por segundo, y diez años más tarde, su compatriota G. L. Bianconi demostró que la velocidad del sonido en el aire aumenta con la temperatura.

En 1738, la Academia de Ciencias de París obtuvo el primer valor experimental más preciso de la velocidad del sonido, el cual fue de 332 metros por segundo. En 1942 este valor se aproximó más al real, 331.45 metros por segundo, el cual fue enmendado en 1986 a 331.29 metros por segundo a 0° C.

La velocidad del sonido en el agua fue medida por primera vez por el físico Suizo Daniel Colladon en 1826, el valor que obtuvo fue de 1,435 metros por segundo a 8° C, el valor actual interpolado a tal temperatura es aproximadamente de 1,439 metros por segundo. Años más tarde, el matemático y físico Inglés George Gabriel Stokes (1819-1903) incluyó los efectos de la viscosidad en expresiones teóricas derivadas para la velocidad del sonido.

En 1808, el científico Francés Jean-Baptiste Biot (1774-1862), efectuó mediciones directas de la velocidad de sonido en sólidos, en tubos de hierro al compararla con la velocidad del sonido en el aire. Años más tarde, el físico Alemán Ernst Florenz Friedrich Chladni efectuó una medición más precisa usando análisis del modelo nodal en vibraciones de onda estacionaria en varillas largas y desarrolló la teoría de placas vibrantes.

Simultáneo a los estudios sobre acústica, se fue desarrollando la teoría matemática de ondas requeridas para el desarrollo de la física moderna, incluyendo la acústica. A principios del siglo XVIII, el matemático Inglés Brook Taylor (1685-1731) desarrolló una teoría matemática de cuerdas vibrantes de acuerdo a observaciones experimentales previas.

El físico y matemático Inglés Isaac Newton (1642-1727) y el matemático Alemán Gottfried Wilhelm von Leibnitz (1646-1716), desarrollaron independientemente la teoría del cálculo, la cual permitió la derivación de la ecuación general ondulatoria por el científico y matemático Francés Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) por los años de 1740. Los matemáticos Suizos Daniel Bernoulli (1700-1782) y Leonhard Euler (1707-1783), así como también el matemático Italiano-Francés Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), aplicaron las nuevas ecuaciones del cálculo a las ondas en cuerdas y en el aire.

En el siglo XIX, el Francés Simon-Denis Poisson (1781-1840) extendió estos desarrollos a las membranas estiradas, estudios que fueron completados por el matemático Alemán Rudolf Friedrich Alfred Clebsch. Años después, su compatriota el físico August Kundt desarrolló técnicas importantes en la investigación de las propiedades de las ondas del sonido.

Los primeros trabajos sobre análisis espectral fueron hechos por el químico Alemán, Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) junto con su compatriota, el físico Gustav

Robert Kirchhoff (1824-1887). El análisis de una onda periódica compleja en sus componentes espectrales fue establecido teóricamente a inicios del siglo XIX por el matemático Francés Jean-Baptiste- Joseph Fourier, lo que ahora se conoce como series o teorema de Fourier. El físico Alemán, Georg Simon Ohm (1789-1854) sugirió que en los componentes espectrales, el oído es sensible a la amplitud más no a las fases de los armónicos de un tono complejo.

En 1863, el físico Alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) hizo contribuciones considerables para comprender los mecanismos del oído y psicofísica del sonido y de la música, además construyó un conjunto de resonadores que cubrían la mayoría de los espectros audibles usados en el análisis espectral de los tonos musicales. Más tarde, el físico Prusiano Karl Rudolph Koenig diseñó muchos instrumentos usados en la investigación auditiva.

En 1877-78, el científico Inglés John William Strutt (1842-1919) conocido como Rayleigh, efectuó numerosas investigaciones acústicas, las cuales incluyó en su tratado “La Teoría del Sonido”, publicación que marcó el comienzo de la acústica moderna. Entre los innovadores del siglo XX, el físico Norteamericano Wallace Sabine es considerado como el creador de la acústica arquitectónica moderna, y el físico Húngaro-Americano Georg von Bksy, quien efectuó experimentos sobre el oído y audición en 1960, y validó la teoría de lugar de audiencia sugerida por Helmholtz.

Los primeros intentos conocidos de ampliar una onda sónica fueron hechos por Athanasius Kircher, quien diseñó un cuerno parabólico que sería usado tanto en la amplificación de la voz como un aparato auditivo. El primer estetoscopio para la ampliación de los sonidos de un cuerpo fue inventado por el médico Francés René Lannec, a principios del siglo XIX.

Los intentos de registrar y reproducir las ondas del sonido, fueron originados en 1857 con la invención del fonógrafo, un dispositivo mecánico para grabar el sonido por Edouard-Léon Scott de Martinville. Dos décadas después, el Americano Thomas Alva Edison (1847-1931) desarrolló el fonógrafo, considerado como el primer dispositivo que podía registrar y reproducir los sonidos, el cual utilizaba ranuras de profundidad variante en una hoja cilíndrica de lámina. Sin embargo este diseño fue cambiado a una ranura espiral sobre un disco plano rotativo en 1887 por el Alemán-

Americano Emil Berliner, y lo llamó gramófono.

Los avances en las técnicas de registro y reproducción del sonido en la primera mitad del siglo XX, han sido posibles gracias al desarrollo de circuitos electrónicos lineales y transductores electromecánicos de alta calidad. La innovación más importante en este rubro, tuvo lugar en la segunda mitad del siglo con la invención del disco compacto en 1979, el cual emplea técnicas digitales que reducen considerablemente el ruido y aumentan la fidelidad y estabilidad de grabación ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

## **9.2.- DEFINICION**

El monitoreo con emisión acústica es una tecnología de las pruebas no destructivas que analiza el comportamiento de los materiales, procesos de manufactura y componentes estructurales (Fowler et al, 1989). Las emisiones acústicas son ondas elásticas transitorias generadas por la liberación rápida de energía desde fuentes localizadas dentro de un material, esta energía puede provenir por deformación plástica, fractura, inclusiones, iniciación y desarrollo de grietas superficiales (Lenain, 1993).

Esta técnica implica escuchar los sonidos inaudibles al oído humano generados por un material, estructura o máquina en uso bajo carga, para obtener conclusiones acerca de su estado de condición. Consiste en adjuntar uno o más micrófonos ultrasónicos al objeto y analizar los sonidos usando instrumentos basados en computadora. Los ruidos pueden generarse por la fricción, desgaste de cojinetes, crecimiento de grietas, turbulencia y procesos en los materiales, como lo es la corrosión (NDTA, 1996).

Los objetivos principales del monitoreo con emisiones acústicas, consisten en localizar y monitorear las fuentes de la emisión causadas por las discontinuidades internas y de la superficie en las paredes de los contenedores, soldaduras de componentes y partes fabricadas.

Lenain (1993) menciona que una fuente de emisión acústica genera una onda que se expande esféricamente perdiendo intensidad a una relación de  $1/r^2$ , cuando esta onda alcanza el borde del cuerpo u objeto, se crea una onda de superficie Rayleigh o Lamb, dependiendo de su espesor. Ambos modos de propagación tienen la ventaja de que la pérdida de intensidad es solamente proporcional a  $1/r$ .

### 9.3.- CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA EMISION ACUSTICA

Algunos conceptos relacionados al fenómeno de emisión acústica, se describen a continuación:

**EFFECTO FELICITY:** Es la presencia de emisión acústica real con cargas menores que las aplicadas anteriormente. Este efecto es importante en compuestos donde operan mecanismos dependientes del tiempo y se considera como lo contrario o falla del efecto Kaiser.

