



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE INSPECCIÓN
POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y POR LÍQUIDOS PENETRANTES
PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN MATERIALES
FERROMAGNÉTICOS**

Rony Rolando Ruiz Archila

Asesorado por el Ing. Francisco José González López

Guatemala, agosto de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE INSPECCIÓN
POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y POR LÍQUIDOS PENETRANTES
PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN MATERIALES
FERROMAGNÉTICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
P O R

RONY ROLANDO RUIZ ARCHILA

ASESORADO POR ING. FRANCISCO GONZÁLEZ
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2010

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE INSPECCIÓN
POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y POR LÍQUIDOS PENETRANTES
PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN MATERIALES
FERROMAGNÉTICOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica el 26 de abril de 2010.

Rony Rolando Ruiz Archila

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. MURPHY OLYMPO PAIZ RECINOS
VOCAL I	INGA. GLENDA PATRICIA GARCÍA SORIA
VOCAL II	INGA. ALBA GUERRERO DE LÓPEZ
VOCAL III	ING. MIGUEL ÁNGEL DÁVILA
VOCAL IV	BR. LUIS PEDRO ORTÍZ DE LEÓN
VOCAL V	AGR. JOSÉ ALFREDO ORTÍZ HERINCX
SECRETARIO	ING. HUGO HUMBERTO RIVERA PÉREZ

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO	ING. MURPHY OLYMPO PAIZ RECINOS
EXAMINADOR	ING. ROMEO NEFTALÍ LÓPEZ OROZCO
EXAMINADOR	ING. JUAN CARLOS MORATAYA
EXAMINADOR	ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA BARRIOS
SECRETARIA	INGA. MARCIA IVONNE VÉLIZ VARGAS

ACTO QUE DEDICO

A DIOS	Porque sin Él nada soy. A Él le doy toda la gloria, la honra y el reconocimiento de mis logros.
A MI ESPOSA	Karin Arenales de Ruiz a quien amo con todo mi corazón y quien siempre ha estado conmigo en todo, quien es y siempre será una bendición en mi vida.
A MIS HIJOS	Amy y Alain, a quienes amo inmensamente.
A MIS PADRES	María Magdalena Archila de Ruiz (Q.E.P.D.) Jesús Ruiz Mayorga (Q.E.P.D.) Porque me enseñaron el bien, el esfuerzo y el amor.
A MIS HERMANOS	Miriam Estela, Juan, Lesbia (Q.E.P.D.), Arnoldo, Erika, Eddy (Q.E.P.D.) y Mynor (Q.E.P.D.) con cariño especial.
A MIS SOBRINOS	Con amor.
A TODA MI FAMILIA, EN GENERAL	Con mucho cariño.
A MI ASESOR	Ing. Francisco González, gratitud por su apoyo brindado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	ix
GLOSARIO	xiii
RESUMEN	xvii
OBJETIVOS	xix
INTRODUCCIÓN	xxi
1. MÉTODOS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Generalidades.....	1
1.3 Clasificación de los métodos.....	2
1.4 Aplicaciones.....	3
2. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR MEDIO DE LÍQUIDOS PENETRANTES	
2.1 Introducción a los líquidos penetrantes.....	5
2.2 Antecedentes.....	6
2.3 Procedimiento para realizar una inspección por líquido penetrante.....	7
2.3.1 Preparación de la superficie.....	7
2.3.2 Aplicación del penetrante.....	7
2.3.3 Tiempo de penetración.....	8
2.3.4 Retirar el exceso de penetrante.....	10
2.3.5 Aplicación del revelador.....	10
2.3.6 Indicaciones del revelador.....	11
2.3.7 Inspección.....	11
2.3.8 Limpiar la superficie.....	13
2.4 Características de los líquidos penetrantes.....	13
2.4.1 Principios físicos.....	13

2.4.2	Características de los penetrantes.....	13
2.4.3	Tipos de líquidos penetrantes.....	14
2.4.3.1	Clasificación por color.....	14
2.4.3.1.1	Tipo I – Penetrante fluorescente.....	14
2.4.3.1.2	Tipo II – Penetrante visible o coloreado	14
2.4.3.2	Clasificación por solubilidad.....	14
2.4.3.2.1	Penetrantes lavables con agua o autoemul- sionables.....	14
2.4.3.2.2	Penetrantes post- emulsionables.....	15
2.4.3.2.3	Penetrantes lavables con solvente.....	15
2.4.4	Métodos para remover el penetrante.....	15
2.4.4.1	Método “A” – Penetrante lavable con agua.....	15
2.4.4.2	Método “B” – Penetrante post-emulsificante lipofílico.....	17
2.4.4.3	Método “C” – Penetrante removible con solvente.....	18
2.4.4.4	Método “D” – Penetrante post- emulsificante hidrofílico.....	20
2.4.5	Revelador.....	20
2.4.5.1	Forma a – Polvo seco.....	20
2.4.5.2	Forma b – Soluble en agua.....	20
2.4.5.3	Forma c – Suspensión en agua.....	20
2.4.5.4	Forma d – No acuoso Tipo 1 fluorescente (a base de solvente).....	21

2.4.5.5	Forma e – No acuoso Tipo 2 visible (a base de solvente).....	21
2.4.5.6	Forma f – Aplicaciones especiales.....	21
2.5	Consideraciones.....	21
2.6	Ventajas de las pruebas con líquidos penetrantes.....	22
2.7	Limitaciones de las pruebas con líquidos penetrantes.....	23

3. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR MEDIO DE PARTÍCULAS

MAGNÉTICAS		25
3.1	Introducción a las Partículas magnéticas.....	25
3.2	Antecedentes.....	26
3.3	Conceptos básicos.....	26
3.3.1	Leyes de Maxwell (Ampere).....	26
3.3.2	Magnetismo.....	27
3.3.3	Campos magnéticos.....	27
3.3.4	Partículas magnetizables.....	29
3.3.5	Magnetización.....	29
3.3.6	Curva de histéresis.....	30
3.3.7	Dominios magnéticos.....	32
3.4	Principios físicos.....	33
3.5	Procedimiento general.....	34
3.6	Tipos de materiales magnéticos	35
3.6.1	Diamagnéticos.....	35
3.6.2	Paramagnéticos.....	35
3.6.3	Ferromagnéticos.....	36
3.7	Permeabilidad magnética absoluta y relativa.....	36
3.8	Generación de campos magnéticos.....	39
3.8.1	Inducción directa.....	40
3.8.1.1	Conductores.....	40
3.8.1.2	Método por contacto directo.....	41
3.8.1.3	Puntas de contacto (electrodos).....	41
3.8.1.4	Entre cabezales.....	42

3.8.2	Inducción indirecta.....	42
3.8.2.1	Imanes permanentes.....	43
3.8.2.1.1	Barras de imán.....	43
3.8.2.1.2	Imán en forma de herradura.....	44
3.8.2.2	Por yugo.....	45
3.8.2.3	Bobina o cable enrollado.....	45
3.9	Tipos de corrientes para magnetizar.....	46
3.9.1	Corriente directa.....	47
3.9.2	Corriente alterna.....	48
3.9.3	Corriente alterna rectificada.....	50
3.9.3.1	Corriente alterna rectificada de media onda.....	51
3.9.3.2	Corriente alterna rectificada monofásica de onda completa.....	51
3.9.3.3	Corriente alterna rectificada trifásica de onda completa.....	52
3.10	Equipo para realizar las pruebas.....	52
3.10.1	Fijo (estacionario).....	52
3.10.2	Móvil (portátil).....	53
3.11	Medición de campos magnéticos.....	54
3.11.1	Importancia de los campos magnéticos.....	54
3.11.2	Equipo para medir campos magnéticos.....	55
3.11.2.1	Medición por indicadores de Campo.....	55
3.11.2.2	Por medio del dispositivo de medición por efecto-Hall.....	56
3.11.3	Orientación del campo magnético.....	57
3.12	Modo de Magnetización.....	58
3.12.1	Magnetización continua.....	58
3.12.2	Magnetización residual.....	58
3.13	Ecuaciones para partículas magnéticas.....	58

3.13.1	Fórmulas de la regla de la mano derecha.....	58
3.13.2	Área de la sección transversal.....	59
3.13.3	Calculando la corriente en una bobina.....	61
3.13.3.1	Fórmula para el cálculo de corriente en piezas recostadas en la parte baja de la bobina.....	62
3.13.3.2	Fórmula para el cálculo de corriente en piezas posicionadas en el núcleo de la bobina.....	63
3.14	Requerimientos de luz para la inspección con partículas magnéticas.....	64
3.15	Características de las partículas magnéticas.....	64
3.15.1	Partículas magnéticas secas.....	65
3.15.2	Partículas magnéticas en un fluido.....	65
3.16	Modo de aplicación de las partículas magnéticas.....	67
3.16.1	Vía seca.....	67
3.16.2	Vía húmeda.....	67
3.16.3	Comparación de los Métodos de partículas magnéticas, secas y húmedas.....	67
3.17	Pruebas de detección de defectos utilizando partículas magnéticas en un medio líquido (inspección húmeda).....	69
3.18	Pruebas de detección de defectos utilizando partículas magnéticas en un medio seco (inspección seca).....	71
3.19	Inspección.....	73
3.20	Desmagnetización.....	75
3.21	Ventajas de las pruebas con Partículas magnéticas.....	77
3.22	Limitaciones de las pruebas con Partículas magnéticas.....	77
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MÉTODO DE INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y POR LÍQUIDOS PENETRANTES.....	79
4.1	Consideraciones.....	80

4.2	Cuadro comparativo de los métodos de inspección por partículas magnéticas y líquidos penetrantes.....	82
5.	OTROS MÉTODOS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.....	85
5.1	Método de inspección por medio de corrientes Eddy.....	85
5.1.1	Introducción a las pruebas con corrientes Eddy.....	85
5.1.2	Características de las pruebas con corrientes Eddy. ...	86
5.1.3	Ventajas de las pruebas con corrientes Eddy.....	86
5.1.4	Limitaciones de las pruebas con corrientes Eddy.....	87
5.2	Método de inspección por medio ultrasónico.....	87
5.2.1	Introducción a las pruebas ultrasónicas.....	87
5.2.2	Características de las pruebas ultrasónicas.....	88
5.2.2.1	Método de pulso y eco, o de reflexión.....	88
5.2.2.2	Método de transmisión de un pulso a través del medio.....	88
5.2.2.3	Método de resonancia.....	89
5.2.3	Ventajas de las pruebas ultrasónicas.....	89
5.2.4	Limitaciones de las pruebas ultrasónicas.....	90
5.3	Método de inspección por medio radiográfico.....	90
5.3.1	Introducción a las pruebas radiográficas.....	90
5.3.2	Características del Método radiográfico.....	91
5.3.3	Ventajas del Método radiográfico.....	91
5.3.4	Limitaciones del Método radiográfico.....	92
5.4	Método de inspección visual.....	92
5.4.1	Introducción a las pruebas por inspección visual.....	92
5.4.2	Características del Método por inspección visual.....	92
5.4.3	Ventajas del Método por inspección visual.....	93
5.4.4	Limitaciones del Método por inspección visual.....	93

CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
BIBLIOGRAFÍA	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Aplicación del penetrante en <i>spray</i>	7
2	Líquido penetrante en una discontinuidad	8
3	Remover el exceso	10
4	Aplicar el revelador	11
5	Indicación de una rajadura en una soldadura	12
6	Indicación de una rajadura en una sierra circular	12
7	Diagrama de flujo – Método “A”	16
8	Diagrama de flujo – Método “B y D”	17
9	Diagrama de flujo – Método “C”	19
10	Campo magnético	28
11	Campo de fuga	30
12	Curva de histéresis	31
13	Material desmagnetizado	33
14	Material magnetizado	33
15	Discontinuidad perpendicular a la línea de campo magnetizable	34
16	Campo magnético alrededor de un conductor	40
17	Puntas de contacto	41
18	Entre cabezales	42
19	Magnetización indirecta	43
20	Barra de imán	44
21	Imán en forma de herradura	44
22	Yugo electromagnético	45
23	Campo magnético producido por una bobina	46
24	Corriente directa rectificada de media	47
25	Curva sinusoidal de corriente alterna	48

26	Corriente alterna rectificada	50
27	Banca horizontal húmeda	53
28	Equipo móvil	54
29	Orientación del campo magnético y la detección de defectos	55
30	Medidor de campo	56
31	Medidor efecto-Hall (Gauss/Tesla)	56
32	Regla de la mano derecha	58
33	Partículas magnéticas secas	65
34	Partículas magnéticas en fluido visible (coloreadas)	65
35	Partículas magnéticas en fluido fluorescente	66
36	Indicaciones comparativas entre partículas secas y húmedas	68
37	Indicación de una rajadura por medio de partículas magnéticas húmedas fluorescentes	70
38	Indicación por medio de partículas magnéticas	72
39	Indicaciones en una pieza utilizando partículas magnéticas fluorescentes	73
40	Típica indicación por partículas magnéticas de una rajadura	74
41	Indicaciones de un caso severo de rajaduras	74

TABLAS

I	Tiempos típicos de penetración	9
II	Permeabilidades relativas	38
III	Tamaño de la bobina versus diámetro máximo para partes magnetizadas en la parte baja del núcleo de una bobina	61
IV	Corriente típica sobre una bobina de cinco vueltas para piezas colocadas en la parte baja del núcleo de la bobina	63
V	Costo relativo y otras características de dos métodos de pruebas no destructivas	81
VI	Comparación de dos métodos de pruebas no destructivas	82

GLOSARIO

AC	Corriente alterna
Bobina	Componente de un circuito eléctrico formado por un alambre aislado que se arrolla en forma de hélice con un paso igual al diámetro del alambre.
Campo de fuga	Campo magnético que resulta fuera de la pieza magnetizada debido a la presencia de un defecto, de un cambio de permeabilidad magnética, o, de un cambio en el corte de la pieza.
Campo magnético	Es el espacio ocupado por las líneas de flujo o de fuerza magnética dentro y alrededor de un imán o un conductor que es recorrido por una corriente eléctrica donde una fuerza magnética es ejercida.
Capilaridad	Acción que origina que un líquido ascienda o descienda a través de los tubos capilares.
Cohesión	Fuerza que mantiene a las moléculas de un cuerpo a distancias cercanas unas de las otras.
Conductividad	Capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica.
Corriente inducida	Es una corriente eléctrica que se obtiene al someter un material eléctrico a un campo magnético.

Corriente magnetizante	Corriente eléctrica que pasa a través de o junto a un objeto que produce un campo magnético.
DC	Corriente directa
Discontinuidad	Interrupción en la estructura física normal de un material.
Dominio	Una región en un material ferromagnético en que todos los momentos magnéticos están alineados.
Electromagnetismo	Campo magnético generado, eléctricamente.
Ferromagnético	El ferromagnetismo es un fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido. Un material ferromagnético es aquel que puede presentar ferromagnetismo.
Fuerza coerciva	Fuerza magnetizante aplicada de forma negativa o revertida que se necesita para reducir la fuerza magnetizante residual a cero en un material ferromagnético, luego de haber alcanzado la saturación magnética.
Fuerza magnetizante	Campo magnetizante aplicado a material ferromagnético para inducir la magnetización.

Histéresis magnética	La histéresis es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.
Indicación	Es la visualización de una discontinuidad en un material, determinada por cualquiera de los métodos de pruebas no destructivas.
Líquido penetrante	Líquido que contiene un tinte el cual penetra en las discontinuidades superficiales por medio de la acción capilar.
Magnetismo	Fenómeno físico por el que los materiales ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales.
Magnetismo residual	Cantidad de magnetismo que existe en un material aún después de suspender la fuerza magnetizante.
Magnetización por contacto directo	Uso de corriente eléctrica a través de una pieza por medio de puntos de contacto para producir un campo magnético.
Permeabilidad Magnética	Es la facilidad con que una pieza ferromagnética puede ser magnetizada. Es igual al ratio de la densidad de flujo producida por una fuerza magnetizante que provoca un campo magnético y cambia su valor de acuerdo a los cambios de la intensidad de la fuerza magnetizante. Un metal que fácilmente se magnetiza tiene una alta permeabilidad.