**EFFECTO KAISER:** Es la característica irreversible inmediata de la emisión acústica resultante de un esfuerzo aplicado, si el efecto está presente, no se percibe ninguna emisión acústica, hasta que se excedan los niveles de esfuerzo aplicado previamente. El corolario Dunegan basado en este efecto, dice que la emisión acústica durante una prueba periódica revela el daño que ha ocurrido durante el período de trabajo previo.

**VELOCIDAD DE PROPAGACION DEL SONIDO:** Las zonas de compresión y rarefacción se alejan radiadas del punto de su origen. La velocidad con la que se irradian las ondas sonoras se llama velocidad de propagación, es decir la velocidad del sonido, la cual en el aire a una temperatura y presión normales es una constante de 346 m/s. La velocidad del sonido es una constante independiente de la amplitud del sonido.

**FRECUENCIA DEL SONIDO:** Es el número de zonas de compresión u ondas sonoras o que pasa por un punto dado durante un tiempo específico, se mide en CPM o Hz. Las frecuencias sonoras que existen son la (1) frecuencia infrasónica, debajo de la gama audible, menor a 15 Hz, (2) frecuencia audiosónica o gama audible, entre 15 y 20,000 Hz, y (3) frecuencia ultrasónica, arriba de la gama audible, mayor a 20,000 Hz.

**LONGITUD DE ONDA DEL SONIDO:** La longitud de onda es la distancia que separa las regiones de compresión. Existe una relación particular entre la frecuencia, la

velocidad de propagación y la longitud de onda. La frecuencia del sonido es inversamente proporcional a la longitud de su onda.

**AMPLITUD DEL SONIDO:** Medir la amplitud del ruido es medir hasta donde sube la presión del aire por encima de la presión atmosférica (compresión) y luego hasta donde baja por debajo de la presión atmosférica (rarefacción). La diferencia máxima entre la presión que así se mide y la presión atmosférica se llama amplitud presional del sonido, y se expresa en microbars o dinas/cm<sup>2</sup>.

**DECIBEL DEL SONIDO:** Como el oído responde a una amplia gama de amplitudes presionales del sonido, que van desde el umbral de oído agudo (0.0002 microbars) hasta el umbral de dolor (2,000 microbars), se utiliza una escala logarítmica de decibeles para simplificar las mediciones de esta gama lineal.

Este se define por la relación  $dB_{SPL} = 20 \log(P/P_{REF})$ , donde la presión estándar de referencia es el umbral de oído agudo. De acuerdo a esta ecuación el umbral de oído agudo llega a ser 0 dB y el umbral del dolor de 140 dB.

#### **9.4.- VENTAJAS**

Las principales ventajas que ofrece la prueba no destructiva de emisión acústica, son las siguientes:

- ⑦ Se pueden monitorear estructuras muy amplias desde una pequeña locación.
- ⑦ Es posible monitorear continuamente por medio de alarmas.
- ⑦ Los cambios microscópicos pueden ser detectados con la liberación de suficiente energía.
- ⑦ Es posible localizar la fuente de emisión mediante el uso de sensores múltiples.
- ⑦ Además de detectar discontinuidades, también monitorea su comportamiento, es decir, su movimiento y crecimiento.
- ⑦ Es el método no destructivo más sensible al material y el menos invasivo.
- ⑦ Inspecciona rápidamente la presión de múltiples contenedores simultáneamente.

- ⑦ Realiza un análisis completo de los componentes del sistema en soldaduras, zonas afectadas por calor, placas y recubrimientos.
- ⑦ A menudo la inspección de estructuras se realiza en condiciones de operación, sin sacarla fuera de servicio, ahorrando con esto tiempo y costos.
- ⑦ La medición de discontinuidades responde a la actual condición de esfuerzo.
- ⑦ No requiere de conocer el tamaño, geometría o análisis de esfuerzo de la estructura, debido a que el grado de significancia de la discontinuidad está dado por la energía de salida de emisión relativa.
- ⑦ La aplicación de esta prueba no requiere limpiar o descontaminar la estructura u objeto que se va a inspeccionar.
- ⑦ La emisión acústica es el método más eficaz de evaluaciones no destructivas para asegurar la integridad estructural en la fabricación de materiales compuestos.

## 9.5.- LIMITACIONES

Las desventajas que presenta la aplicación de esta prueba no destructiva, son las siguientes:

- ⑦ El ruido creado por la fuga de presión contenida en un sistema, puede limitar o evitar la adquisición y análisis de emisión acústica.
- ⑦ No proporciona información concerniente al tamaño u orientación de las discontinuidades, debido a que es menos sensible a la geometría que los otros métodos no destructivos.
- ⑦ Requiere de equipos electrónicos y sistemas de computo muy sofisticados, y por ende, personal altamente calificado y certificado para su ejecución.
- ⑦ En la detección de fuentes muy débiles requiere sensores altamente sensitivos y una señal de amplificación.
- ⑦ La información y tecnología referente a la emisión acústica, se encuentran disponibles en códigos ASTM, pero no en códigos ASME.

## 9.6.- EQUIPO

El equipo básico para llevar a cabo este ensayo no destructivo, consiste en los siguientes dispositivos y accesorios:

- ⑦ Guías y estándares de referencia.
- ⑦ Acoplamiento consistente durante la prueba.
- ⑦ Software para analizar la información.
- ⑦ Equipo de grabación.
- ⑦ Amplificador principal.
- ⑦ Procesador principal.
- ⑦ Cable de la señal de potencia (152 m).
- ⑦ Sensores.
- ⑦ Procesadores de señal.
- ⑦ Monitor.
- ⑦ Pre-amplificador.
- ⑦ Filtros.
- ⑦ Fuente de energía.

## 9.7.- APLICACION

Las aplicaciones de la emisión acústica en el monitoreo e inspección de materiales y componentes estructurales, son las siguientes:

- ⑦ Analiza el comportamiento de materiales, tales como metales, materiales cerámicos, compuestos, rocas y concreto, en los cuales detecta discontinuidades, deformación plástica, zonas plásticas avanzadas, propagación de grietas discontinuas, fatiga, corrosión por esfuerzo y mecánica de rocas, entre otras.
- ⑦ Monitorea continua y periódicamente estructuras metálicas, minas, puentes, cables, recipientes a presión, tuberías y tanques de almacenamiento superficiales y subterráneos, estructuras de fibra de vidrio y maquinaria rotativa.
- ⑦ En los procesos de manufactura, inspecciona la fase de transformación en metales y aleaciones (transformación martensítica), los procesos de deformación tales como laminado, forjado y extrusión, y soldaduras. Detecta discontinuidades que incluyen inclusiones, grietas, rechupes, traslapes y falta de penetración.

- ⑦ Estudia los cambios biológicos y químicos que sufren los materiales.
  
- ⑦ Esta técnica no destructiva es utilizada por la industria química y petroquímica para monitorear tanques de almacenamiento, recipientes del reactor, envases a presión, plataformas, tuberías, válvulas y tratadores de agua.
  
- ⑦ En la industria energética inspecciona tuberías, generadores de vapor, aislantes de cerámica, transformadores, contenedores de reactor nuclear e instrumentos aéreos.
  
- ⑦ En la industria aeroespacial, monitorea aviones y naves espaciales, y detecta grietas por fatiga y corrosión.
  
- ⑦ En la electrónica detecta la pérdida de partículas en componentes electrónicos, uniones eléctricas, agrietamiento de sustratos, aislantes, etc.

## **X.- ULTRASONIDO**

### **10.1.- ANTECEDENTES**

El físico Inglés John William Strutt (1842-1919) mejor conocido como Rayleigh, desarrolló el disco que lleva su nombre, el cual se usa para medir la presión acústica. También descubrió la onda superficial que lleva su nombre y que juega un papel importante en la evaluación ultrasónica y acústica para analizar fenómenos sísmicos. Otra contribución fue el análisis del patrón de onda de un pistón generador de alta frecuencia, que representa un factor crítico para el entendimiento de los campos de radiación de los transductores ultrasónicos modernos (NDTA, 1996).

En 1830, el físico Francés Felix Savart estudió la generación de frecuencias por arriba de 24,000 Hz con una rueda grande dentada, y en 1883, Francis Galton inventó un silbato capaz de generar 80,000 Hz (Birks et al, 1991). En 1850, el científico Norteamericano John LeConte desarrolló una técnica para observar la existencia de ondas ultrasónicas con una flama de gas, la cual fue usada más tarde por el físico Británico-Irlandes John Tyndall (1820-1893) para el estudio detallado de las propiedades de ondas sónicas.

El efecto piezoeléctrico, un medio primario de producción y percepción de ondas ultrasónicas, fue descubierto en 1880 por el físico químico Francés Pierre Curie (1859-1906) y su hermano Jacques ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)). Los estudios relacionados con el ultrasonido se originaron en el siglo XIX, los primeros usos de ondas ultrasónicas se llevaron a cabo a finales de la década de 1920 para detectar cavitación, calentamiento, emulsificación y levitación. La inspección con ultrasonido nació en el mar, debido a que sus antecedentes consisten en la detección de submarinos durante la primera guerra mundial y por el hundimiento del Titanic en 1912 para detectar la presencia de icebergs y otros obstáculos bajo el agua.

También antes de la segunda guerra mundial, la técnica de enviar ondas de sonido a través del agua y observar los ecos de retorno para caracterizar objetos sumergidos, inspiró a los primeros investigadores del ultrasonido a explorar formas de como aplicar el concepto al diagnóstico médico (Hands,1999). El Ruso S. Y. Sokolov en 1929 y el Alemán O. Muhlhauser dos años más tarde, aplicaron las ondas ultrasónicas en la evaluación no destructiva de materiales.

En la década de 1930, el ultrasonido era ya una de las pruebas no destructivas más usadas y cinco años más tarde se inician las investigaciones sobre los radares, los cuales empiezan a usarse en 1938, cuyo principio de operación tiene relación con las ondas ultrasónicas (Birks et al, 1991). A principios del siglo XX, la invención del amplificador y oscilador electrónico, los cuales fueron usados para transmitir el elemento piezoeléctrico, permitió extender y perfeccionar las aplicaciones del ultrasonido ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

Firestone en 1940 y Simons cinco años más tarde, desarrollaron la prueba de pulsos ultrasónicos usando la técnica de pulso-eco. Al término de la segunda guerra mundial, investigadores Japoneses comenzaron a explorar las capacidades de diagnóstico médico del ultrasonido (Birks et al, 1991).

El trabajo de Japón sobre ultrasonido fue desconocido en Estados Unidos y Europa hasta la década de 1950, cuando los investigadores presentaron sus hallazgos a la comunidad médica internacional sobre el uso del ultrasonido para detectar cálculos biliares, cáncer, masas de seno y tumores. Japón fue también el primer país en aplicar ultrasonido Doppler, una aplicación que detecta movimiento interno en los objetos, tal como el curso de la sangre a través del corazón para la investigación cardiovascular (Hands, 1999).

## **10.2.- DEFINICION**

La prueba de ultrasonido es una tecnología de las evaluaciones no destructivas que estudia la integridad de componentes y estructuras para detectar la presencia de discontinuidades internas y superficiales, además mide el espesor de paredes y recubrimientos en materiales firmes, principalmente de metal y cerámica (Hands, 1999).

Consiste en el estudio de ondas del sonido con frecuencias más altas a las audibles, su rango de frecuencia va de 200 kHz a 10 MHz, es utilizada en el control de calidad de la medición de espesores, determinación y valoración del tamaño de las imperfecciones de tratamientos calientes (Birks et al, 1991).

La inspección de ondas ultrasónicas es una herramienta de inspección en soldaduras tanto en la fabricación como en servicio, y ha ganado el reconocimiento de la industria en la última década debido a los importantes avances técnicos en el perfeccionamiento de instrumentos y computadoras (Shankles, 1999). Emplea ondas sónicas de longitud de onda corta y de alta frecuencia para detectar defectos y medir espesores (NDTA, 1996).

Es una prueba de no contacto que usa equipo electrónico complejo y que puede ser aplicada a cualquier material que transmita vibraciones mecánicas, detecta discontinuidades lineales y no lineales y permite una interpretación tridimensional, la evaluación a menudo es difícil ([www.ndt.ca](http://www.ndt.ca) y [www.csndt.org](http://www.csndt.org)).

El ultrasonido opera en el principio de que cualquier variación de presión o desplazamiento de partículas en un material, proporciona información acerca del objeto de prueba. La amplitud de la señal, longitud y tiempo de respuesta, se evalúan directamente para conocer la localización y tamaño de una discontinuidad, y al hacer el análisis completo de la señal se obtiene información sobre la naturaleza física, forma, orientación, y dimensión de la imperfección (Birks et al, 1991).

Al aplicar un pulso muy corto de ondas ultrasónicas generalmente entre 1 y 100 MHz en el material de prueba, se detecta y analiza cualquier pulso de sonido reflejado (Hands, 1999). La propagación de ondas ultrasónicas a través del material sólido permite medir las propiedades del material y sus variaciones en todo el volumen de un objeto.

Comúnmente se usan emisiones de ultrasonido de alta frecuencia por medio de un transductor colocado en el espécimen, los pulsos de sonido que regresan al transductor como ecos, se muestran en una pantalla que proporciona su amplitud y el tiempo de regreso al transductor, esta información se analiza para interpretar el tamaño, distancia y reflectividad de la imperfección (NDTA, 1996).

Después de interpretar las señales se reporta si la condición del objeto de prueba está defectuosa o si es aceptable de acuerdo a la especificación de la prueba (Hands,

1999). Los medios más comunes para generar y detectar vibraciones ultrasónicas son los transductores magnetostrictivos o piezoeléctricos, los cuales convierten los campos magnéticos alternos de alta frecuencia o corrientes eléctricas en vibraciones mecánicas ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

El instrumental de ultrasonido convierte los pulsos eléctricos en ondas o vibraciones mecánicas, las cuales viajan a través del espécimen de prueba y se reflejan desde las imperfecciones debido a su naturaleza acústica diferente. Las ondas reflejadas de retorno son reconvertidas a energía eléctrica y proyectadas como señales en un tubo de rayos catódicos. La posición y tamaño de estas señales corresponden a la posición y el tamaño de los defectos ([www.ndt.ca](http://www.ndt.ca) y [www.csndt.org](http://www.csndt.org)).

La detección se limita para aquellos componentes o estructuras de acero con grano fino. Defectos más pequeños pueden detectarse por la prueba de inmersión y un patrón de observación programada con una frecuencia ultrasónica más alta. Los límites de detección están en el orden de 0.1 a 0.2 mm, aunque también pueden detectarse discontinuidades de 0.04 mm de diámetro bajo condiciones de laboratorio (Hands, 1999).

### **10.3.- VENTAJAS**

Las principales ventajas que ofrece la prueba no destructiva del ultrasonido, son las siguientes:

- ③ Es una evaluación de alta sensibilidad, que mediante el uso de alta frecuencia permite detectar y localizar discontinuidades críticas muy pequeñas, tales como discontinuidades en forma de disco o grietas de casi cero espesor.
- ③ Debido a que presenta alto poder de penetración, permite examinar secciones extremadamente gruesas y detectar discontinuidades a una gran profundidad.
- ③ Es una prueba de alta velocidad proporcionando electrónicamente las indicaciones de la presencia de discontinuidades en fracción de segundos. Por ejemplo, un rollo de acero de 3 m de longitud, puede ser evaluado en una relación de un cuarto de tonelada por segundo.