Pruebas no destructivas (PND)	El empleo de propiedades físicas o químicas de materiales para la evaluación indirecta de materiales sin dañar su utilidad futura.
Retentividad	Propiedad de un metal de permanecer magnetizado aunque la fuerza magnetizante haya sido suspendida. Un metal como el acero tiene un porcentaje alto de carbón y guardará un campo magnético fuerte luego de haberle quitado la corriente magnetizante. El acero endurecido tiene una alta retentividad, o bien es altamente retentivo.
Saturación magnética	Nivel de magnetismo en un material ferromagnético donde la permeabilidad magnética es igual a uno.
Subsuperficial	Área, aproximadamente, hasta ¼” de profundidad desde la superficie.
Transductor	Dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida.

RESUMEN

Actualmente, existen varios métodos de inspección que sirven para evaluar y determinar si un material ferromagnético tiene defectos o no. La ventaja de utilizarlos es porque no distorsionan ni destruyen el material a evaluar.

En el presente trabajo se explica de manera general, cómo se realizan las pruebas utilizando dos métodos de pruebas no destructivas (PND): por partículas magnéticas y por líquidos penetrantes. Adicionalmente, se hace una comparación entre ambos métodos, y, se presentan ventajas y limitaciones de cada uno de ellos. También se presentan otros métodos de inspección: por corrientes Eddy, por pruebas ultrasónicas, por pruebas radiográficas y por inspección visual. Todos ellos se utilizan con el mismo propósito, detectar si existen defectos en un material ferromagnético para evitar poner en riesgo vidas humanas.

Las PND son poco conocidas en nuestro medio, pero, muy necesarias en la industria. El campo de aplicación es amplio, por ejemplo, es importante conocer la utilidad de las pruebas no destructivas en la fabricación de piezas metálicas industriales en sus distintas etapas. También se utilizan en el mantenimiento preventivo de piezas, como, eslabones de cadenas, tuberías metálicas, soldaduras, ganchos de plumas, ejes de transmisión, calderas, entre otros.

Finalmente, se espera brindarle al lector una introducción al mundo de las pruebas no destructivas y despertar su interés por aprender más del tema.

OBJETIVOS

* **General**

Analizar y comparar el método de pruebas por medio de partículas magnéticas y el método por medio de líquidos penetrantes para la detección de defectos en materiales ferromagnéticos y, así, evitar poner en riesgo vidas humanas.

* **Específicos**

1. Conocer cómo funciona el método de inspección por medio de partículas magnéticas y el de líquidos penetrantes.
2. Conocer las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos.
3. Ampliar los conocimientos del lector para que conozca un campo de trabajo que puede ser explotado, como el proporcionar servicio de mantenimiento preventivo y de detección de defectos en piezas metálicas ferromagnéticas (ganchos de plumas, tuberías, fundiciones, soldaduras, ejes de transmisión, cadenas, etc.) en la industria.

INTRODUCCIÓN

Las pruebas no destructivas (PND) son un grupo de técnicas de análisis utilizadas en la industria para evaluar las propiedades físicas o químicas de un material, componente o sistema sin necesidad de dañar la pieza. Son útiles para poder encontrar discontinuidades o defectos en piezas. Debido a que las pruebas no destructivas no alteran de manera permanente la pieza inspeccionada, son unas técnicas muy utilizadas para ahorrar dinero y tiempo en la evaluación de un componente.

Actualmente, existe información sobre pruebas no destructivas pero lamentablemente la mayoría de los libros están en idioma inglés y otros. Debido a ello, muchas personas desconocen la existencia de estas técnicas tan útiles para la industria.

En el presente trabajo de graduación se analizarán dos métodos de pruebas no destructivas para la detección de defectos o discontinuidades en materiales ferromagnéticos. Se analizará el método de partículas magnéticas comparado con el método de líquidos penetrantes. Estos dos métodos son muy efectivos y de bajo costo. Asimismo, se presentarán las ventajas y limitaciones de utilizar cada uno de ellos. Se verá cómo la electricidad puede formar parte de una prueba para detectar defectos en componentes. De igual manera, se informará sobre las ventajas y limitaciones de cada uno de los dos métodos comparados.

Para finalizar, se proporcionará información adicional sobre otros métodos existentes para brindarle al lector un panorama más amplio sobre el tema de pruebas no destructivas.

1. MÉTODOS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

1.1 Antecedentes

Las pruebas no destructivas (PND) se han practicado por muchas décadas. Se tiene registro desde 1868 cuando se comenzó a trabajar con campos magnéticos. Uno de los métodos más utilizados fue la detección de grietas superficiales en ruedas y ejes de ferrocarril. Sin embargo, con el desarrollo de los procesos de producción, la detección de discontinuidades ya no era suficiente. Era necesario también contar con información cuantitativa sobre el tamaño de la discontinuidad, para utilizarla como fuente de información, con el fin de realizar cálculos matemáticos y poder predecir, así, la vida mecánica de un componente.

A través de los años se han ido desarrollando nuevos métodos de pruebas no destructivas para la detección de defectos. Aún más, existe una idea falsa que el uso de pruebas no destructivas garantizará, en cierta medida, que una pieza no fallará o no tendrá desperfectos. Sin embargo, esto no es totalmente cierto. Cada método de pruebas no destructivas tiene sus limitaciones. En la mayoría de casos, para una inspección a fondo, se requerirá de un mínimo de dos métodos y, para ello, es necesario conocer las ventajas y limitaciones de cada método, previo a utilizarlas.

1.2 Generalidades

Las pruebas no destructivas se pueden definir como: el empleo de propiedades físicas o químicas de materiales, para la evaluación indirecta de materiales sin dañar su utilidad futura.

Para detectar defectos en una estructura o componente se debe realizar este tipo de pruebas para determinar si existen discontinuidades, rajaduras o imperfecciones en las piezas bajo evaluación. Lo que se pretende encontrar son interrupciones en la estructura física normal de un material.

Las pruebas no destructivas son herramientas comúnmente utilizadas en la ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica, ingeniería civil y en la ingeniería de sistemas.

1.3 Clasificación de los métodos

Los principales métodos de inspección estándar de pruebas no destructivas para la detección de defectos en materiales ferromagnéticos incluyen:

- a. Líquidos penetrantes
- b. Partículas magnéticas
- c. Corriente Eddy
- d. Ultrasónicos
- e. Radiográficos
- f. Inspección visual

El método que siempre debe aplicarse primero es el de inspección visual. En numerosas oportunidades puede obviarse el aplicar métodos de pruebas más complejos si se realiza, primeramente, una inspección visual a la pieza.

1.4 Aplicaciones

Los ensayos no destructivos se aplican, principalmente, en la inspección de materia prima, inspección en proceso, inspección de producto terminado y mantenimiento de equipo y maquinaria. Se utilizan para la inspección de materiales soldados, fundidos, forjados, etc. Asimismo, se utilizan en una variedad de ramas que cubren una gran gama de actividades industriales.

- a. En la industria automotriz: partes de motores, chasis, soldaduras.
- b. En aviación e industria aeroespacial: exteriores, chasis, plantas generadoras, motores a reacción, cohetes espaciales.
- c. En construcción: estructuras, puentes, fundiciones, plumas.
- d. En manufactura: partes de máquinas.
- e. En ingeniería nuclear: recipientes a presión.
- f. En petroquímica: transporte por tuberías, tanques de almacenamiento.
- g. Misceláneos: juegos de atracciones de parques de diversiones, eslabones de cadenas, rieles de ferrocarril, ruedas de tren.
- h. En generadoras de electricidad (calderas).

2. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR MEDIO DE LÍQUIDOS PENETRANTES

2.1 Introducción a los líquidos penetrantes

Las pruebas por líquidos penetrantes es un método utilizado para detectar discontinuidades superficiales tales como rajaduras, en materiales que no sean porosos. Este método utiliza un líquido que contenga un tinte el cual penetra en las discontinuidades superficiales por medio de la acción capilar. El líquido atrapado incrementará el nivel de visibilidad de la discontinuidad al proveer un contraste visual entre la discontinuidad y la superficie que la rodea.

Esta prueba es uno de los métodos más antiguos. Fue utilizado en el mantenimiento de ferrocarriles a finales de los años 1800. Sabiendo aplicar el método, es posible detectar un amplio rango de discontinuidades que varían desde defectos visibles y notorios en tamaño, hasta discontinuidades microscópicas, siempre y cuando dichas discontinuidades estén abiertas a la superficie y no estén cubiertas por algún otro material. El método por medio de líquidos penetrantes está siendo utilizado como un método secundario para muchas aplicaciones.

La inspección por líquidos penetrantes es un tipo de ensayo no destructivo que se utiliza para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales examinados. Generalmente, se emplea en aleaciones no ferrosas, aunque también se puede utilizar para la inspección de materiales ferrosos cuando la inspección por partículas magnéticas es difícil de aplicar.

En algunos casos se puede utilizar en materiales no metálicos. El procedimiento consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie en estudio, el cual penetra en cualquier discontinuidad que pudiera existir debido al fenómeno de capilaridad. Después de un determinado tiempo se remueve el exceso de líquido y se aplica un revelador, el cual absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa del revelador se delinea el contorno de éstas.

Las aplicaciones de esta técnica son amplias, y, van desde la inspección de piezas críticas como son los componentes aeronáuticos hasta los cerámicos como las vajillas de uso doméstico. Se pueden inspeccionar materiales metálicos, cerámicos vidriados, plásticos, porcelanas, recubrimientos electroquímicos, entre otros.

2.2 Antecedentes

La inspección por líquidos penetrantes es uno de los métodos más antiguos de pruebas no destructivas. La primera vez que se utilizó fue en el mantenimiento de ferrocarriles a finales de 1800. Las piezas a ser inspeccionadas eran sumergidas en aceite usado de máquinas. Luego de un período, las piezas eran retiradas del aceite y el excedente de aceite sobre la superficie era limpiado con trapos. Luego, la superficie de la pieza era cubierta con un yeso en polvo o una mezcla de yeso suspendida en alcohol. El aceite que estaba atrapado en las rajaduras o discontinuidades se salía de la rajadura, causando una mancha notoria en la capa de yeso blanco.

2.3 Procedimiento para realizar una inspección por líquido penetrante

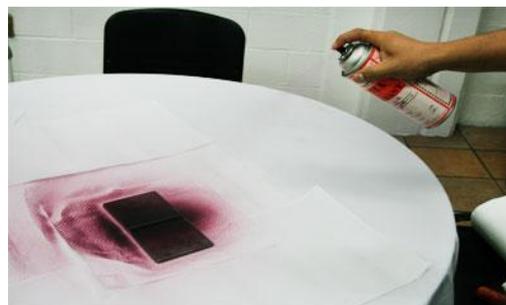
2.3.1 Preparación de la superficie

Uno de los pasos más críticos para realizar una inspección por líquidos penetrantes es la preparación de la superficie. La superficie debe estar libre de tierra, pintura, aceite, grasa, agua o cualquier otro contaminante que impida al penetrante a entrar en la rajadura. Si la superficie se lija o se realiza alguna operación mecánica que tape las rajaduras, entonces, eso evitará que se pueda llevar a cabo la prueba con líquidos penetrantes. Generalmente, se utilizarán solventes, vapor desengrasante o algún otro método de limpieza alcalino. El objetivo es limpiar la superficie donde haya defectos para que éstos estén abiertos a la superficie.

2.3.2 Aplicación del penetrante

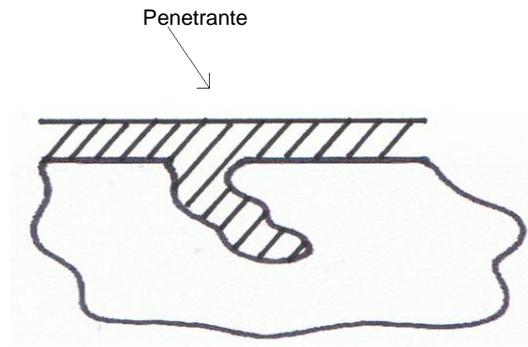
Una vez la superficie esté limpia y seca, entonces, se aplica el material penetrante por medio de *spray* (ver figura 1), con brocha o sumergiendo la pieza en un baño con el penetrante. El líquido penetrante ingresará en la discontinuidad como se puede observar en la figura 2.

Figura 1. **Aplicación del penetrante en *spray***



Fuente: LLOG, S.A. de C.V. **Tutorial líquidos penetrantes.**

Figura 2. Líquido penetrante en una discontinuidad



2.3.3 Tiempo de penetración

El penetrante debe permanecer sobre la superficie durante un periodo necesario para que la mayor cantidad de penetrante ingrese en las rajaduras. El tiempo de penetración, generalmente, es sugerido por el proveedor del penetrante o, bien, el necesario, según la especificación dada. El tiempo varía dependiendo de la aplicación, del material penetrante utilizado, de la pieza, de la forma de la pieza a ser probada y del tipo de defecto que se está buscando. El tiempo de penetración varía, aproximadamente, desde 7 hasta 60 minutos. Generalmente, no causa problema el dejar el penetrante un tiempo prolongado, siempre y cuando éste no se seque. Generalmente, se determina con base en la experiencia.¹ La tabla I muestra tiempos típicos de penetración en materiales específicos.

Tabla I. Tiempos típicos de penetración

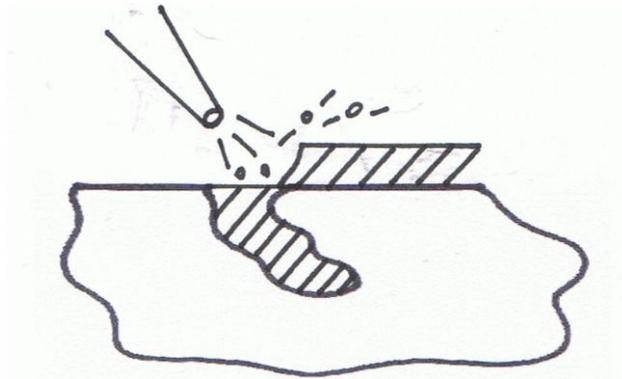
Material	Forma	Tipo de discontinuidad	Tiempo de penetración (minutos)		
			Lavable con agua	Postemulsificable	Removible con solvente
Acero	Fundiciones	Porosidad	30	10	5
		Traslapes en frío	30	10	7
	Extrusiones y forjas	Traslapes	NR	10	7
		Soldaduras	Falta de fusión	60	20
		Porosidad	60	20	7
	Todas	Fracturas	30	20	7
Todas	Fracturas x fatiga	NR	30	10	
Aluminio	Fundiciones	Porosidad	5 a 10	5	3
		Traslapes en frío	5 a 10	5	3
	Extrusiones y forjas	Traslapes	NR	10	7
		Soldaduras	Falta de fusión	30	5
		Porosidad	30	5	3
	Todas	Fracturas	30	10	5
Todas	Fracturas x fatiga	NR	30	5	
Magnesio	Fundiciones	Porosidad	15	5	3
		Traslapes en frío	15	5	3
	Extrusiones y forjas	Traslapes	NR	10	7
		Soldaduras	Falta de fusión	30	10
		Porosidad	30	10	5
	Todas	Fracturas	30	10	5
Todas	Fracturas x fatiga	NR	30	10	
Latón, Bronce y Plásticos	Fundiciones	Porosidad	10	5	3
		Traslapes en frío	10	5	3
	Extrusiones y forjas	Traslapes	NR	10	7
		Soldaduras	Falta de fusión	15	10
		Porosidad	15	10	3
	Todas	Fracturas	30	10	3
Todas	Fracturas x fatiga	5 a 30	5	5	
Cristales	Todas	Fracturas	5 a 30	5	5
Htas. de Carburo	Soldadura	Falta de fusión	30	5	3
		Porosidad	30	5	3
		Fracturas	30	20	5
Titanio	Todas		NR	20 a 30	15
Todos los Metales	Todas	Esfuerzos o corrosión intergranular	NR	240	240

Fuente: LLOG, S.A. de C.V. Tutorial líquidos penetrantes.

2.3.4 Retirar el exceso de penetrante

Esta es la parte más delicada del proceso ya que deberá retirarse el exceso de penetrante de la superficie de la pieza mientras que deberá quitarse lo menos posible del penetrante que esté en las rajaduras (ver figura 3). Dependiendo del penetrante utilizado, este paso puede involucrar la limpieza con un solvente, enjuagar directamente con agua o, bien, tratar la pieza con un emulsificador para, luego, enjuagar con agua.

Figura 3. **Remover el exceso**

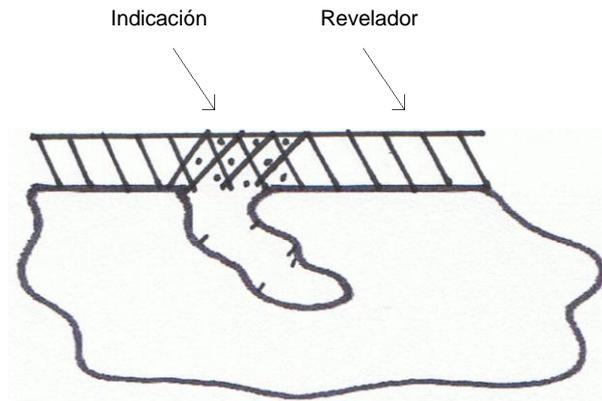


2.3.5 Aplicación del revelador

Luego de haber retirado el exceso de penetrante, se debe aplicar una capa delgada de revelador blanco sobre la pieza, para que el penetrante que estaba atrapado en la ranadura suba a la superficie y que sea visible. Los reveladores vienen en diferentes formas que pueden ser aplicados ya sea en polvo, sumergiendo o en *spray*. El revelador atrae el penetrante que estaba atrapado en el defecto y lo expulsa hacia la superficie de manera visible (indicación). La indicación mostrará la ubicación, orientación y posibles tipos de defectos sobre la superficie.

A esto le llaman una indicación (ver figura 4). El interpretar los resultados puede requerir experiencia o entrenamiento.¹

Figura 4. **Aplicar el revelador**



2.3.6 Indicaciones del revelador

El revelador deberá permanecer sobre la superficie de la pieza durante un periodo de tiempo suficiente que permita la extracción del penetrante atrapado de cualquier rajadura. El tiempo, generalmente, es un mínimo de 10 minutos. Muchas veces se requiere un tiempo más prolongado para rajaduras que estén muy compactas.

2.3.7 Inspección

Luego, se lleva a cabo una inspección bajo iluminación adecuada para detectar alguna indicación de cualquier rajadura que pueda existir. Para penetrante visible (coloreado) se utilizará luz adecuada, ahora, para penetrante fluorescente se utilizará luz ultravioleta junto con luz ambiental pero de baja intensidad. La inspección de la superficie deberá realizarse 10 minutos después del tiempo de revelado. El tiempo de revelado hará que el penetrante se disipe.

El inspector podrá observar la indicación cuando se ha utilizado el penetrante visible (ver figura 5). Es bueno observar las indicaciones mientras se están formando porque esto ayuda en la interpretación de las mismas (ver figura 6).

Figura 5. Indicación de una rajadura en una soldadura



Fuente: Iowa State University. *NDT Education resource center.*

Figura 6. Indicación de una rajadura en una sierra circular



Fuente: Iowa State University. *NDT Education resource center.*

2.3.8 Limpiar la superficie

Luego de haber anotado los defectos, el último paso en el proceso es limpiar completamente la superficie de la pieza para remover el revelador de las partes que estaban sin problema.

2.4 Características de los Líquidos penetrantes

2.4.1 Principios físicos

Se requiere que el líquido pueda dispersarse y mojar una superficie. La habilidad de un líquido de cubrir la superficie de una pieza y entrar en cualquier rajadura depende de: la tensión superficial, la habilidad de mojarse y la acción capilar.

2.4.2 Características de los penetrantes

Un penetrante deberá:

- a. esparcirse fácilmente sobre la superficie de la pieza a ser inspeccionada,
- b. ser absorbida por las rajaduras debido a la acción capilar,
- c. permanecer dentro de la discontinuidad pero ser fácilmente removida de la superficie de la pieza,
- d. permanecer como fluido para que pueda expulsarse de la rajadura,
- e. ser altamente visible o fluorescente para producir una indicación visible,
- f. no ser dañina al material que se está inspeccionando.

2.4.3 Tipos de Líquidos penetrantes

2.4.3.1 Clasificación por color

2.4.3.1.1 Tipo I – Penetrante fluorescente

Se inspeccionan con la ayuda de una lámpara de luz ultravioleta. Sin ésta son invisibles a la vista. Algunos compuestos químicos tienen la capacidad de emitir luz visible cuando son expuestos a radiación casi ultravioleta (UV-A), comúnmente llamada luz negra. Los penetrantes Tipo I se formulan con un tinte que presenta una propiedad de fluorescencia cuando se exponen a la luz negra. Proveen una excelente sensibilidad para detectar discontinuidades superficiales pequeñas ya que pequeñas cantidades de penetrante fluorescente mostrará un alto nivel de visibilidad cuando se exponen a la radiación UV-A.¹

2.4.3.1.2 Tipo II – Penetrante visible o coloreado

Los penetrantes contienen un tinte rojo disuelto en el aceite penetrante. La visibilidad se aumenta aún más durante el proceso al aplicar la capa de revelador blanco. El revelador blanco provee un alto contraste de fondo para el penetrante rojo cuando sea observado bajo luz natural o luz blanca.¹

2.4.3.2 Clasificación por solubilidad

2.4.3.2.1 Penetrantes lavables con agua o autoemulsionables

Para su limpieza y remoción de excesos, simplemente, se usa agua. Resultan muy económicos de utilizar.

2.4.3.2.2 Penetrantes post-emulsionables

No son solubles en agua. Para la remoción de los excesos superficiales se utiliza un emulsionante que crea una capa superficial que se remueve con agua. Es el método con la mayor sensibilidad, se obtiene y en el que mayor dominio de cada una de las etapas tiene el operador.

Existen dos tipos de emulsionantes: los hidrofílicos de base acuosa, que se utilizan en solución de agua, en una saturación determinada por las necesidades del caso y los lipofílicos de base aceite, que se utilizan tal como los entrega el fabricante.

2.4.3.2.3 Penetrantes lavables con solvente

Tampoco son solubles en agua. Para su remoción se utiliza un solvente no acuoso. En la práctica se utilizan los mismos materiales de los penetrantes post emulsionables. Son muy prácticos de utilizar ya que el solvente, generalmente, se presenta en aerosol.

2.4.4 Métodos para remover el penetrante

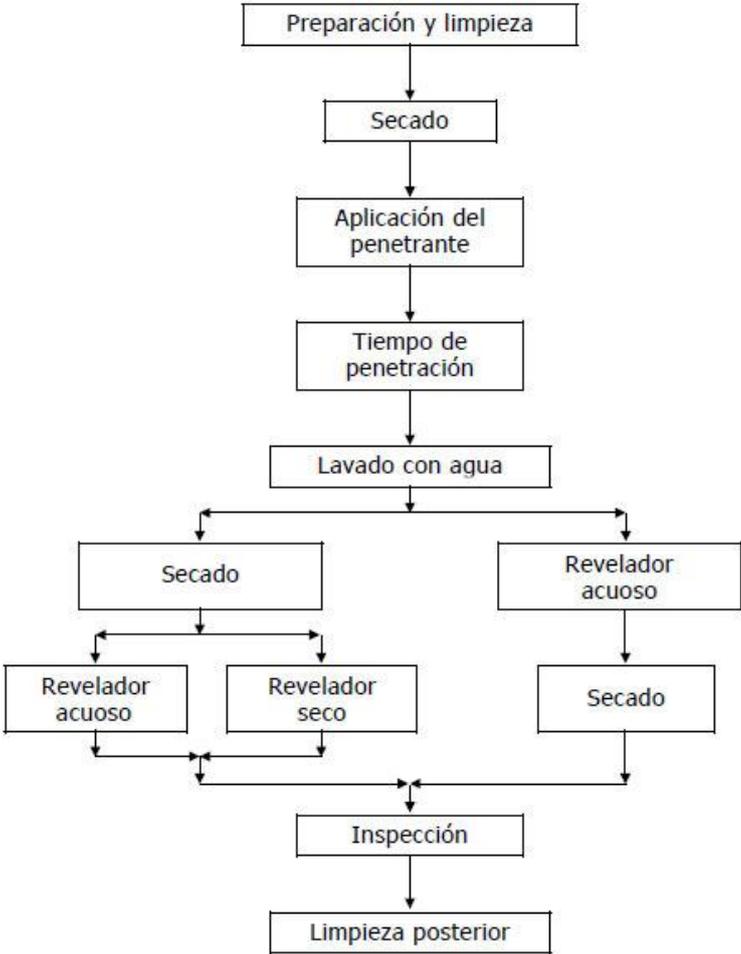
Los penetrantes son formulados y categorizados, según el método específico para removerlo, y, no debido al material que se utilizó para formularlo.²

2.4.4.1 Método “A” – Penetrante lavable con agua

La base líquida común para un penetrante es el aceite mineral, el cual es insoluble en agua. Esto significa que el penetrante no puede ser removido con agua, sin embargo, hay compuestos químicos llamados emulsificadores que cuando se mezclan con el medio de aceite forman una mezcla que puede ser removida con agua. El compuesto químico que forma la mezcla emulsificante es llamado agente emulsificante o emulsificador.

Los penetrantes lavables con agua son formulados con un emulsificador como parte integral del medio penetrante. Esto permite que se pueda remover directamente con agua, inmediatamente después, que se aplicara el penetrante.

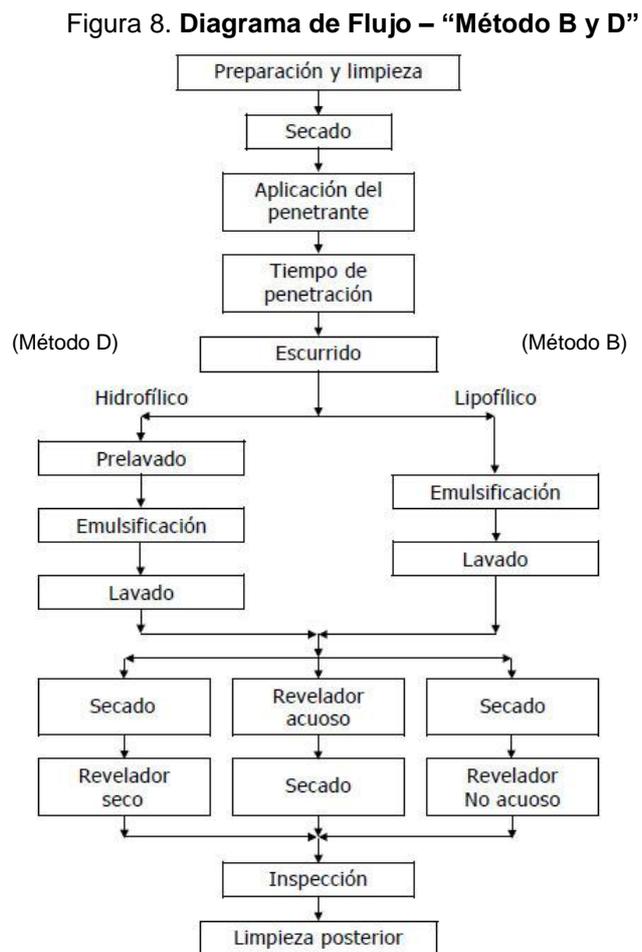
Figura 7. Diagrama de flujo – Método “A”



Fuente: US Air Force. *Nondestructive inspection methods, basic theory*. Pág. 2-37

2.4.4.2 Método “B” – Penetrante post-emulsificante lipofílico

Los emulsificadores lipofílicos son productos a base de aceites, los cuales son aplicados con el propósito de convertir el penetrante excedente de la superficie, en una mezcla emulsificante que pueda ser removida con agua. Los penetrantes del método “B” son formulados para optimizar las características de penetración y visibilidad. No contienen agentes emulsificantes y no pueden ser removidos por completo con agua únicamente. Para remover se debe aplicar un emulsificador en un proceso por separado.



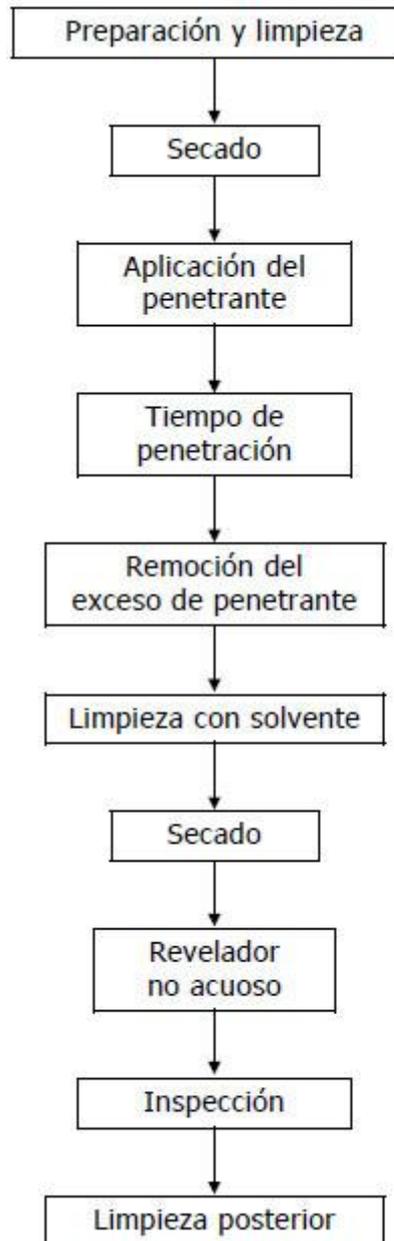
Fuente: US Air Force. *Nondestructive inspection methods, basic theory*. Pág. 2-38, 2-40

2.4.4.3 Método “C” – Penetrante removible con solvente

Los solventes utilizados pueden contener compuestos aromáticos, alifáticos o halogenados. Los compuestos aromáticos son formados por hidrocarburos y benceno. Los alifáticos son derivados de las grasas, como la parafina. Los halogenados son una combinación de halógenos, fluoruro y/o cloro. Muchos solventes son altamente inflamables mientras que otros pueden descomponerse a altas temperaturas. Deben mantenerse todos los solventes lejos del calor y del fuego. Los vapores pueden ser tóxicos por lo que debe haber ventilación adecuada.

El Método “C”, generalmente, viene en latas de *spray*. El Método removible por solventes utiliza un paño con solvente para remover el exceso de penetrante sobre la superficie. Todos los penetrantes pueden ser removidos con solventes.

Figura 9. Diagrama de Flujo – “Método C”



Fuente: US Air Force. *Nondestructive inspection methods, basic theory*. Pág. 2-39

2.4.4.4 Método “D” – Penetrante post-emulsificante, hidrofílico

El método hidrofílico emulsificante requiere del uso de una solución para remover a base de agua (ver figura 8). Este es el método utilizado en la industria aeroespacial.

2.4.5 Revelador

La función del revelador es sacar el material penetrante atrapado en la rajadura o discontinuidad y exponerlo sobre la superficie de la pieza para que sea visible durante la inspección. Los reveladores vienen en varias formas:

2.4.5.1 Forma a – Polvo seco

El polvo seco es considerado como el menos sensitivo pero es económico y fácil de aplicarlo.