- ⑧ Es más precisa y exacta que otros métodos no destructivos en la determinación de la posición de discontinuidades internas, estimando sus dimensiones y caracterizando sus orientaciones, formas y naturaleza.
- ⑧ Es de buena resolución, característica que permite una buena diferenciación de los ecos procedentes de discontinuidades próximas en cuanto a profundidad.
- ⑧ Solamente se necesita acceso a un solo lado de la superficie del objeto o estructura que se va a monitorear.
- ⑧ Permite la interpretación inmediata, la automatización, el rastreo rápido, control en la línea de producción y el control del proceso de fabricación.
- ⑧ No utiliza radiaciones perjudiciales para el organismo humano y no tiene efectos sobre el material monitoreado.
- ⑧ En aplicaciones específicas donde el problema es claro y la técnica está establecida, el entrenamiento es simple.

#### **10.4.- LIMITACIONES**

Las desventajas que se presentan al aplicar esta prueba no destructiva, son las siguientes:

- ⑧ No se pueden inspeccionar materiales porosos, con inclusiones y precipitados dispersados.
- ⑧ La evaluación puede ser insatisfactoria si el objeto de prueba es extremadamente delgado, geoméricamente complicado, con excesos de rugosidad y estructura de grano grueso.
- ⑧ La evaluación requiere mucha atención y concentración de técnicos experimentados.
- ⑧ Para realizar la evaluación, requiere de personal calificado con gran conocimiento técnico para el desarrollo de los procesos de monitoreo.
- ⑧ Se debe contar con estándares adecuados de referencia, procedimientos o especificaciones de prueba, estándares de aceptación, tanto para calibrar el equipo como para caracterizar las discontinuidades.
- ⑧ Las discontinuidades muy cercanas a la superficie pueden ser no detectables.

- ③ Los equipos y accesorios son muy sofisticados y de alto costo.
- ③ Requiere de una fuente de poder.
- ③ Se necesita un acoplante para obtener una transferencia efectiva de las señales entre la pieza y el transductor.

### **10.5.- EQUIPO**

El equipo necesario para llevar a cabo esta evaluación no destructiva, es el siguiente:

- |  |                 |
|--|-----------------|
| ③ Guías y estándares de referencia.                    | ③ Generador.    |
| ③ Transductores (magnetostrictivos y piezoelectricos). | ③ Detectores.   |
| ③ Preamplificador.                                     | ③ Rectificador. |
| ③ Amplificador.  | ③ Oscilador.    |
| ③ Modulador.   | ③ Alarmas.      |
| ③ Tubo de Rayos Catódicos.                             | ③ Atenuadores.  |
| ③ Filtros de Frecuencia.                               | ③ Comparador.   |
| ③ Convertidor Digital/Análogo.                         | ③ Monitor.      |
| ③ Voltímetro de corriente AC/DC.                       | ③ Pulsadores.   |

### **10.6.- APLICACION**

Las aplicaciones de la prueba no destructiva mediante la emisión de ondas ultrasónicas, son las siguientes:

- ③ Esta evaluación no destructiva se aplica en el control de calidad y en la evaluación de materiales en las industrias de manufactura eléctrica, producción de acero, Aluminio y Titanio, aerospacial, manufactura de motores de jets y barcos.
- ③ Mide espesores de pared, determina el tamaño de grano, tratamiento térmico, constantes elásticas, medición de tensión, estudios de estructura y dureza.

- ⑧ La industria metalúrgica la emplea en el control de calidad en los procesos de fundición, forjado, laminado y uniones soldadas. Detecta discontinuidades superficiales, sub-superficiales e internas, tales como poros, grietas, rechupes, laminaciones, inclusiones, segregaciones, sopladuras, escamas, traslapes, reventados, fragilización por Hidrógeno y discontinuidad en sopladuras.
  
- ⑧ Las ondas ultrasónicas se usan en el laboratorio para estudiar ciertas propiedades de los materiales sólidos, estructuras atómicas, tales como la compresibilidad de moléculas en solución, propiedades mecánicas de líquidos y plásticos, modulo elástico de sólidos, estructura molecular de líquidos y gases, tasa de crecimiento de la grieta por fatiga, detección de excentricidad en hoyos, investigación de tasas de corrosión, investigaciones metalúrgicas relacionadas con la estructura y dureza, precipitación de los constituyentes de aleaciones y refinamiento del grano.
  
- ⑧ Las industrias aerospacial, cervecera y de transportación aplican las ondas ultrasónicas en el procesamiento del Aluminio, en el monitoreo de láminas, placas, lozas y hojas de Aluminio forjado, así como su proceso de fundición, para proveer alta calidad de material en los procesos posteriores.
  
- ⑧ Monitorea la integridad estructural y serviceabilidad de puentes, juntas y conexiones, rieles, ruedas, ejes, cilindros y pistones. Detecta corrosión, grietas por fatiga, daño por terremoto o viento, esfuerzos y fatiga debida a las cargas cíclicas de tráfico e inclusiones.
  
- ⑧ En el control de calidad de soldaduras, las técnicas de ultrasonido se combinan con las de radiografía para llevar a cabo la inspección, los siguientes pasos han sido recomendados: (1) evaluar con radiografía, (2) excavar y reparar las discontinuidades detectadas, (3) volver a evaluar con radiografía las áreas reparadas, (4) evaluar con ultrasonido, (5) excavar y reparar las discontinuidades detectadas, (6) volver a evaluar con ultrasonido las áreas reparadas y (7) volver a evaluar con radiografía las áreas reparadas.

- ⑧ Inspecciona componentes diversos, tales como fresadoras, equipos de potencia, turbinas, rotores generadores, componentes de fuselaje de aviones, materiales de maquinaria, herramientas y refacciones de acero, ejes, ruedas, juntas de rieles, reactores nucleares, tuberías intercambiadoras de calor, soldaduras en tuberías y estructuras de acero.
- ⑧ En la navegación y pesca mediante ondas ultrasónicas de baja amplitud, se detecta la presencia de submarinos, icebergs, cascos, arrecifes y bancos de peces.
- ⑧ En la medicina, mediante ultrasonido se hacen exploraciones en el cuerpo humano, monitorea la producción de hormonas y antígenos, cirugía y odontología, ondas ultrasónicas de baja potencia producen imágenes de estructuras corporales internas. En la medicina veterinaria mide el espesor de las capas de tocino y músculo en animales vivos de ganado vacuno, porcino y ovino, entre otros.
- ⑧ En los electrónicos, se utiliza para monitorear circuitos integrados, capacitores y productos aislantes de cerámica.
- ⑧ En estructuras de madera detecta daños de desalineamiento causados por el ataque de hongos.
- ⑧ La irradiación ultrasónica de fluidos en suspensión, se usa en la aclaración de vino por precipitación y en la coagulación de partículas suspendidas en cigarreras.
- ⑧ La aplicación de ondas ultrasónicas de alta amplitud en un líquido genera cavitación y ondas de choques que producen emisiones vigorosas y esfuerzos de corte, las cuales pueden explotarse en la producción de emulsiones, limpieza de superficies e interrupción de estructuras biológicas.
- ⑧ La inspección automatizada basada en tecnología ultrasónica se aplica en frenos de automotores, superficies internas y externas de cilindros revestidos.

- ③ Se aplica en las pruebas de rechinamiento en ruedas, cerámicos y concreto.
  
- ③ Las técnicas de pulso-eco se usan en las pruebas no destructivas de estructuras y materiales industriales tales como plásticos reforzados, vías férreas, aeronaves y recipientes del reactor, las ondas ultrasónicas son esparcidas por discontinuidades en un objeto de prueba y de esta manera detecta cavidades o grietas o para medir espesor.