2.4.5.2 Forma b – Soluble en agua

Consiste en un grupo de químicos que son disueltos en agua y forman una capa de revelador cuando el agua se ha evaporado. La mejor manera de aplicarlo es en forma de *spray*. La pieza puede estar seca o mojada.

2.4.5.3 Forma c – Suspensión en agua

Consiste en partículas reveladoras insolubles suspendidas en agua. Requieren que se mezclen constantemente para que las partículas no se asienten en el fondo. Se aplican igual que los reveladores solubles en agua.

2.4.5.4 Forma d – No acuoso Tipo 1 fluorescente (a base de solvente)

El revelador es en forma de suspensión en un solvente volátil y se aplica con una pistola de *spray*. También se encuentran en forma de latas de *spray*. Este revelador deberá aplicarse a una superficie completamente seca.

2.4.5.5 Forma e – No acuoso Tipo 2 visible (a base de solvente)

El revelador es en forma de suspensión en un solvente volátil pero con penetrantes coloreados.

2.4.5.6 Forma f – Aplicaciones especiales

Se utiliza un revelador plástico o de laca cuando se requiere una indicación permanente.

2.5 Consideraciones

La principal decisión que se debe tomar es si usar penetrante fluorescente o penetrante visible (coloreado). Los penetrantes fluorescentes son capaces de producir una indicación notoria de un defecto pequeño, según datos presentados por De Graaf y De Rijk, en donde se inspeccionaron rajaduras por fatiga, idénticas. Para ello se utilizó penetrante visible rojo y penetrante fluorescente. Con el penetrante fluorescente se encontraron 60 defectos mientras que con el penetrante visible sólo se encontraron 39 defectos.¹

Bajo ciertas condiciones, puede ser mejor un penetrante visible, como por ejemplo, cuando se están revisando defectos grandes. También dan mejores resultados cuando la superficie es áspera. Adicionalmente, un penetrante visible es más fácil de utilizar en el campo debido a que no se requiere un cuarto oscuro para el uso de luz ultravioleta.

2.6 Ventajas de las pruebas con líquidos penetrantes

- a. Se pueden inspeccionar áreas y volúmenes grandes de manera rápida y a bajo costo.
- b. Se pueden probar piezas de forma geométrica compleja.
- c. Los penetrantes en forma de latas de *spray* son portátiles.
- d. Los materiales penetrantes y el equipo asociado son, relativamente baratos.
- e. Se pueden detectar discontinuidades superficiales muy pequeñas. Es un método muy sensible para detectar defectos superficiales.
- f. Puede utilizarse en una amplia variedad de materiales: metálicos y no metálicos, magnéticos y no magnéticos, conductivos y no conductivos, cerámica, vidrio y algunos materiales orgánicos.
- g. Las pruebas con líquido penetrante muestran los defectos, visiblemente, más grandes de lo que son. Debido a ello es posible realizar una evaluación de la ubicación, orientación y longitud del defecto.
- h. Utilizando técnicas especiales, es posible ajustar el nivel de sensibilidad del proceso de pruebas con penetrantes para que suprima los resultados de discontinuidades muy pequeñas que no son importantes para que los defectos mayores sean relevantes.
- i. Este método es económico y confiable para detectar discontinuidades que están abiertas a la superficie de la pieza a evaluar.

- j. Debido a su habilidad de inspeccionar piezas tanto ferrosas penetrante puede utilizarse en estaciones internas como en el campo. Adicionalmente, este método, generalmente, se utiliza como método de respaldo para verificar defectos encontrados por medio del método de corriente Eddy.

2.7 Limitaciones de las pruebas con líquidos penetrantes

- a. Sólo pueden detectarse defectos superficiales.
- b. Sólo funciona en materiales no porosos.
- c. La limpieza de la pieza es fundamental, previo a realizar las pruebas.
- d. El inspector deberá tener acceso directo a la superficie a revisar.
- e. Se requiere de una limpieza al finalizar las pruebas.
- f. El acabado de la superficie puede afectar la inspección.
- g. Cualquier condición como pintura, tierra, aceite, grasa o resina que interfiera con tapar la rajadura reduce la efectividad de la prueba.
- h. Dada la naturaleza aceitosa de la mayoría de penetrantes, éstos no deberán ser utilizados en ensamblajes en donde no puede ser completamente retirado el penetrante.
- i. Algunos materiales no metálicos pueden ser atacados como el hule y el plástico. También pueden teñir los materiales porosos o pintados.

3. MÉTODO DE INSPECCIÓN POR MEDIO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

3.1 Introducción a las Partículas magnéticas

Las pruebas por Partículas magnéticas es un método que sirve para detectar defectos superficiales y subsuperficiales, únicamente, en materiales ferromagnéticos sin dañarlos. Es un método rápido y relativamente fácil de aplicar. La preparación de la superficie a evaluar no es tan crítica como lo es utilizando otros métodos. Estas características lo hacen uno de los métodos de pruebas no destructivas más utilizados.

Cuando se aplica correctamente este método de pruebas, se establece una fuga de campo magnético sobre la superficie donde se encuentra el defecto. Las pruebas por partículas magnéticas se basan en el principio del magnetismo. Partículas magnéticas muy pequeñas son atraídas a los campos de fugas magnéticas, así como los metales son atraídos hacia los polos de un imán. Pueden ser rajaduras o, bien, algún otro tipo de defecto, los cuales causan una interrupción en el campo magnético de piezas que han sido magnetizadas que, a su vez, atraen partículas magnéticas a este campo de fuga. Todo esto permite a la persona que inspecciona a visualizar el lugar donde se encuentran los defectos en la pieza.²

Un punto clave es la cantidad suficiente de magnetización de la pieza, sin que se exceda, en una dirección en ángulo recto a la dirección del defecto, así como un adecuado contraste entre la superficie de la pieza y las partículas magnéticas utilizadas para identificar el defecto.

Las partículas que se utilizan para realizar las pruebas de partículas magnéticas son de hierro blando. Generalmente, se requiere de partículas teñidas en diferentes colores que pueden ser de un color fluorescente o rojo. Para encontrar defectos superficiales muy compactos pueden utilizarse partículas fluorescentes en forma de suspensión en líquido. Las partículas teñidas pero en forma de partículas secas no son tan eficaces para resaltar defectos superficiales muy pequeños, pero sí son eficaces para encontrar defectos subsuperficiales. Dependiendo del tipo de defecto, así como del ambiente dónde y cómo se encuentre la pieza a inspeccionar, dependerá el color y el tipo de partículas que se utilizarán.

3.2 Antecedentes

A principios de los años 1920, se pudo observar cómo partículas magnéticas (virutas de metal coloreados) podían utilizarse con el magnetismo como un medio para localizar defectos en piezas. Hoy en día, el método por partículas magnéticas es utilizado, ampliamente, para buscar defectos en una amplia variedad de materiales y componentes fabricados.

3.3 Conceptos básicos

3.3.1 Leyes de Maxwell (Ampere)

La circulación del campo magnético a lo largo de cualquier trayectoria cerrada es igual a μ_0 por la intensidad de la corriente que pasa por la superficie bordeada por esa trayectoria.

$$\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 I$$

Donde:

B: campo magnético

μ_0 : permeabilidad del material

I: corriente

El Método de partículas magnéticas está basado en el principio de las Leyes de Maxwell debido a que los materiales ferromagnéticos se someten a campos magnéticos induciendo una corriente por el material. Al inducir una corriente longitudinal, se logra detectar las discontinuidades perpendiculares. Por lo contrario, si sometemos la pieza a una magnetización se provocará una fuga de campo, logrando de esta manera, detectar las discontinuidades existentes.

3.3.2 Magnetismo

Las pruebas por partículas magnéticas se basan en el principio del magnetismo. Las partículas magnéticas muy pequeñas son atraídas a los campos de fugas magnéticos, así como los metales son atraídos hacia los polos de un imán. El método se basa en el hecho que, cuando un material ferromagnético es magnetizado, las discontinuidades que se logran localizar, cuando se encuentran en dirección perpendicular a la dirección del campo magnético causan un campo de fuga que se forma sobre la superficie.³

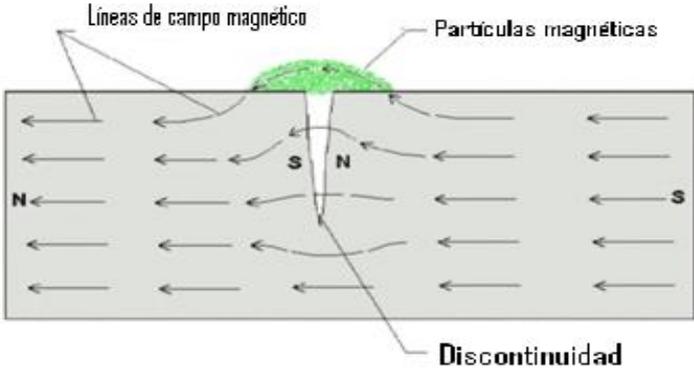
3.3.3 Campos magnéticos

Los campos magnéticos que se forman en una rajadura o discontinuidad sobre una superficie son llamados campos de fuga. La presencia de un campo de fuga indica la presencia de una discontinuidad, la cual se detecta al aplicar finas partículas magnéticas sobre la superficie. Algunas de las partículas se agruparán y permanecerán en el campo de fuga. La fuerza del campo de fuga determinará la cantidad de partículas magnéticas que se agrupen para formar una indicación del tamaño y forma del defecto.

Pueden ser rajaduras o, bien, algún otro tipo de defecto, los que causan una interrupción en el campo magnético de piezas que han sido magnetizadas (ver figura 10), que a su vez atraen partículas magnéticas a este campo de fuga. Todo esto permite a la persona que inspecciona a visualizar el lugar donde se encuentran los defectos en la pieza.

Un punto clave en la prueba por partículas magnéticas es la cantidad suficiente de magnetización de la pieza, sin que se exceda, en una dirección en ángulo recto a la dirección del defecto, así como un adecuado contraste entre la superficie de la pieza y las partículas magnéticas utilizadas para identificar el defecto.

Figura 10. **Campo magnético**



Fuente: Iowa State University. **NDT Education resource center.**

3.3.4 Partículas magnetizables

Las partículas que se utilizan para realizar las pruebas de partículas magnéticas son de hierro blando. Generalmente, se requiere de partículas teñidas en diferentes colores que pueden ser de un color fluorescente o rojo. Para encontrar defectos superficiales muy compactos pueden utilizarse partículas fluorescentes en forma de suspensión en líquido. Las partículas teñidas pero en forma de partículas secas no son tan eficaces para resaltar defectos superficiales muy pequeños, pero sí son eficaces para encontrar defectos subsuperficiales. Dependiendo del tipo de defecto, así como del ambiente dónde y cómo se encuentre la pieza a inspeccionar, dependerá el color y el tipo de partículas que se utilizarán.

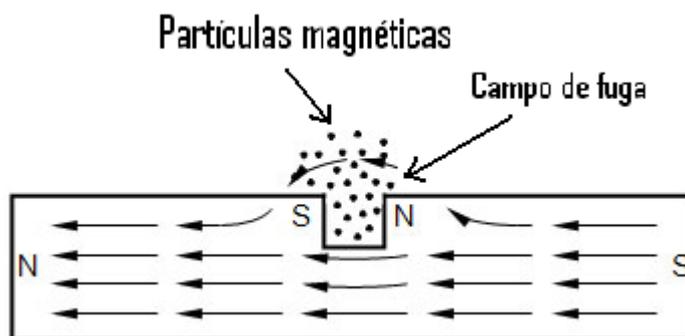
3.3.5 Magnetización

Cuando una pieza hecha de un material ferroso, tal como el hierro, es colocada en un campo magnético fuerte o, bien, que se le aplique corriente eléctrica para que la atraviese, entonces, la pieza será magnetizada. El grado de magnetización se verá afectado por la fuerza del campo magnético o por la cantidad del flujo de corriente aplicado. Se le llama “retentividad” a qué tan magnetizada permanece la pieza luego de quitarle la fuerza magnetizante. Los imanes (llamados imanes permanentes) tienen alta retentividad mientras que los conductores, generalmente, tienen baja retentividad.

Ocurre una magnetización directa cuando a la pieza se le conduce corriente eléctrica y se forma un campo magnético en el objeto. Por otro lado, ocurre una magnetización indirecta cuando a la pieza no se le conduce corriente eléctrica sino que el campo magnético le ha sido aplicado de una fuente externa.

Cuando un defecto superficial o subsuperficial interrumpe el campo magnético en una pieza magnetizada, cierta parte del campo se expulsa hacia el aire que está sobre el defecto, lo cual resulta en un campo de fuga. El tamaño y la fuerza del campo de fuga dependerán del tamaño y de la proximidad del defecto al campo magnético. Aquí es donde se detecta el defecto por el uso de finas partículas que son aplicadas a la superficie de la pieza en estudio, las cuales son atraídas al campo de fuga (ver figura 11). Esta agrupación de partículas nos indica que existe un defecto y dónde se encuentra ubicado.

Figura 11. **Campo de fuga**

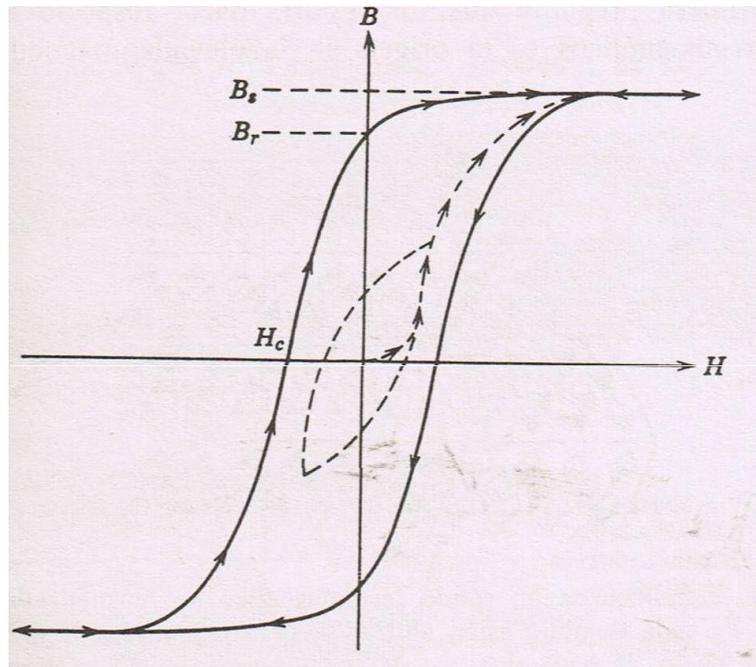


3.3.6 Curva de histéresis

La curva de histéresis muestra la curva de magnetización de un material. Al principio, la magnetización requiere un mayor esfuerzo eléctrico. Este intervalo es la llamada zona reversible. En un determinado punto, la magnetización se produce de forma proporcional. En ese punto se inicia la denominada zona lineal. Finalmente, se llega a un instante a partir del cual, por mucha fuerza magnética que induzcamos al material, ya no se magnetiza más. Éste es el llamado punto de inducción de saturación, que determina el inicio de la llamada zona de saturación.³

La curva de magnetización para un material ferromagnético está ilustrada en la figura 12. A medida que aumenta el campo aplicado H , B empieza a aumentar, lentamente.

Figura 12. Curva de histéresis 3



Fuente: Robert M. Rose. **Propiedades electrónicas. Pág.199**

En la figura 12 se observa el ciclo de histéresis de B en función de H para un material ferromagnético. La línea segmentada indica el comportamiento al aumentar inicialmente el campo aplicado H . Si se aumenta el campo hasta el punto de saturación y se disminuye después a cero y se aumenta en la dirección inversa, resulta la curva sólida. La curva punteada representa una curva de histéresis que no llega a saturación.

Luego, la inclinación aumenta y B también aumenta hasta que se obtiene la inducción de saturación B_s . Con un mayor aumento del campo, la pendiente se nivela. Cuando disminuye el campo no se retrasa la curva original. Para H igual a cero, la muestra aún se encuentra magnetizada y $B = B_r$, la inducción remanente.

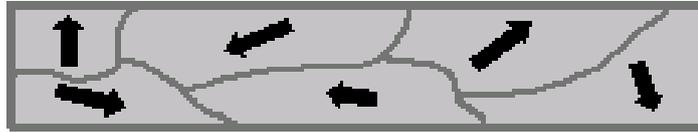
Para $B = 0$, $H = H_c$, la fuerza coercitiva. Si H se hace negativa y la muestra se satura en la dirección inversa antes de regresar al valor cero del campo, se obtiene la curva simétrica ilustrada en la Fig. 12, con una saturación, fuerza coercitiva y remanencia iguales a las del lado positivo. Este comportamiento de histéresis, irreversible y con doble valor, es característico del comportamiento magnético de los materiales ferromagnéticos.

En las pruebas no destructivas por medio de partículas magnéticas se deberá magnetizar la pieza en estudio hasta llegar al punto de saturación.³

3.3.7 Dominios magnéticos

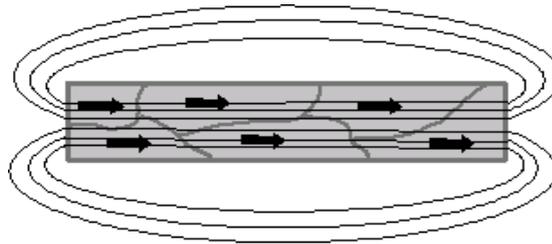
Los dominios son pequeñas regiones dentro de un material ferromagnético que tienen una densidad permanente de flujo magnético no igual a cero. En un material ferromagnético que está completamente desmagnetizado, los dominios están orientados al azar (ver figura 13), lo que da como resultado una densidad de flujo de cero. Cuando la pieza está saturada, esto quiere decir que los dominios están todos alineados en dirección al campo aplicado. Cuando este campo es eliminado, luego de la saturación, algunos dominios regresan a como estaban orientados inicialmente, pero, la mayoría permanecen alineados en la misma dirección del campo que fue aplicado. Esto da como resultado un magnetismo residual que se puede observar en los campos ferromagnéticos.

Figura 13. **Material desmagnetizado**



Por último, se puede afirmar que la magnetización es la alineación de los dominios en una sola dirección (ver figura 14), mientras que la desmagnetización es la disposición al azar de los dominios cuyo magnetismo residual es igual a cero.

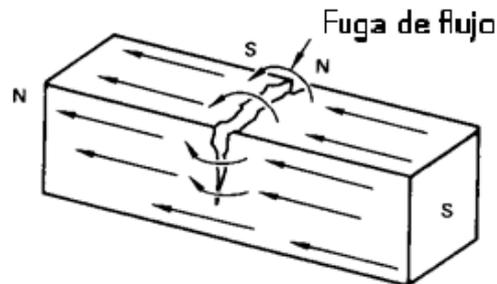
Figura 14. **Material magnetizado**



3.4 Principios físicos

El principio de este método consiste en que cuando se induce un campo magnético en un material ferromagnético, se forman distorsiones en este campo si el material presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnetizable, por lo que éstas se deforman o se producen polos (ver figura 15). Estas distorsiones o polos atraen a las partículas magnetizables que son aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie a examinar y por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de manera directa o empleando luz ultravioleta. Sin embargo, los defectos que son paralelos a las líneas del campo magnético no se aprecian, puesto que apenas distorsionan las líneas del campo magnético.

Figura 15. **Discontinuidad perpendicular a la línea de campo magnetizable**



Fuente: Iowa State University. *NDT Education resource center.*

3.5 Procedimiento general

- a. Limpiar la pieza.
- b. Magnetizar la pieza (utilizando magnetización directa o indirecta).
- c. La presencia de una discontinuidad en la superficie o subsuperficie en la pieza hará que exista una fuga de flujomagnético en ella.
- d. Se aplican partículas de hierro ferroso a la pieza (secas o en suspensión). Si existe una fuga de flujo entonces las partículas magnéticas serán atraídas y agrupadas en ese punto. A eso se le llama una indicación.
- e. La indicación será evaluada para determinar lo que es, lo que lo pudo causar y las acciones a tomar.
- f. Desmagnetizar la pieza.

3.6 Tipos de materiales magnéticos

Cuando se coloca un material dentro de un campo magnético, las fuerzas magnéticas de los electrones del material se ven afectadas. Este efecto es conocido como la Ley de Inducción Magnética de Faraday. Sin embargo, los materiales pueden reaccionar de distintas maneras ante un campo magnético externo.

Los materiales se pueden clasificar, según su permeabilidad magnética relativa en: diamagnéticos, paramagnéticos o ferromagnéticos.

3.6.1 Diamagnéticos

Los metales diamagnéticos tienen una susceptibilidad pobre y negativa hacia los campos magnéticos. Los campos magnéticos repelen a los materiales diamagnéticos y de igual manera, el material no retiene las propiedades magnéticas cuando el campo externo es retirado. La mayoría de elementos de la tabla periódica son diamagnéticos, incluidos el cobre, plomo, plata y oro.

3.6.2 Paramagnéticos

Los metales paramagnéticos tienen una susceptibilidad baja y positiva hacia los campos magnéticos. Estos materiales son atraídos levemente por un campo magnético y el material no retiene las propiedades magnéticas cuando el campo se retira. Los materiales paramagnéticos incluyen al aluminio, paladio, magnesio, molibdeno, litio y tantalio.

3.6.3 Ferromagnéticos

Los metales ferromagnéticos tienen una alta y positiva susceptibilidad hacia los campos magnéticos externos. Presentan una fuerte atracción a campos magnéticos y son capaces de retener sus propiedades magnéticas aun cuando se haya retirado el campo externo. Las fuertes propiedades magnéticas se deben a los dominios magnéticos. Cuando una fuerza magnetizante se aplica al material, los dominios se alinean, lo que produce un campo magnético fuerte dentro de la pieza. Algunos ejemplos de materiales ferromagnéticos son el hierro, el níquel, el acero y el cobalto. Las piezas elaboradas de estos materiales, generalmente, son inspeccionados utilizando el método de partículas magnéticas.

3.7 Permeabilidad magnética absoluta y relativa

Se denomina permeabilidad magnética a la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la intensidad de campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material.⁴

La magnitud así definida, el grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético, se denomina permeabilidad absoluta y se suele representar por el símbolo μ :

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Donde B es la inducción magnética (también llamada densidad de flujo magnético) en el material, y, H es intensidad de campo magnético.

Para comparar entre sí los materiales, se entiende la permeabilidad magnética absoluta (μ) como el producto entre la permeabilidad magnética relativa (μ_r) y la permeabilidad magnética de vacío (μ_0):

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

La permeabilidad relativa de sustancias diamagnéticas es ligeramente menor que 1, mientras que para las sustancias paramagnéticas es mayor que 1. La permeabilidad relativa de sustancias ferromagnéticas es generalmente mayor que 1 y en algunas aleaciones especiales puede ser hasta de 1 millón.

En la tabla II, el valor para los materiales ferromagnéticos es la permeabilidad relativa máxima.

Tabla II. Permeabilidades relativas ⁵

Sustancia	Tipo de Grupo	Permeabilidad Relativa μ_r
Bismuto	Diamagnético	0.99983
Plata	Diamagnético	0.99998
Plomo	Diamagnético	0.999983
Cobre	Diamagnético	0.99991
Agua	Diamagnético	0.99991
Vacío	No Magnético	1
Aire	Paramagnético	1.0000004
Aluminio	Paramagnético	1.00002
Paladio	Paramagnético	1.0008
Polvo permalloy 2-81 (2 Mo, 81 Ni)	Ferromagnético	130
Cobalto	Ferromagnético	250
Níquel	Ferromagnético	600
Ferrocubo 3 polvo de ferrita (Mn-Zn)	Ferromagnético	1,500
Acero suave (0.2 C)	Ferromagnético	2,000
Hierro (0.2 de impureza)	Ferromagnético	5,000
Hierro al silicio (4 Si)	Ferromagnético	7,000
Permalloy 78 (78.5 Ni)	Ferromagnético	100,000
Mumetal (75 Ni, 5 Cu, 2 Cr)	Ferromagnético	100,000
Hierro purificado (0.05 de impureza)	Ferromagnético	2,000,000
Supermalloy (5 Mo, 79 Ni)	Ferromagnético	1,000,000

Fuente: John D.Kraus. **Electromagnetismo. Pág. 234**

3.8 Generación de campos magnéticos

El campo magnético se puede generar mediante un imán permanente, un electroimán, una bobina o la circulación de intensidad eléctrica sobre la pieza. En una pieza alargada, la magnetización mediante bobina genera un campo magnético longitudinal, por lo que muestra defectos transversales. En cambio, una corriente eléctrica entre los extremos de la pieza genera un campo transversal, por lo que detecta defectos longitudinales.

Sin embargo, es importante poder establecer un campo magnético en, por lo menos, dos direcciones perpendiculares entre sí. Por ejemplo, se puede utilizar dos campos magnéticos circulares, un circular y un longitudinal o dos longitudinales.

La fórmula para obtener el campo magnético en un conductor largo es:

$$B = m I / (2 p d)$$

Donde:

B = campo magnético

M = permeabilidad del aire

I = corriente que circula por el cable

$p = \pi = 3.1416$

d = distancia desde el cable

Si hubiera N cables juntos el campo magnético resultante sería:

$$B = N m I / (2 p d)$$

Donde:

N = número de cables

El campo magnético en el centro de una bobina de N espiras circulares es:

$$B = N m I / (2 R)$$

Donde:

R = radio de la espira

Las técnicas de magnetización pueden ser de dos tipos: por inducción directa y por inducción indirecta.

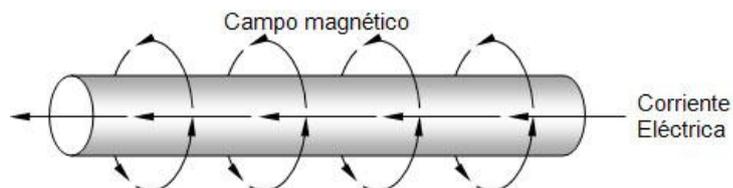
3.8.1 Inducción directa

Se consigue haciendo pasar una corriente eléctrica a través de la pieza creando un flujo magnético circular en ella.

3.8.1.1 Conductores

Cuando un conductor, ya sea un alambre o una barra, lleva corriente siempre se produce un campo magnético circular (ver figura 16). La dirección del campo magnético siempre está a 90 grados de la dirección de la corriente magnetizante. La orientación y la magnitud del campo están basadas en la dirección y en la cantidad de corriente.

Figura 16. **Campo magnético alrededor de un conductor**



3.8.1.2 Método por contacto directo

Otra forma para crear un campo magnético en una pieza es utilizando equipo fijo donde se prensa la pieza entre dos platos para que hagan contacto y para que pase corriente a través de la pieza a inspeccionar.

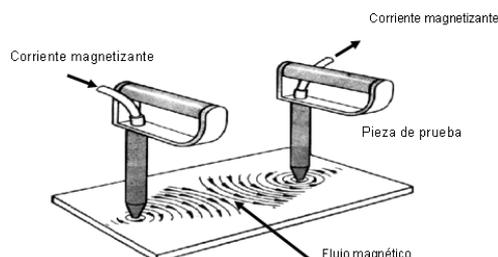
Si existe un defecto en la pieza, se encontrarán campos de fuga en los lugares donde se encuentran los defectos y en esos lugares se producirá la atracción de las partículas magnéticas que se apliquen. Cuando las piezas a inspeccionar son tubos, es muy importante revisar tanto el interior como el exterior de la pieza.

3.8.1.3 Puntas de contacto (electrodos)

Se utilizan electrodos de cobre, bronce o aluminio; se presionan sobre la superficie de la pieza para hacer pasar corriente eléctrica a través de ellos, esto produce un campo magnético circular en la pieza, alrededor y entre cada electrodo suficiente para una inspección local (ver figura 17). Es importante hacer un buen contacto para no provocar un arco eléctrico resultando en daños a la pieza. En este caso se utiliza medio seco.

La magnitud de la corriente utilizada depende del espesor de la pieza inspeccionada y de la separación entre las puntas. Se considera que la magnetización es más efectiva cuando las puntas están separadas de 15 a 20 cm, pero pueden usarse con separaciones de 7.6 a 20 cm.

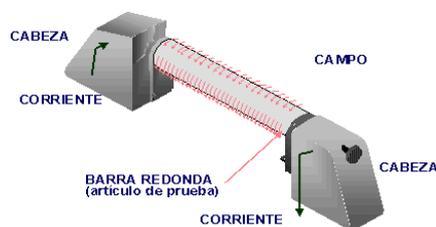
Figura 17. Puntas de contacto



3.8.1.4 Entre cabezales

La pieza es colocada entre dos cabezales (ver figura 18) y se aplica la corriente directamente a través de ella, esto produce un campo magnético circular, aproximadamente, perpendicular a la dirección del flujo de la corriente.

Figura 18. Cabezal



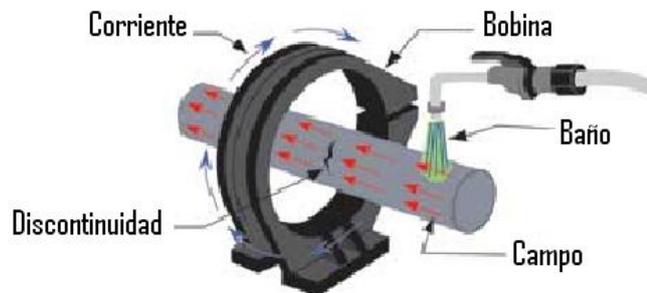
3.8.2 Inducción Indirecta

Una magnetización indirecta ocurre cuando no fluye corriente eléctrica a través de la pieza inspeccionada sino, más bien, un campo magnético es aplicado desde una fuente externa (ver figura 19).

La corriente eléctrica de magnetización se hace pasar por un conductor central, generalmente de cobre, que pasa a través de la pieza que se está probando. Los defectos que se encuentran son perpendiculares a la dirección del campo inducido.

La corriente no fluye a través de la pieza, sino en un conductor secundario; el flujo magnético es inducido en la pieza, la cual puede crear un flujo circular, longitudinal o multidireccional.

Figura 19. **Magnetización indirecta**



Fuente: Iowa State University. *NDT Education resource center.*

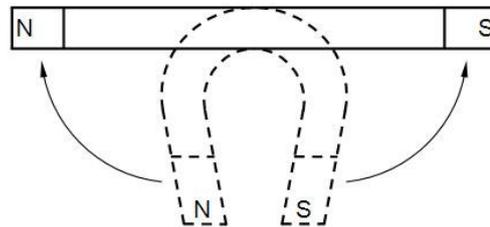
3.8.2.1 Imanes permanentes

El imán permanente se suele utilizar poco debido a que solamente se pueden conseguir con él campos magnéticos débiles.

3.8.2.1.1 Barras de imán

Un imán en barra puede verse como un imán en forma de herradura pero de forma estirada (ver figura 20). Por lo tanto, el imán de barra tendrá los polos en ambos extremos. Las partículas magnéticas serán atraídas sólo en los polos. Este imán está magnetizado, longitudinalmente. Cuando hay un rompimiento o discontinuidad en el imán que atraviesa las líneas de flujo magnético, se crearán un polo norte y un polo sur a ambos lados de la falla. Este campo de fuga resultante atraerá partículas magnéticas. De igual manera, un defecto, a pesar de ser mínimo, creará polos magnéticos. Estos polos son los que producen campos de fuga que atraen a las partículas magnéticas.