## **XI.- RADIOGRAFIA**

### **11.1.- ANTECEDENTES**

En 1833, el físico Inglés Michael Faraday (1791-1867) anunció las leyes de la electrólisis, de estas leyes G. Johnstone en 1874, calculó el promedio de la carga transportada por un ion en solución, asumiendo que todos los iones monovalentes llevaban la misma carga, él denominó a esa carga como electrón.

En 1886, Goldstein observó flujos de rayos positivos a través de hoyos en el cátodo de un tubo de descarga y formando rayos luminosos llamados kanalstrahlen o rayos canal, la dirección de estos rayos indicaba que eran iones positivos. Aston, Bainbridge y Dempster, revelaron la completa figura isotópica de la estructura atómica, en la cual observaron que el ion Hidrógeno era el elemento básico fundamental y lo denominaron protón, del griego "protos" que significa primero.

En 1895, el físico Alemán Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) descubrió los rayos X cuando trabajaba con un tubo de descarga gaseosa de alto voltaje. Los electrones eran emitidos desde un cátodo y acelerador hacia un ánodo, al cual estos bombardeaban con una alta velocidad y una radiación muy penetrante era emitida desde el anticátodo bombardeado. Esta radiación fue usada para penetrar el cuerpo humano y materiales sólidos, la radiología y radiografía se aplicaron a la medicina y a la evaluación no destructiva.

Hasta 1896, fue generalmente creíble que los elementos representaran la forma más estable de materia que existe en la naturaleza, y no había nada conocido que pudiera cambiar sus características. Los compuestos químicos serían construidos de los elementos y por varios medios transformados en otros compuestos. En ese mismo año, el físico Francés Antonio Enrique Becquerel (1852-1908) descubrió la radioactividad al observar que ciertos minerales de Uranio desprendían radiación penetrante.

En 1897, la química Polaca Marie Sklodowska Curie (1867-1934) aisló e identificó el Polonio y dos años más tarde el Radio, los cuales eran menos estables que el Uranio (Bryant, 1985). Tres años después, el físico Francés Paul Ulrich Villard descubrió la radiación de rayos gamma mientras estudiaba las radiaciones desprendidas por el Uranio, observó que además de los rayos alfa y beta, había una radiación que no se desviaba por causa de los imanes, se concluyó que carecía de carga eléctrica y que se trataba de una radiación electromagnética, como la luz o los rayos X, pero mucho más penetrante.

En 1900, el físico Alemán Friedrich E. Dorn descubrió el Radón, el cual es un gas noble asociado con el Radio, el químico Inglés William Ramsay (1852-1914) que había descubierto los otros gases nobles; Neón, Argón y Helio, denominó a esta emanación del Radio como Radón. También en ese mismo año, el físico Alemán Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) afirmó que los cuerpos que emiten energía no lo pueden hacer en cualquier cantidad, sino que esta cantidad ha de ser siempre un múltiplo entero de un paquete mínimo o átomo de energía, que él denominó “Quantum”.

Los cuantos son las unidades fundamentales e indivisibles de la energía. Planck demostró que la energía contenida en un cuanto de radiación dada era proporcional a su frecuencia. Esta relación de proporcionalidad está expresada por una ecuación en donde interviene la “constante de Planck (h)”, un número que desempeña un papel fundamental en la física actual y en la mecánica cuántica (Centella, 1998).

El físico Inglés Ernest Rutherford (1871-1937) junto con su compatriota el químico Frederick Soddy (1877-1956), elaboró la teoría de la desintegración espontánea de los elementos radioactivos, y con la colaboración del físico Danés Niels Bohr (1885-1962), estableció como estructura del átomo, la de un núcleo rodeado por electrones negativos orbitales.

Soddy predijo la existencia de los isótopos, Rutherford también desarrolló los conceptos de isótopos de los elementos y la existencia del neutrón, Bohr explicó las propiedades de los átomos mediante la teoría de los cuantos. Pero fue hasta 1920, cuando el físico Inglés Francis William Aston (1877-1945) descubrió los isótopos.

En 1922, H. H. Lester demostró que es posible la penetración radioactiva en secciones gruesas de acero, además mencionó que se pueden detectar por radiografía,

grietas, cavidades, porosidad e inclusiones no metálicas, del grosor del 2 por ciento del espesor del metal.

En 1930, Bothe y Becker observaron que una radiación muy penetrante fue emitida cuando elementos luminosos como Berilio y Litio eran bombardeados con partículas alfa (iones Helio). Dos años después, Chadwick asumió que tal radiación consistía de partículas neutrales que tienen el mismo peso que el protón, y las llamó neutrón.

En 1932, el físico Norteamericano Charles David Anderson (1905-) descubrió el positrón. Experimentos posteriores dieron evidencia de que esta partícula es idéntica al electrón en muchas propiedades, tales como peso atómico, masa en reposo y energía en reposo, carga positiva y negativa iguales en valor numérico, momento de espín angular y momento magnético iguales en valor numérico. Sin embargo el positrón tiene una vida extremadamente corta de  $10^{-7}$  segundos y solo tiene la capacidad de existencia bajo condiciones de movimiento.

Los experimentos de física atómica y nuclear del físico Italiano Enrico Fermi (1901-1954), condujeron a la primera reacción en cadena automantenida. En 1934, postuló al neutrino para explicar una contradicción aparente de la ley de la conservación de la energía en emisión beta, esta partícula carece de carga y es de masa cero o cercana a cero y número cuántico de espín muy pequeño. La existencia del neutrino fue aceptada y substanciada por Cowan y Reines en 1956.

En 1934, el físico Japonés Hideki Yukawa (1907-) postuló la existencia del mesón o mesotrón, para explicar las fuerzas nucleares de atracción que une a las varias partículas del núcleo. Dos años después, Anderson notó estas partículas en su cámara de niebla de radiación cósmica. Esta partícula es altamente inestable y de vida muy corta de  $10^{-15}$  a  $2.22 \times 10^{-6}$  segundos, su masa es menor que la del protón y mayor que la del electrón, su carga se considera neutral aunque tienen a la vez carga positiva y negativa.

Los hermanos Curie descubrieron que las partículas alfa interaccionaban con el Berilio para producir neutrones y en 1934 Fermi observó que tales fuentes de neutrones podrían producir radioactividad. Una década después surgió el reactor nuclear, el cual podría generar tremendas intensidades de neutrones. Con esta innovación, los isótopos artificiales llegaron a estar disponibles en cantidades muy grandes, y se produjeron

isótopos radioactivos mediante un proceso previo desconocido denominado fisión nuclear.

En 1955, Segree et al. descubrieron la existencia del antiprotón. Actualmente se cree que todas las partículas tienen antipartículas análogas y se caracterizan por tener momento angular y carga opuestas. Años más tarde, se descubrió el hyperon, el cual es una partícula de comportamiento muy raro y de vida muy corta, de  $10^{-10}$  a  $2.8 \times 10^{-10}$  segundos. Otra partícula del átomo es el deutrón, deuterón o deutón, el cual es el núcleo del Deuterio o Hidrógeno pesado formado por la unión de un protón y un neutrón (Bryant, 1985).

A finales de la década de 1960, se descubrió la existencia de otras fuerzas en la naturaleza que tienen campos con una estructura matemática similar a la del campo electromagnético. Tales fuerzas son la fuerza nuclear, responsable de la liberación de energía en la fusión nuclear, y la fuerza débil, observada en la desintegración radioactiva de los núcleos atómicos inestables. Las fuerzas débiles y electromagnéticas se han combinado en una fuerza común llamada fuerza electrodébil ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

## **11.2.- DEFINICION**

La inspección radiográfica es una tecnología de las pruebas no destructivas que consiste en la producción de una imagen fotográfica después de pasar una emisión de radiación de iones penetrantes a través de un material (NDTA, 1996 y [www.csndt.org](http://www.csndt.org)). La radiografía industrial es la médula de las evaluaciones no destructivas por la creación de un registro permanente (Shankles, 1999).