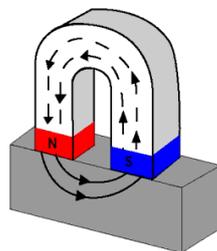
Figura 20. **Barra de imán**



3.8.2.1.2 Imán en forma de herradura

Este tipo de imán es ampliamente conocido (ver figura 21). Así como una barra de imán, éste es un imán permanente y posee magnetismo residual. Atraerá partículas ferrosas hacia sus extremos, que es donde ocurre un campo de fuga. Estos extremos, generalmente, se les llama: polo norte y polo sur. Las líneas de flujo magnético salen, únicamente, en los polos que es donde serán atraídas las partículas magnéticas.

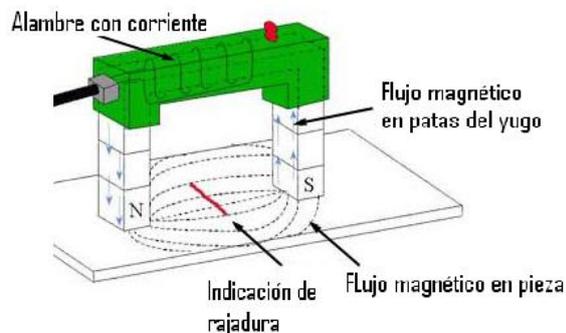
Figura 21. **Imán en forma de herradura**



3.8.2.2 Por Yugo

La magnetización se produce por la inducción de un campo magnético generado por un electroimán en forma de “U” invertida (ver figura 22) que se apoya sobre la pieza a inspeccionar, generando un campo magnético longitudinal entre las patas del yugo.

Figura 22. Yugo electromagnético



3.8.2.3 Bobina o cable enrollado

Las bobinas se utilizan para establecer un campo magnético longitudinal dentro de una pieza. La magnetización se efectúa pasando corriente a través de una bobina fija de vueltas múltiples o cable enrollado alrededor de la pieza o en una sección de ella. Esto produce un flujo magnético longitudinal, paralelo al eje de la bobina.

Cuando se utiliza una bobina, la pieza se coloca en la parte interior de la bobina. En general, las bobinas tienen de tres a cinco vueltas (ver figura 23) y están elaboradas de cable de cobre. Luego, por medio de un interruptor de pie se pasa energía a la bobina. Cabe recordar que la magnetización longitudinal localiza discontinuidades transversales.¹

La cantidad de corriente necesaria para magnetización longitudinal con una bobina es determinada por la fórmula:

$$\text{No. Amper} = \frac{4200D}{LT}$$

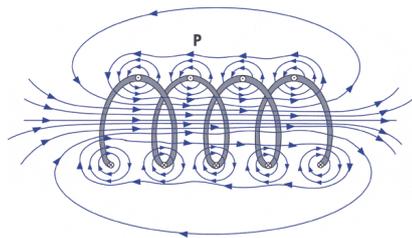
Donde:

L = longitud de la pieza en pulgadas

D = diámetro en pulgadas

T = número de vueltas en la bobina

Figura 23. **Campo magnético producido por una bobina**



3.9 Tipos de corrientes para magnetizar

Generalmente, se utiliza corriente eléctrica para crear campos magnéticos en las piezas a evaluar con el Método de partículas magnéticas.

Se puede utilizar corriente eléctrica para crear campos magnéticos en piezas que sean hechas de un material ferromagnético. Las líneas de fuerza magnética siempre están alineadas a un ángulo recto (90 grados) a la dirección del flujo de la corriente eléctrica. Al controlar la dirección de la corriente magnetizante se logra controlar la dirección del campo magnético. Esto hace posible el crear líneas de fuerza magnética para que intercepten los defectos en ángulos rectos.

Cuando se utiliza una corriente eléctrica para magnetizar, los mejores resultados se obtienen cuando la dirección de la corriente magnetizante es paralela a la falla y en la misma dirección de la misma.

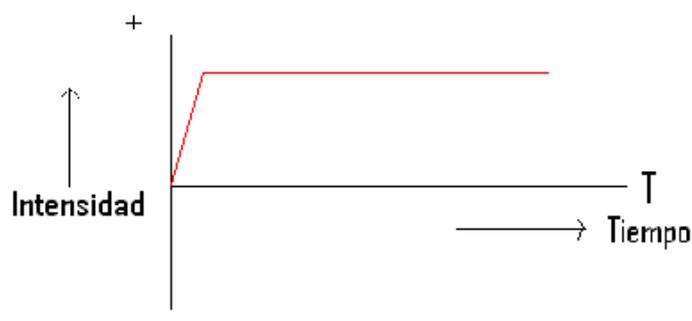
Los dos tipos de corriente utilizados son la corriente directa y la corriente alterna. El flujo de corriente muchas veces es modificado para proveer de un campo apropiado dentro de la pieza.

3.9.1 Corriente directa

La corriente directa es muy útil cuando se está inspeccionando defectos subsuperficiales porque la corriente directa genera un campo magnético que penetra profundamente en el material. En materiales ferromagnéticos, el campo magnético producido por corriente directa, generalmente, penetra en la pieza completa mientras que al utilizar corriente alterna, el campo se concentra en una capa delgada sobre la superficie del componente.

Como se puede observar, en la figura 24, la corriente directa es un flujo continuo de corriente en una sola dirección. La fuente más común de corriente directa es una batería. Una desventaja del uso de corriente directa es porque las altas corrientes sólo pueden ser mantenidas mientras la carga de la batería es adecuada y, muchas veces, es necesario contar con el flujo de corriente durante intervalos de tiempo prolongados.

Figura 24. Corriente directa rectificada de media

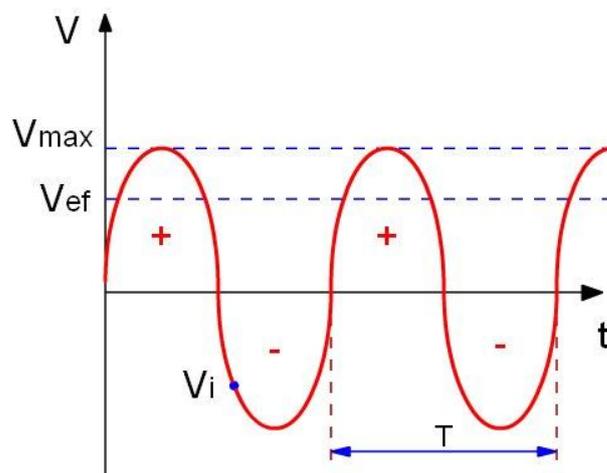


3.9.2 Corriente alterna

Es conveniente utilizar corriente alterna para hacer pruebas con partículas magnéticas ya que está disponible en casi todas las instalaciones. Sin embargo, cuando se usa corriente alterna para inducir un campo magnético en materiales ferromagnéticos, el campo magnético se verá limitado a una región estrecha sobre la superficie del componente. A este fenómeno se le llama “efecto *skin*” o “efecto piel” y ocurre porque a los dominios por debajo de la superficie no se alinean a tiempo. Por lo tanto, se recomienda utilizar este tipo de corriente sólo cuando la inspección está limitada a defectos superficiales.

La fase de CA simple (comúnmente utilizada) requiere de dos conductores y dirección inversa a razón de 50 o 60 ciclos por segundo, como se muestra en la curva sinusoidal de corriente alterna de la figura 25.

Figura 25. **Curva sinusoidal de corriente alterna**



Los valores que caracterizan a la corriente alterna son:

- Valor máximo (V_{max}): es el valor de cresta que alcanza la corriente alterna, puede ser positivo o negativo, también se le conoce como valor de pico (V_p),
- Valor instantáneo (V_i): es el valor que toma la corriente en un momento determinado. Se calcula a partir de la fórmula:

$$V_i = V_{max} * \text{sen}(wt)$$

Donde:

wt = ángulo en el que deseamos obtener el valor instantáneo,

- Valor eficaz (V_{ef}): es el valor de corriente continua por el que debemos sustituir la corriente alterna para que produzca el mismo efecto. Se calcula con la fórmula:

$$V_{ef} = V_{max} / \sqrt{2}$$

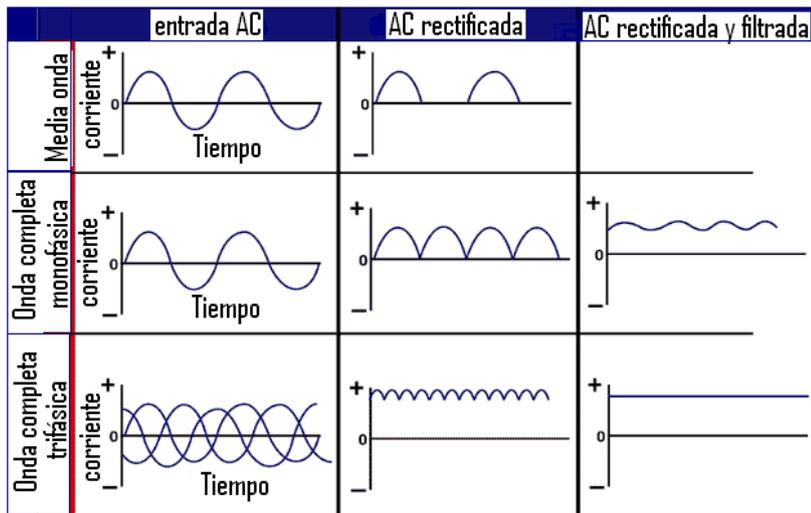
- Periodo (T): es el tiempo que tarda en producirse un ciclo completo de la corriente. Corresponde con 360° .
- Frecuencia (F): es el número de ciclos completos que se producen en 1 segundo. Se calcula con la fórmula:

$$F = 1/T$$

3.9.3 Corriente alterna rectificada

La corriente alterna es limitada a detectar defectos superficiales. Sin embargo, afortunadamente, la corriente AC puede convertirse en una corriente similar a la corriente directa por medio del proceso de rectificación. Con el uso de rectificadores, la corriente alterna reversa puede convertirse en una corriente unidireccional. Los tres tipos de corriente rectificada más, comúnmente usados, son los mostrados en la figura 26.

Figura 26. Tipos de corriente rectificada



3.9.3.1 Corriente alterna rectificada de media onda

Cuando pasa corriente alterna monofásica por un rectificador, la corriente fluye en una sola dirección. La parte reversa de cada ciclo es bloqueada para que se produzca una corriente pulsante unidireccional. La corriente sube de cero a un máximo y, luego, regresa a cero. Ninguna corriente fluye en el lapso de tiempo cuando el ciclo reverso es bloqueado. Este tipo de corriente se repite en la misma proporción que una corriente no rectificada. Dado que la mitad de la corriente es bloqueada, el amperaje es la mitad de la corriente alterna que no ha sido alterado.

A este tipo de corriente también se le conoce como DC de media onda o DC pulsante. La AC rectificada de media onda es la más utilizada en los yugos electromagnéticos.

3.9.3.2 Corriente alterna rectificada monofásica de onda completa

Una rectificación de onda completa invierte la corriente negativa a corriente positiva en vez de bloquearla. Esto produce una corriente directa pulsante sin intervalos entre los pulsos. Generalmente, se hace una filtración para suavizar los cambios bruscos de polaridad en la corriente rectificante. Mientras que la movilidad de las partículas magnéticas no es tan buena como lo es en la corriente alterna de media onda, debido a la reducción en pulsación, se mejora la profundidad del campo magnético subsuperficial.

3.9.3.3 Corriente alterna rectificada trifásica de onda completa

La corriente trifásica se usa, generalmente, en equipo industrial porque tiene una fuerza de transmisión más favorable y por sus características de carga de las líneas. Este tipo de corriente también es útil para las pruebas con partículas magnéticas porque cuando está rectificada y filtrada, da como resultado una corriente que se asemeja mucho a una corriente directa.

3.10 Equipo para realizar las pruebas

La persona que realice la inspección de la pieza en estudio deberá tomar en consideración el tipo de corriente que aplicará, la ubicación y el tipo de revisión. Puede utilizarse equipo que magnetice circular o longitudinalmente. Asimismo, puede ser equipo de uso fijo (estacionario) o portátil (móvil).

3.10.1 Fijo (estacionario)

Este tipo de equipo es útil para revisión de piezas pequeñas, en donde pueda manejarse la pieza fácilmente. Hay equipos mayores para piezas grandes en donde su manejo deberá realizarse con una pluma. Estas unidades generan corriente alterna o directa.

También existen equipos fijos para realizar las pruebas pero con partículas en líquido. La mayoría de estos equipos contienen una bobina que se utiliza para lograr una magnetización longitudinal.

El equipo fijo más común es la banca horizontal húmeda como la mostrada en la figura 27. La mayoría de unidades tienen una bobina móvil para realizar una magnetización indirecta. Algunos equipos tienen la capacidad de desmagnetizar la pieza también.

Figura 27. **Banca horizontal húmeda**



Fuente: LLOG, S.A. de C.V. **Tutorial de partículas magnéticas.**

3.10.2 Móvil (portátil)

Lo que distingue a estos equipos son las ruedas sobre las cuales está montado el equipo como se ilustra en la figura 28. Están diseñados de esta forma para poder trasladarlos hacia el lugar donde se encuentre la pieza a inspeccionar (ya que las piezas pueden ser de gran tamaño). Pueden tener salidas de corriente de hasta 6,000 amperios. Pueden proporcionar salida de corriente alterna y directa rectificada de media onda.⁷

Figura 28. **Equipo móvil**



Fuente: LLOG, S.A. de C.V. **Tutorial de partículas magnéticas.**

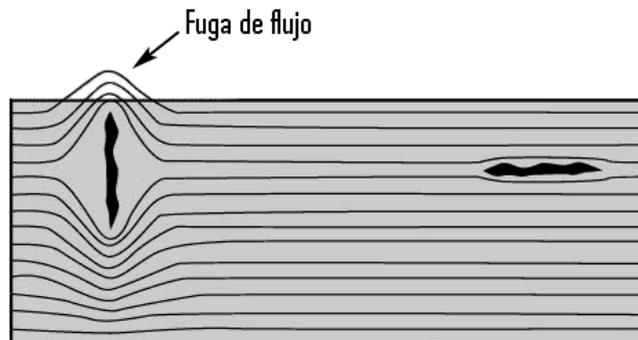
3.11 Medición de campos magnéticos

3.11.1 Importancia de los campos magnéticos

Cuando se realiza una prueba con partículas magnéticas, es muy importante determinar la dirección e intensidad del campo magnético (ver figura 29). La dirección del campo magnético deberá estar entre 45 y 90 grados de la medida más larga del defecto. La intensidad del campo deberá ser lo suficientemente alta para que se agrupen las partículas magnéticas, pero tampoco deberá ser demasiado alta que pueda solapar defectos existentes.

Para que se note la presencia de un defecto, la fuerza de campo en la pieza deberá producir un campo de fuga de flujo que es lo, suficientemente, fuerte para atraer las partículas magnéticas sobre la ubicación del defecto. Dado que no es práctico medir la fuerza de campo del material en sí, todos los dispositivos de medición miden el campo magnético que se encuentra afuera del material.

Figura 29. **Orientación del campo magnético y la detección de defectos²**



Fuente: Iowa State University. **NDT *Education resource center***.

3.11.2 Equipo para medir campos magnéticos

Dado que no es práctico medir la fuerza de campo dentro de un material, todos los equipos miden el campo magnético que está afuera del material. Hay distintos dispositivos que pueden usarse para detectar y medir campos magnéticos. Los dos equipos más utilizados en la inspección por partículas magnéticas son el indicador de campo y el medidor por efecto Hall.

3.11.2.1 Medición por indicadores de campo

Existen unos aparatos pequeños que miden el campo magnético (ver figura 30), por ejemplo miden desde 20 Gauss hasta menos 20 Gauss. Ya que el rango es un rango limitado, se utiliza este aparato para medir el campo magnético residual luego de haber desmagnetizado la pieza.

Figura 30. **Medidor de campo**



Fuente: Iowa State University. **NDT *Education resource center.***

3.11.2.2 **Por medio del dispositivo de medición por efecto-Hall**

Este dispositivo electrónico (ver figura 31) provee una lectura digital de la fuerza del campo magnético en unidades Gauss. Cuando se utiliza un medidor de campo por efecto Hall, la fuerza del campo tangencial, medida sobre la superficie de la pieza, y, cuyos valores pico obtenidos están dentro de un rango de 30 a 60 Gauss, se considera que los mismos son, normalmente, adecuados para la inspección por partículas magnetizables. Es importante asegurarse que las fuerzas del campo estén presentes dentro de ese rango en todas las áreas de la pieza a inspeccionar.

Figura 31. **Medidor efecto-Hall (Gauss/Tesla)²**



El voltaje generado V_h se puede relacionar al campo magnético externo por medio de la siguiente ecuación:

$$V_h = I B R_h / b$$

Donde:

V_h = voltaje generado

I = corriente directa aplicada

B = componente del campo magnético que está en ángulo recto a la corriente directa en el elemento Hall

R_h = coeficiente Hall del elemento Hall

b = grosor del elemento Hall

3.11.3 Orientación del campo magnético

El campo magnético deberá estar en una dirección favorable, con respecto al defecto de la pieza, para realizar la prueba. Cuando las líneas de flujo están paralelas a la línea del defecto, la agrupación de las partículas magnéticas será débil. Por lo contrario, cuando las líneas de flujo están perpendiculares al defecto entonces se obtendrán resultados satisfactorios en donde se encuentre la falla. Por lo tanto, para lograr una inspección apropiada en una pieza, deberá crearse un campo magnético por lo menos en dos direcciones.

3.12 Modo de magnetización

3.12.1 Magnetización continua

Las partículas magnéticas se aplican mientras fluye la corriente de magnetización. A menos que se indique lo contrario, siempre se deberá utilizar el modo de magnetización continua.

3.12.2 Magnetización residual

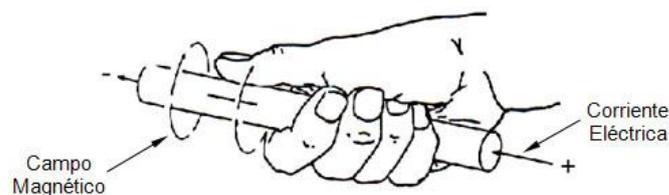
Las partículas son aplicadas después de que la pieza haya sido magnetizada.

3.13 Ecuaciones para partículas magnéticas

3.13.1 Fórmulas de la regla de la mano derecha

Las fórmulas de la regla de la mano derecha (ver figura 32) han sido desarrolladas para determinar el valor de amperaje requerido para inducir un adecuado campo magnético longitudinal en una pieza. Estas fórmulas aplican mejor, específicamente, para piezas cilíndricas. Cuando no se siguen las reglas de la mano derecha, puede dar como resultado una sobremagnetización y, por lo tanto, una pérdida de sensibilidad en la inspección.

Figura 32. Regla de la mano derecha



3.13.2 Área de la sección transversal

Es crítico el poder determinar la relación entre el área de la sección transversal de la pieza y el área de la sección transversal de la bobina. Esta relación/razón determinará si la pieza podrá ser evaluada dentro de una bobina de un determinado diámetro al colocar la pieza en la parte baja, o, a la par de la pared de la bobina, o, al colocarla en medio de la bobina, así como establecer cuál fórmula será utilizada para estimar el amperaje requerido.

Para determinar el área de la sección transversal de la pieza y de la bobina se debe considerar:

$$A = \pi r^2$$

Donde:

A = área de la sección transversal

$\pi = 3.1416$

r = radio (1/2 del diámetro)

El diámetro de la pieza deberá tomarse como la máxima distancia entre cualquiera de dos puntos de la parte externa de la circunferencia de la pieza.

Una bobina de 12 pulgadas de diámetro será utilizado para inspeccionar una pieza que tiene dos pulgadas de diámetro.

Área de la bobina (12 pulg. diámetro)

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi (6)^2$$

$$A = 113 \text{ pulgadas cuadradas}$$

Área de la pieza (2 pulg. diámetro)

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi (1)^2$$

$$A = 3.14 \text{ pulgadas cuadradas}$$

Consideraciones

- a. Cuando el área de la sección transversal de la pieza es menor a la décima parte del área de la sección transversal de la bobina, entonces, la pieza deberá ser magnetizada recostándola en la parte baja de la bobina.
- b. Cuando el área de la sección transversal de la pieza es mayor a la décima parte del área de la sección transversal de la bobina, entonces, la pieza deberá ser magnetizada en el centro de la bobina.
- c. Cuando se utiliza un cable enrollado o cuando el área de la sección transversal de la pieza excede en $\frac{1}{2}$ del área de la sección transversal de la bobina, la pieza deberá colocarse en núcleo de la bobina y deberá utilizarse la fórmula para bobinas con factor alto de ocupación para poder calcular el amperaje requerido.
- d. En la Tabla III se encuentra una lista del diámetro de la pieza más larga que puede ser magnetizada recostándola en la parte baja del núcleo de la bobina o colocándola junto a la pared de la bobina, tomando como referencia algunas medidas de bobinas. Para cualquier diámetro de bobina, o, piezas con diámetros mayores que aquellos listados, deberán magnetizar las piezas por medio de algún otro método, tal como centrarlos en el núcleo de la bobina, utilizando cable enrollado o utilizando una bobina de mayor tamaño.

Tabla III. **Tamaño de la bobina versus diámetro máximo para partes magnetizadas en la parte baja del núcleo de una bobina**

Diámetro de la bobina (pulgadas)	Diámetro máximo de la pieza
8	2.5
12	3.8
15	4.8
18	5.7
20	6.3
24	7.6

Fuente: US Air Force. *Nondestructive inspection methods, basic theory*. Pág. 285

3.13.3 Calculando la corriente en una bobina

Es necesario poder calcular el nivel de corriente a utilizar en una bobina para magnetizar, longitudinalmente, una pieza. Una fórmula se usa cuando la pieza es colocada en el centro del núcleo de la bobina y otra fórmula es para cuando la pieza se recuesta sobre la parte baja del núcleo de la bobina. Estas fórmulas aplican para piezas cilíndricas e irregulares. Usualmente, se tiende a calcular la corriente a aplicar en un 50% de más. Se utilizará una proporción de longitud sobre diámetro (L/D). El campo magnético producido en la bobina, generalmente, se extiende de 6 a 9 pulgadas por sobre cada extremo. Si la pieza a magnetizar se sale de este rango, entonces, es necesario reposicionar la pieza para magnetizarla por partes, siempre y cuando se deje un traslape de, aproximadamente, 3 pulgadas entre las partes a magnetizar. Las fórmulas sirven para piezas con una proporción L/D entre 3 y 15. Si la pieza tiene una razón de L/D mayor a 15, utilícese 15 como valor de la proporción.¹

3.13.3.1 Fórmula para el cálculo de corriente en piezas recostadas en la parte baja de la bobina

Esta fórmula puede utilizarse cuando el área de la sección transversal de la pieza es menor a 1/10 del área del núcleo de la bobina y deberá usarse siempre que la pieza esté recostada en la parte baja del núcleo de la bobina, o, que esté colocada junto a la pared de la bobina durante la magnetización.

$$I = \frac{KD}{NL}$$

Donde:

I = corriente a través de la bobina (amperios)

K = 45,000 (una constante, vueltas-amperio)

L = longitud de la pieza (en pulgadas)

D = diámetro de la pieza (en pulgadas)

N = número de vueltas en la bobina

La Tabla IV provee datos sobre corrientes requeridas que dependen del tamaño de la pieza a evaluar.

Tabla IV. **Corriente típica sobre una bobina de cinco vueltas para piezas colocadas en la parte baja del núcleo de la bobina**

Longitud de pieza (L) en pulgadas	Diámetro de la pieza en pulgadas	Razón L/D	Amperios por vuelta requeridos	Amperios requeridos
12	3	4	11,250	2,250
12	2	6	7,500	1,500
16	2	7	5,625	1,125
10	1	10	4,500	900
18	1 ½	12	3,750	750
14	1	14	3,214	643

Fuente: US Air Force. *Nondestructive inspection methods, basic theory*. Pág. 286

3.13.3.2 Fórmula para el cálculo de corriente en piezas posicionadas en el núcleo de la bobina

Esta fórmula deberá utilizarse cuando el área atravesada de la pieza es mayor que 1/10 y menor que ½ del área atravesada dentro de la bobina.

$$I = \frac{KR}{N(6(L/D)-5)}$$

Donde:

I = corriente a través de la bobina (amperios)

K = 43,000 (una constante, vueltas-amperio)

R = radio de la bobina (en pulgadas)

N = número de vueltas en la bobina

L = longitud de la pieza (en pulgadas)

D = diámetro de la pieza (en pulgadas)

El término $6(L/D) - 5$ se refiere a la permeabilidad efectiva.¹

3.14 Requerimientos de luz para la inspección con partículas magnéticas

La inspección de las partículas magnéticas depende de la inspección visual para detectar cualquier indicación que se forme. Por lo tanto, debe haber buena iluminación. Luego que las partículas se hayan asentado, deberá examinarse su brillantez y su aglomeración. Las partículas fluorescentes deberán evaluarse bajo luz ultravioleta mientras que las partículas visibles o coloreadas, bajo luz blanca.

La inspección con luz visible se puede realizar con luz natural o artificial. La intensidad de luz sobre la superficie de la pieza no debe ser menor a 1000 lux.

Ahora, en la inspección con luz fluorescente, la luz visible del ambiente donde se realiza la observación, no debe exceder los 20 lux. La intensidad de luz negra mínima sobre la superficie del componente deber ser de 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

3.15 Características de las partículas magnéticas

El tipo de partículas magnéticas usado para PND es esencial para indicarle al inspector sobre la ubicación de defectos. Las partículas son diminutas, partículas de hierro, a las que se les agrega un pigmento para darles color. Se aplican sobre una superficie y se aplican como partículas secas o, bien, como partículas suspendidas en un fluido, ya sea agua, aceite u otro fluido dentro de los permisibles.

3.15.1 Partículas magnéticas secas

Se pueden comprar en rojo, negro, gris, amarillo y otros colores (ver figura 33). Lo importante es que hagan contraste con la pieza a inspeccionar. También el tamaño de la partícula es importante así como su forma. Las partículas no deberán ser todas del mismo tamaño ni de la misma forma para mejor efectividad en su aplicación.

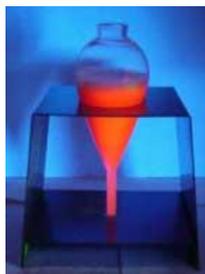
Figura 33. **Partículas magnéticas secas**



3.15.2 Partículas magnéticas en un fluido

Se pueden comprar partículas magnéticas que vienen en un fluido como aceite mineral (destilado de petróleo) o agua (ver figura 34). Al utilizar partículas en fluido, las pruebas serán más sensibles que utilizando partículas secas. También se hace más fácil aplicar las partículas de manera uniforme en áreas extensas. Por otro lado, tienen la ventaja que se pueden encontrar partículas que son visibles (coloreadas) y fluorescentes a la vez.

Figura 34. **Partículas magnéticas en fluido visible (coloreadas)**



Un punto importante es que las partículas en agua forman indicaciones rápidamente, son más baratas, no presentan peligrosidad inflamable, no despiden gases tóxicos y son fácilmente limpiadas de la pieza. Generalmente, se elabora con un inhibidor de óxido. Ahora, si es necesario proteger la pieza del óxido, entonces será mejor utilizar aceite como base.

Por último, las indicaciones que se producen utilizando las partículas en fluidos son más definidas que las que se producen con partículas secas. Cuando se usan partículas fluorescentes (ver figura 35), la visibilidad de las indicaciones aumenta, considerablemente.

Figura 35. **Partículas magnéticas en fluido fluorescente**



3.16 Modo de aplicación de las partículas magnéticas

3.16.1 Vía seca

Las partículas son aplicadas, directamente, sobre la superficie magnetizada de la pieza con la ayuda de aplicadores manuales de polvo, por ejemplo, pinceles o bombas. Esta técnica permite la recuperación de las partículas libres de contaminación una vez la pieza haya sido inspeccionada. Comparado con el método por vía húmeda, es un método mucho más cómodo y limpio, es más fácil de utilizar en piezas grandes y con equipos portátiles en obra y permite localizar con facilidad discontinuidades subsuperficiales.

3.16.2 Vía húmeda

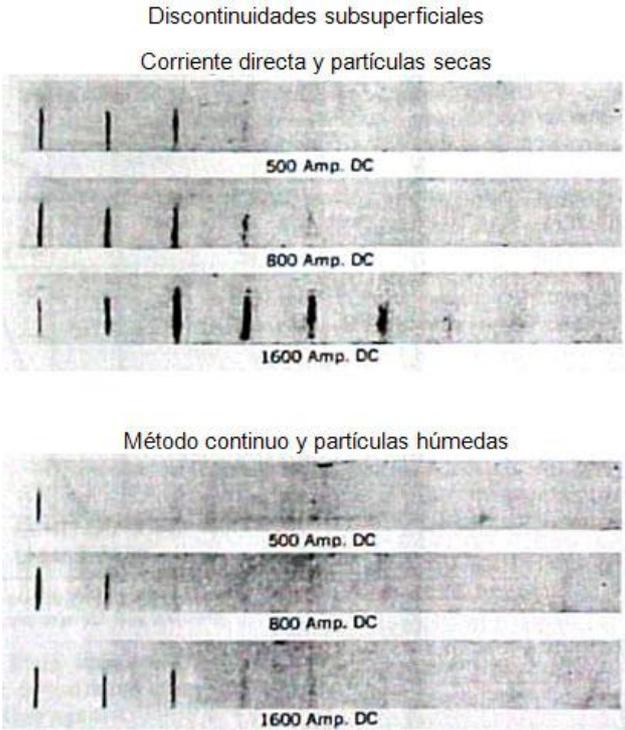
Las partículas se encuentran en suspensión en un medio líquido que puede ser agua o derivados del petróleo como aceite mineral. Las partículas tienen una granulometría mucho más fina que permite detectar discontinuidades mucho más pequeñas. En este método las partículas tienen una mayor movilidad que por la vía seca, cubriendo con facilidad piezas grandes o irregulares. Es el método más rápido para el control de grandes series de piezas pequeñas.

3.16.3 Comparación de los Métodos de partículas magnéticas, secas y húmedas

Se puede decir que el Método por partículas secas es superior para detectar discontinuidades localizadas por debajo de la superficie (subsuperficiales), lo que se debe a la alta permeabilidad y a la forma, favorablemente, alargada de las partículas. También, se puede decir que las partículas secas en combinación con CA son excelentes para detectar grietas superficiales, siempre y cuando no sean, excesivamente, finas.

En la figura 36 se puede observar la comparación de la efectividad del Método seco y el Método húmedo para detectar discontinuidades localizadas por debajo de la superficie. En la figura se ve, claramente, que el Método seco es superior al Método húmedo para este propósito, a cualquier valor utilizado de corriente. Sin embargo, no debemos olvidar que cuando el problema es detectar discontinuidades superficiales muy finas, no hay cuestionamiento alguno acerca de la superioridad del Método húmedo, utilizando cualquier tipo de corriente de magnetización. 7

Figura 36. **Indicaciones comparativas entre partículas secas y húmedas**



Fuente: LLOG, S.A. de C.V. **Tutorial de partículas magnéticas.**

3.17 Pruebas de detección de defectos utilizando partículas magnéticas en un medio líquido (inspección húmeda)

Las pruebas de partículas magnéticas involucra el aplicar las partículas, mientras éstas se encuentran suspendidas en un medio líquido. Generalmente, se lleva a cabo utilizando una máquina horizontal estacionaria para la inspección, aunque las suspensiones (el medio) también están disponibles en latas de *spray* para ser utilizadas con un yugo electromagnético.