Las radiografías o rayos X se producen por alto voltaje en máquinas de rayos X mientras que los rayos gamma se generan de isótopos radioactivos tales como el Iridio 192. Ambos tipos de radiación se sitúan cerca del material a ser monitoreado, se hacen pasar a través del material y se capturan en película, la cual se procesa y la imagen se obtiene como una serie de sombras grises entre negro y blanco (NDTA, 1996, [www.ndt.ca](http://www.ndt.ca) y [www.csndt.org](http://www.csndt.org)).

La radiografía usa radiación penetrante y opera bajo el principio de que los materiales más densos o más gruesos absorberán más radiación. Una discontinuidad

presente a cualquier profundidad en el interior del espécimen absorberá menos radiación que el espécimen por sí mismo. El espécimen se coloca entre una fuente de radiación y una hoja de película radiografía o amplificador de imagen. La presencia y ubicación del defecto se indican por un área de exposición más alta o más oscura, los límites de utilidad de la inspección radiográfica son determinados por la densidad y espesor del material (www.ndt.ca y www.csndt.org).

La elección del tipo de radiación a usarse depende del espesor del material que se va a evaluar. Las fuentes de rayos gamma tienen la ventaja de ser portables, por lo que son ideales para el uso en trabajos de construcción. Los dos tipos de radiación son muy peligrosos, por lo que se deben tomar precauciones especiales al llevar a cabo esta prueba. Las fuentes radiográficas se deben manejar en el interior de un anexo protector o con barreras apropiadas y señales de advertencia para evitar daños personales (NDTA, 1996), el riesgo de la seguridad inherente en la prueba radiográfica exige una instalación especial (www.csndt.org).

Las fuentes de radiografía más comunes son los isótopos Iridio 192 y Cobalto 60. El isótopo Iridio 192 alcanza niveles de más de 100 Curies y el Cobalto 60 alcanza más de 90 Curies para la inspección de tanques con paredes pesadas, contenedores a presión y de concreto (Shankles, 1999).

### **11.3.- CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA RADIOGRAFIA**

Algunos conceptos relacionados con esta prueba no destructiva (Bryant, 1985), se describen a continuación:

**RAYOS X:** Son una forma de radiación electromagnética que tienen una longitud de onda de  $10^{-13}$  a  $10^{-9}$  m. Estos son usualmente producidos por máquinas de rayos X de alto voltaje al permitir que un flujo de electrones a alta energía choque sobre un ánodo, y de este modo se produzcan fotones por desaceleración de los electrones. Cuando un electrón es removido desde un átomo del ánodo, el átomo queda en un estado inestable con una energía mayor que la normal, y emite uno o más fotones con una energía correspondiente a una característica de longitud de onda del elemento.

**RAYOS GAMMA:** Los rayos gamma son otra forma de radiación electromagnética de origen nuclear, son producidos de isótopos radioactivos con longitudes de onda muy cortas. Estos son emitidos por los núcleos del átomo en estado de excitación, su emisión usualmente ocurre en asociación con la emisión de partículas alfa y partículas beta. La radiación de rayos gamma es el resultado de la aniquilación de un par electrón-positrón y por conversión interna.

El peso y número atómico de un átomo son alterados de acuerdo al tipo de partícula emitida; una partícula alfa reduce el peso y número atómico en 4 y 2 unidades respectivamente, una partícula beta solamente incrementa el número atómico en 1 unidad, un positrón y la captura de un electrón solamente reducen el número atómico en 1 unidad, un protón decrece el peso y número atómico en 1 unidad, y un neutrón solamente reduce el peso atómico en 1 unidad.

**ELEMENTO:** Un elemento se define como una sustancia que no puede ser dividida químicamente en sustancias más simples, existen más de 100 elementos básicos. Todos los elementos tiene la misma estructura general; un núcleo pesado, cargado positivamente y rodeado por electrones cargados negativamente.

Los átomos de los elementos se componen por partículas con diferentes características y propiedades, tales partículas son el electrón, protón, neutrón, positrón, neutrino, mesón o mesotrón, deutrón o deuterón, hyperon y antipartículas.

**ISOTOPO:** Es una variación del mismo elemento químico, tiene el mismo número de protones pero diferente peso atómico, debido a su desigual número de neutrones. Como el número de electrones es igual para varios isótopos del mismo elemento, las características químicas son prácticamente iguales. Un material se considera radioactivo cuando se somete a 74 o más desintegraciones por segundo.

Existen más de 800 isótopos, de los cuales aproximadamente 300 son estables y más de 500 son radioactivos o inestables. Los isótopos radioactivos intentan alcanzar el radio estable de neutrones y protones, y al hacerlo emiten partículas alfa (iones Helio) y partículas beta.

El Radio es el isótopo radioactivo natural más importante, es un producto del Uranio 238 y es un miembro de una cadena de elementos radioactivos, su vida media es de aproximadamente 1600 años. Existen otras dos series con características similares, originadas por Uranio 235 y Tulio 232.

Radón 222, es un isótopo radioactivo natural producto de la desintegración natural del Radio que se encuentra en las rocas, es un gas noble incoloro e inodoro, su aplicación está muy limitada debido a su corta vida media, de 3.83 días.

Cobalto 60, es un metal magnético, gris y duro, que ocurre como un isótopo simple Cobalto 59, el cual es transformado en isótopo radioactivo Cobalto 60 después de capturar un neutrón.

Iridio 192, es un isótopo producido por radiación neutrón de elemento, un metal muy duro, quebradizo y blanco de la familia del Platino. El Iridio natural ocurre como dos isótopos; 38 por ciento de Iridio 191 y 62 por ciento de Iridio 193.

Tulio 170, es un elemento químico que pertenece a las tierras raras, físicamente es un metal plateado, consiste de un simple isótopo Tulio 169. Debido a que su producción es extremadamente difícil, se maneja como óxido de Tulio  $Tm_2O_3$ , en polvo encapsulado o sinterizado en granos.

Cesio 137, es un isótopo generalmente presente en forma de Cloro, el 92 por ciento de las desintegraciones nucleares son por emisión de partículas beta en un estado excitado de Bario 137. Este isótopo es producto de fisión nuclear, su actividad específica es limitada por la presencia de otros isótopos de Cesio, principalmente de Cesio 133 y Cesio 135.

#### **11.4.- RADIACION ABSORCION**

La radiación absorción se clasifica en absorción de fotones, absorción de partículas cargadas y absorción de neutrones (Bryant, 1985):

**ABSORCION DE FOTONES:** Una emisión de rayos X o rayos gamma experimenta una absorción exponencial característica en su pasaje a través de la materia. Como resultado de la interacción del fotón con un núcleo o un electrón del elemento de

absorción, el fotón es removido de la emisión, este fenómeno se clasifica en efecto fotoeléctrico, dispersión, producción de pares y en fotodesintegración.

Efecto fotoeléctrico: Es el proceso en el cual un fotón transfiere su energía total a un electrón en alguna capa de un átomo.

Dispersión: Al incrementarse la energía del fotón el proceso principal cambia de efecto fotoeléctrico a efecto Compton, en donde un fotón incide con un electrón. La dispersión coherente se presenta cuando se mantiene una relación de fase definida entre las partículas o los fotones incidentes y los dispersos.

Producción de pares: Es un proceso que absorbe los fotones de energía muy alta y los fotones son convertidos en un campo eléctrico dentro de un electrón y un positrón.

Fotodesintegración: La desintegración de núcleos consiste en que el fotón es capturado por un núcleo, el cual pierde una o más de sus partículas constituyentes.

**ABSORCION DE PARTICULAS CARGADAS:** Al pasar a través de la materia, las partículas cargadas pierden energía por ionización o excitación de los átomos y moléculas, y por Bremsstrahlung (emisión de rayos X de espectro continuo) o pérdida de radiación por partículas de alta energía, principalmente electrones y positrones.

Ionización: La mayoría de las partículas cargadas pierden muy poca energía por cada ionización o excitación, comparada con su propia energía cinética. La partícula incidente sufre poca o ninguna deflexión durante este proceso.

Bremsstrahlung: La pérdida de energía de electrones a alta energía se debe a un mecanismo conocido como emisión de radiación electromagnética. Por su masa pequeña un electrón experimenta una gran desaceleración en el campo eléctrico del núcleo y como consecuencia será emitida una radiación. La radiación resultante o Bremsstrahlung es la influencia dominante en la pérdida de energía de electrones rápidos.

Dispersión de partículas cargadas: Este fenómeno resulta de colisiones cercanas de partículas incidentes con los núcleos o con un electrón orbital del anticátodo.

**ABSORCION DE NEUTRONES:** La fuente de neutrones es el reactor nuclear, los neutrones se forman por un proceso de fisión, un isótopo pesado inestable como Uranio o Plutonio, se desintegra en varios elementos con la liberación de varios neutrones.

El neutrón no lleva carga, no tiene ninguna interacción Coulomb y es libre de viajar a través del material hasta que tiene una colisión directa con un núcleo o electrón orbital del ánodo. Los neutrones son dispersados por el núcleo y absorbidos dentro de este.

La dispersión es un proceso elástico cuando el neutrón incide con el núcleo y rebota dejando al núcleo sin cambiar, e inelástico cuando el neutrón choca con el núcleo dejándolo en un estado de excitación.

### **11.5.- VENTAJAS**

Las ventajas que ofrece el monitoreo radiográfico como una prueba no destructiva, son las siguientes:

- ⑨ Su ventaja con respecto a las otras evaluaciones no destructivas es que tiene un amplio rango de energías de radiación, las cuales están disponibles para examinar materiales de espesores muy variados.
- ⑨ La radiografía es grabada a través de una imagen, y con esto proporciona un registro permanente para el análisis exhaustivo del área inspeccionada.
- ⑨ Mide espesores de materiales u objetos que son inaccesibles.
- ⑨ Mediante radiación neutrón, se pueden inspeccionar especímenes radioactivos.

### **11.6.- LIMITACIONES**

Las desventajas que se presentan al aplicar esta tecnología no destructiva, son las siguientes:

- ⑨ Los materiales con grandes espesores y alto número atómico, requieren de una energía de radiación más elevada para la radiografía. Además la energía de la fuente de radiación y el tiempo permitido para una exposición, pueden ser extendidos indefinidamente.
- ⑨ El manejo de isótopos radioactivos es peligroso.

- ⑨ El equipo es muy sofisticado y de alto costo, específicamente las fuentes de radiación neutrón.
- ⑨ El manejo de rayos X y rayos gamma es muy peligroso, por lo que se deben considerar señales de advertencia y tomar precauciones especiales al llevar a cabo la radiografía.
- ⑨ El personal que realiza la prueba debe estar bien protegido contra problemas asociados con los neutrones.
- ⑨ La técnica específicamente por absorción de neutrones, es no transportable debido a que el equipo e infraestructura son de gran tamaño.

### 11.7.- EQUIPO

El equipo básico que se utiliza para llevar a cabo esta tecnología no destructiva, es el siguiente:

- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| ⑨ Acelerador de electrones, betatrón o reotrón.   | ⑨ Fuentes de rayos gamma.         |
| ⑨ Acelerador de partículas Van der Graaff.        | ⑨ Isótopos radioactivos.          |
| ⑨ Generador de rayos X o roentgenómetro.          | ⑨ R-metro.                        |
| ⑨ Generador de neutrones o reactor nuclear.       | ⑨ Cables y conexiones.            |
| ⑨ Intensificador de imagen de rayos X.            | ⑨ Calibradores.                   |
| ⑨ Cartas técnicas de cada material radiografiado. | ⑨ Cámara de televisión.           |
| ⑨ Cámara de prisma rotativo de alta velocidad.    | ⑨ Cartón rígido.                  |
| ⑨ Cinta magnética de grabación de alta densidad.  | ⑨ Dosímetros de película.         |
| ⑨ Densitómetro para medir la densidad óptica.     | ⑨ Plástico suave y casetes.       |
| ⑨ Pastillas de grabación especializadas.          | ⑨ Monitor.                        |
| ⑨ Procesador automático de películas.             | ⑨ Bastidor de revelado.           |
| ⑨ Controles de manipulación.                      | ⑨ Compresor de aire.              |
| ⑨ Líneas de aire comprimido.                      | ⑨ Cuarto oscuro.                  |
| ⑨ proyectil de plomo o Cobre.                     | ⑨ Medidores de inspección.        |
| ⑨ Unidad de control.                              | ⑨ Microprocesadores.              |
| ⑨ Lupas y cristales de aumento.                   | ⑨ Blindajes y laminados de plomo. |

- ⑨ Alarmas visual y audible.
- ⑨ Manuales de procedimiento.

- ⑨ Vídeo sensor.
- ⑨ Guías y estándares de referencia.

### 11.8.- APLICACION

Las principales aplicaciones de la radiografía en la inspección y monitoreo de materiales y componentes estructurales, son las siguientes:

- ⑨ En soldaduras detecta discontinuidades tales como porosidad, escoria, inclusiones compactas, penetración incompleta, penetración excesiva, falta de fusión, socavados, solapas, grietas, concavidad y mala colocación.
- ⑨ Esta tecnología emplea la técnica de tomografía auxiliada por computadora (CAT) para medir la profundidad de las imperfecciones, en donde se hace girar el objeto de prueba con respecto a su eje o la fuente radiográfica con respecto al eje central del objeto de prueba.
- ⑨ En la radioactividad, determina las partes radiactivas de un objeto en instancias donde el material radioactivo es distribuido en una matriz inerte, permite diferenciar materiales de diferentes niveles de radioactividad en un material, mide el espesor y uniformidad de recubrimientos protectores sobre materiales radioactivos, y confirma y registra la presencia o localización de combustible en elementos de combustible del reactor nuclear.
- ⑨ Monitorea materiales radioactivos para determinar sus condiciones internas y evalúa los elementos de combustibles después de usarse en reactores nucleares.
- ⑨ Mide espesores de especímenes inaccesibles, generalmente en objetos con pared curva o de configuración cilíndrica como tubos. Proporciona mediciones tridimensionales permitiendo con esto medir el espesor de los defectos y determinar su forma y localización dentro del espécimen.

- ⑨ En los procesos de fundición permite detectar imperfecciones que varían en forma, tamaño y apariencia, tales como microporosidad, porosidad, vacíos de gas, inclusiones de arena, escoria, espuma de escoria, grietas, encogimientos y desgarres.
- ⑨ El isótopo Cobalto 60 inspecciona espesores mayores a 2.5 cm en metales como Fierro, bronce y Cobre, secciones más delgadas en materiales pesados como Tantalio y Uranio, y estructuras de acero de por lo menos de 20 cm de espesor. Mide la densidad del espesor del metal.
- ⑨ El isótopo Tulio 169 se emplea para radiografiar secciones con espesores de 1.8 mm en aceros y 13 mm en Aluminio, con 2 por ciento de sensibilidad.
- ⑨ Se utiliza para determinar la densidad y número atómico de materiales.
- ⑨ Monitorea explosivos, proyectiles, bombas, torpedos y cohetes bélicos.
- ⑨ Detecta defectos de manufactura, de almacenamiento y manejo.
- ⑨ Detecta corrosión en estructuras y fuselajes de naves aéreas y localiza áreas de agua atrapada e Hidrógeno frágil.

## **XII.- CONCLUSIONES**

Después de describir cada tecnología de las evaluaciones no destructivas, se concluye que todas son de gran importancia, debido a que intervienen en el control de calidad de cualquier proceso productivo, garantizando la seguridad e integridad de los materiales y componentes estructurales, haciendo posible la utilización de los equipos o componentes en toda su vida útil y creando un ambiente de trabajo con más seguridad.

Es evidente que un método nunca va a ser superior o inferior a otro, debido a que los límites de utilidad de cada ensayo están determinados por la condición del material de prueba, personal que la lleve a cabo y precisión en los procedimientos, entre otros, aunado a que cada técnica de las evaluaciones no destructivas solo es aplicable en materiales y situaciones específicas, y aun cuando se pudiera aplicar otro método que aplique casi los mismos principios, los resultados no serían los reales y esto conduciría a la mala interpretación de las indicaciones y por ende a la errónea toma de decisiones para corregir los defectos antes de alcanzar niveles catastróficos.

También se observa que las pruebas no destructivas de no contacto, tales como la termografía infrarroja y los métodos que utilizan ondas sónicas, son de gran relevancia en la industria moderna para asegurar la calidad y fiabilidad de cada uno de los procesos hasta obtener el producto terminado. Las pruebas electromagnéticas aplican las propiedades eléctricas y magnéticas para proporcionar la localización y comportamiento de las discontinuidades e imperfecciones presentes en los materiales y componentes estructurales.

Para obtener resultados confiables en la aplicación de las tecnologías de inspección no destructivas, es necesario conocer las diferentes propiedades y principios de operación de cada método de prueba, los materiales y componentes específicos que están en su rango de aplicación, y realizar cada paso del procedimiento eficientemente.

Las pruebas no destructivas, son tecnologías que permiten conocer la integridad de los objetos de prueba sin alterar sus características físicas, químicas, biológicas, ni su

serviceabilidad posterior, por lo que se asevera que estos tipos de inspección de materiales son los mejores desde el punto de vista de calidad, confiabilidad, seguridad y todos los aspectos que promuevan el bienestar, mejoren la calidad de vida y garanticen un constante funcionamiento sin interrupciones en los diferentes procesos industriales y de cualquier índole. Paralelamente a esto se aumenta la calidad de vida del hombre y además este obtiene grandes ingresos por el ahorro del capital que invertiría en la reparación o reemplazo de componentes y equipos.

Actualmente, todos los procesos que implican grandes inversiones o que son determinantes para obtener o desarrollar sistemas tecnológicos para lograr fines que no se obtendrían de otra forma, son regidos y controlados por los métodos de las evaluaciones no destructivas. Por lo que se debe gestionar para que se adopten estas tecnologías de inspección, para alcanzar una alta calidad de vida y al mismo tiempo preservar las condiciones ambientales para crear un ecosistema en el que interactúen en pro del bienestar el hombre, las máquinas y su medio ambiente, haciendo un uso eficiente y racional de la energía.

### **XIII.- BIBLIOGRAFIA**

Albert S. Birks et al, 1991 NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Vol. 7" Ultrasonic Testing", Segunda Edición, The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

A. L. Lucero, 1983 STUDY GUIDE, "Eddy Current Method", The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

ASNT, 1988 NDT BASICS "Materials Evaluation" The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

Bernard W. Boisvert et al, 1986 "The Fluorescent Penetrant Hydrophilic Remover Process", Oakland CA.

CATERPILLAR, 1989 "El Refrigerante y su Motor", Caterpillar Inc. Peoria Illinois.

CATERPILLAR, 1995 "Basics of Lubrication", Caterpillar Inc. Peoria Illinois.

CATERPILLAR, 1995 "El Aceite Lubricante y su Motor", Caterpillar Inc. Peoria Illinois.

D. L. Parry, 1988 "Acoustic Emission Inspection", Acoustic Emission International, Richland WA.

Ed. W. McKelvey, 1980 STUDY GUIDE, "Liquid Penetrant Method", The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

Francisco Martínez Pérez, 1997 “La Tribología, Ciencia y Técnica para el Mantenimiento” Editorial Limusa, Primera Reimpresión. México D. F.

Glenn D. White, 1997 “Introduction to Machine Vibration”, DLI Engineering Corp. Bainbridge Island Washington.

Godfrey Hands, 1999 “www.hands-ltd.demon.co.uk”

ILOG, 1996 "Inspección Visual, Nivel II" ILOG S. A. de C. V. México D. F.

Jean Claude Lenain, 1993 "General Principles of Acoustic Emission", Dunegan/Endevco, París Francia.

J. Thomas Schmidt et al, 1989 NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Vol. 6 "Magnetic Particle Testing", Segunda Edición, The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

Lawrence E. Bryant et al, 1985 NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Vol. 3 "Radiography and Radiation Testing", Segunda Edición, The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

Michael W. Allgaier et al, 1993 NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Vol. 8 "Optical and Visual Testing", Segunda Edición, The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

NDTA, 1996 “www.winzurf.co.nz”, NDTA Inc. Wellington, New Zealand.

Nuñez Centella Ramón, 1998 MUY INTERESANTE “Fin de Siglo”, Año XVII No. 3 Pág. 64-66.

Robert Anderson, 1980 STUDY GUIDE, "Basic", The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

Robert C. McMaster, 1986 "The Present and Future of Eddy Current Testing", Columbus Ohio.

Roderic K. Stanley et al, 1995 NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Vol. 9 "Special Nondestructive Testing", Segunda Edición, The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Columbus Ohio.

Shankles Dudley, 1999 "www.hitechtesting.com" Hi-Tech Testing Service, Inc. Longview, Texas.

Timothy J. Fowler et al, 1989 "Journal of Acoustic Emission", Physical Acoustics Corporation.

<http://lycos.infoplease.com>

<http://packers.pmaint.com>

[isowww.estec.esa.nl](http://isowww.estec.esa.nl)

[www.appliedconsultants.com](http://www.appliedconsultants.com)

[www.ar-chemie.de](http://www.ar-chemie.de)

[www.asnt.org](http://www.asnt.org)

[www.astm.org](http://www.astm.org)

[www.britanica.com](http://www.britanica.com)

[www.comimsa.com.mx](http://www.comimsa.com.mx)

[www.csndt.org](http://www.csndt.org)

[www.dgzfp.de](http://www.dgzfp.de)

[www.eni.it](http://www.eni.it)

[www.heatseekr.com](http://www.heatseekr.com)

[www.imagineering-inc.com](http://www.imagineering-inc.com)

[www.infraredtraining.com](http://www.infraredtraining.com)

[www.ipac.caltech.edu](http://www.ipac.caltech.edu)  
[www.ircameras.com](http://www.ircameras.com)  
[www.ndt.ca](http://www.ndt.ca)  
[www.ndt.net](http://www.ndt.net)  
[www.nondestructivetesting.com](http://www.nondestructivetesting.com)  
[www.noria.com](http://www.noria.com)  
[www.oilanalysis.com](http://www.oilanalysis.com)  
[www.powertech.co.uk](http://www.powertech.co.uk)  
[www.taiservices.com](http://www.taiservices.com)  
[www.termografia.com](http://www.termografia.com)  
[www.thermographics.com](http://www.thermographics.com)  
[www.tribology.com](http://www.tribology.com)  
[www.ubmusa.com](http://www.ubmusa.com)  
[www.ultrasonic-sciences.co.uk](http://www.ultrasonic-sciences.co.uk)  
[www.wmwassoc.com](http://www.wmwassoc.com)  
[www.x26.com](http://www.x26.com)  
[www.zetec.com](http://www.zetec.com)