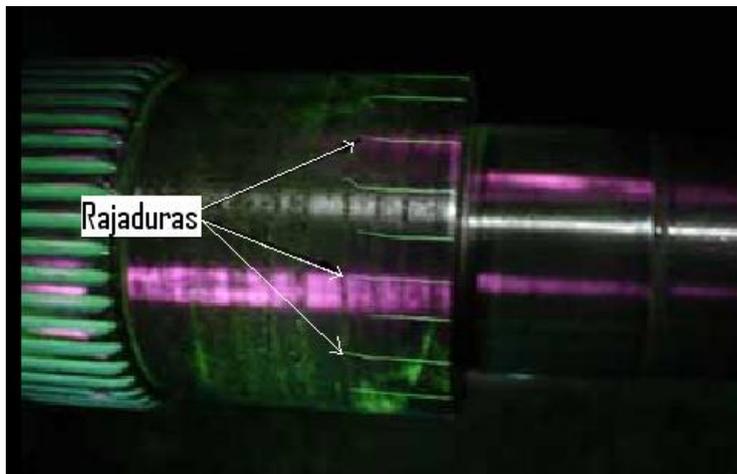
Una inspección húmeda tiene varias ventajas sobre una inspección seca. Primero, que todas las superficies de la pieza pueden ser cubiertas, rápidamente, con una capa uniforme de partículas. Segundo, que el líquido provee de movilidad a las partículas por un buen período de tiempo, el cual permite que las partículas floten hacia los campo de fuga presentes para, luego, formar una indicación. Por lo tanto, una inspección húmeda es considerada como una mejor opción para detectar discontinuidades muy pequeñas en superficies lisas. Sin embargo, en superficies ásperas, las partículas se agruparán en las hendiduras y perderán movilidad, haciéndolas menos efectivas que las secas.

Los pasos a seguir para una inspección utilizando una máquina horizontal con la técnica de suspensión son los siguientes:

- a. limpiar la pieza de cualquier aceite o contaminante,
- b. realizar los cálculos necesarios para conocer la cantidad de corriente requerida para magnetizar la pieza,
- c. aplicar una capa de partículas magnéticas en suspensión a la pieza,

- d. en general, sólo se termina de aplicar la suspensión, inmediatamente, se magnetiza la pieza,
- e. aplicar luz ultravioleta y observar para buscar indicaciones sobre la pieza (ver figura 37),
- f. buscar las áreas donde están agrupadas las partículas magnéticas. Si las discontinuidades son superficiales se observará una indicación bien marcada. Las discontinuidades subsuperficiales estarán menos definidas y perderán su definición mientras aumente la profundidad de las mismas. Las discontinuidades aparecerán si están a 45 hasta 90 grados de la dirección del campo magnético. Según los requerimientos, puede ser necesario cambiar la dirección del campo magnético para reevaluar la pieza,
- g. la pieza se acepta o se rechaza basada en un criterio predeterminado de aceptación o rechazo.

Figura 37. Indicación de una rajadura por medio de partículas magnéticas húmedas fluorescentes



Fuente: Iowa State University. **NDT Education resource center.**

3.18 Pruebas de detección de defectos utilizando partículas magnéticas en un medio seco (inspección seca)

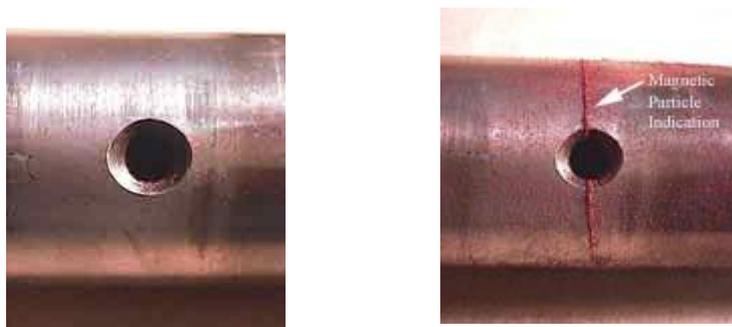
Al utilizar esta prueba de partículas magnéticas, se aplican partículas magnéticas secas sobre la superficie de la pieza mientras ésta se está magnetizando. Las pruebas con partículas secas son ideales para inspecciones en superficies ásperas. Cuando se utiliza un yugo electromagnético, la corriente aplicada crea un campo magnético en forma de pulsaciones lo cual provee movilidad al polvo. La principal aplicación de los polvos es en soldaduras bajo tierra y superficies ásperas fundidas. También se utiliza ampliamente en detectar rajaduras subsuperficiales poco profundas.

Los pasos a seguir para una inspección utilizando partículas magnéticas secas son:

- a. limpiar la pieza de cualquier aceite o contaminante que impida que las partículas se muevan fácilmente. Eliminar cualquier polvo, tierra u óxido,
- b. aplicar una fuerza magnetizante – usando imanes permanentes, yugo electromagnético, bobinas, etc. para generar el flujo magnético necesario,
- c. aplicar una capa delgada de partículas magnéticas secas sobre la superficie,

- d. soplar, suavemente, para retirar el exceso de partículas. Aún con la fuerza magnetizante aplicada, retire el polvo en exceso de la superficie con un poco de aire seco. La fuerza del aire debe ser lo suficientemente fuerte para retirar el exceso de partículas pero no tan fuerte como para retirar las partículas de donde se encuentran agrupadas debido a una discontinuidad,
- e. parar la fuerza magnetizante, sólo en caso de uso de imanes permanentes, estos pueden permanecer donde estaban,
- f. inspeccionar para encontrar indicaciones. Buscar la ubicación donde las partículas magnéticas estén agrupadas. En la figura 38 podemos observar la pieza antes de aplicar las partículas magnéticas (izquierda) y después de haberlas aplicado (derecha). El lugar donde se agruparon las partículas es una indicación,
- g. la pieza se acepta o se rechaza basada en un criterio predeterminado de aceptación o rechazo,
- h. desmagnetizar la pieza.

Figura 38. Indicación por medio de partículas magnéticas



Fuente: Iowa State University. **NDT Education resource center.**

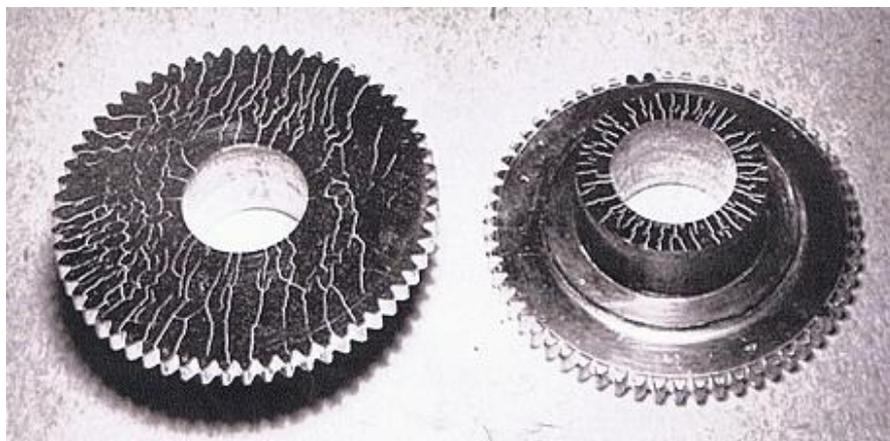
3.19 Inspección

Una inspección de partículas magnéticas se basa, prácticamente, en una inspección visual para detectar cualquier indicación que pueda haberse formado. Por lo tanto, la iluminación es un elemento importante en el proceso de inspección. Obviamente, los requerimientos de iluminación son diferentes para una inspección cuando se han utilizado partículas visibles que cuando se han utilizado partículas fluorescentes.

Para una inspección de partículas magnéticas que utilizaron partículas visibles o coloreadas, se puede usar luz natural o luz artificial. Por otro lado, al haber utilizado partículas magnéticas fluorescentes, será necesario monitorear el uso de luz ultravioleta y luz blanca, aunque esta última, deberá mantenerse al mínimo.

Algunos ejemplos de indicaciones en piezas ferromagnéticas podrán observarse en las figuras 39, 40 y 41.

Figura 39. **Indicaciones en una pieza utilizando partículas magnéticas fluorescentes**



Fuente: US Air Force. *Nondestructive inspection methods, basic theory*. Pág. 3-94

Figura 40. Típica indicación de una rajadura por medio de partículas magnéticas



Fuente: US Air Force. *Nondestructive inspection methods, basic theory*. Pág. 3-77

Figura 41. Indicaciones de un caso severo de rajaduras



Fuente: US Air Force. *Nondestructive inspection methods, basic theory*. Pág. 3-90

3.20 Desmagnetización

Todas las piezas en estudio deben ser desmagnetizadas luego de haber concluido con las pruebas. La desmagnetización puede ser sencilla o difícil, dependiendo del tipo de material de la pieza, de su forma y de los campos magnéticos utilizados. El realizar una desmagnetización total es casi imposible. Si quedan residuos de campos magnéticos, puede interferir con equipo electrónico como las brújulas, puede afectar equipos donde se le adhieran piezas magnetizadas que interrumpen su funcionamiento, también pueden crear un arco si se está utilizando soldaduras, entre otros.

Casi todos los métodos de desmagnetización dejan un campo residual en la pieza. Por lo tanto, la desmagnetización involucra al mayor esfuerzo que se pueda hacer para que el nivel residual no tenga influencia sobre la pieza probada. Se puede decir que la única manera de desmagnetizar una pieza de acero es llevarla a la temperatura de Curie, para muchos metales es de, entre 649 a 871° C (1200 a 1600° F), y enfriarla posicionándola con su longitud dirigida hacia el Este y Oeste para prevenir una magnetización natural por los polos Norte y Sur de la Tierra. Este método de desmagnetización nunca se utiliza porque elevar la temperatura de la pieza a tal extremo, probablemente, distorsione la pieza.

Muchas piezas, especialmente, si son largas, tienden a permanecer magnetizadas a un nivel que lo determina el campo magnético natural de la Tierra, aún cuando trate de aplicársele un método de desmagnetización. Hay piezas que se magnetizan sólo por estar cerca de líneas eléctricas que lleven corrientes altas, o, por estar cerca de algún equipo magnético.

Sin embargo, el mejor método para desmagnetizar es a través de mantener la pieza en una bobina a la que se le pasa corriente alterna. Cuando la corriente pasa por la bobina, entonces, se retira la pieza de la bobina en dirección Este-Oeste.

Otros métodos para desmagnetizar son: por medio de la manipulación brusca o por calentamiento. Si la pieza es martillada (con martillo de goma) y colocada en posición Este-Oeste, entonces, pierde su magnetismo, completamente, ya que sus moléculas vibran, desalineando su dominio magnético. Por lo tanto, la pieza pierde su magnetismo.

Otras consideraciones a tomar en cuenta para lograr una desmagnetización adecuada son las siguientes:

- a. se requieren de 10 a 30 pasos alternos de reducción e inversión de la corriente eléctrica,
- b. usar el mismo tipo de corriente empleada durante la inspección,
- c. el flujo magnético producido debe ser, cercanamente, igual en la misma dirección que el empleado durante la inspección,
- d. preferentemente, orientar la pieza de Este a Oeste.

3.21 Ventajas de las pruebas con Partículas magnéticas

- a. Se aplica de manera rápida ya que no requiere mucha preparación de la pieza.
- b. Se logran detectar defectos subsuperficiales.
- c. Se utiliza para localizar grietas de templado, grietas por fatiga o grietas inducidas por esmerilado o rectificado, ya que todas ellas ocurren en la superficie.
- d. Pueden realizarse pruebas con y sin electricidad.
- e. Bajo costo
- f. Portátil

3.22 Limitaciones de las pruebas con Partículas magnéticas

- a. No se logra detectar defectos internos en las piezas.
- b. Solamente se pueden probar materiales ferromagnéticos.
- c. La alineación del campo magnético es crítica.
- d. Las capas de pintura o de algún material no magnético afectarán la sensibilidad o pueden esconder defectos.
- e. Es necesario desmagnetizar la pieza al finalizar la inspección.
- f. Es necesario limpiar la pieza para eliminar restos de partículas magnéticas o de soluciones líquidas aplicadas.
- g. Para evaluar un componente de gran tamaño podrá ser necesario utilizar gran cantidad de corriente.
- h. Debe tenerse el cuidado de no quemar o sobrecalentar las superficies donde se realiza el contacto eléctrico.
- i. Debe tenerse experiencia y habilidad para interpretar las indicaciones de las partículas magnéticas.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MÉTODO DE INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y POR LÍQUIDOS PENETRANTES

La prueba no destructiva mediante partículas magnéticas es un método complementario con el de líquidos penetrantes en la detección de discontinuidades superficiales, siendo ambos de metodología relativamente simple y de bajo costo. Un factor importante que los diferencia es el uso del electromagnetismo en el método de partículas magnéticas y el uso de un líquido y revelador en el de líquidos penetrantes.

De las distintas técnicas de pruebas no destructivas para la detección de discontinuidades, las pruebas por medio de líquidos penetrantes y partículas magnéticas suman, aproximadamente, el 50% de todas las pruebas no destructivas que se realizan. Una de las ventajas de utilizar cualquiera de éstos es que las indicaciones que aparecen, luego de realizar la prueba a la pieza, asemejan la discontinuidad real. Las discontinuidades se presentarán con una línea bien marcada que indica la forma y dirección del defecto. En ambos métodos, la interpretación de las indicaciones se realiza por medio de una inspección visual. Utilizando otros métodos, las indicaciones necesitan de una señal electrónica que luego requiere interpretación para poder obtener los resultados.

El método de inspección por medio de partículas magnéticas en materiales ferromagnéticos presenta mayor número de ventajas que el utilizar el método por medio de líquidos penetrantes.

A continuación se enumeran algunas de las ventajas de utilizar partículas magnéticas:

- a. además de detectar defectos superficiales, también detecta aquellos que se encuentran de manera subsuperficial,
- b. el método de partículas magnéticas se utiliza cuando se requiere una inspección más rápida que cuando se utilizan líquidos penetrantes y es más económica,
- c. el material a evaluar requiere menor limpieza que con líquidos penetrantes,
- d. con partículas magnéticas se logra una mejor evaluación de las discontinuidades que se encuentran llenas de contaminantes y que no pueden ser detectadas con líquidos penetrantes,
- e. no hay riesgo de causar oxidación en el material ferroso dado que no se utiliza agua para limpiar,
- f. utilizando partículas magnéticas se pueden inspeccionar varias piezas obteniendo resultados inmediatos.

4.1 Consideraciones

Hay varios factores que deben tomarse en consideración al elegir el Método de prueba no destructivo a utilizarse. En la Tabla V se exponen consideraciones importantes de los dos métodos analizados.

Tabla V. **Costo relativo y otras características de dos métodos de pruebas no destructivas**

Consideraciones importantes	Método	de prueba
	Partículas magnéticas	Líquidos penetrantes
Capital requerido	Mediano	Bajo
Costo de consumibles	Mediano	Mediano
Tiempo de resultados	Inmediato	Poco tiempo
Efecto de geometría	No muy importante	No muy importante
Problemas de acceso	Importante	Importante
Tipo de defecto	Superficiales y subsuperficiales	Superficiales
Sensitividad relativa	Bajo	Bajo
Record formal	Inusual	Inusual
Habilidad del operador	Bajo	Bajo
Entrenamiento del operador	Importante	Bajo
Necesidades de entrenamiento	Bajo	Bajo
Portabilidad del equipo	Alto a mediano	Alto
Dependencia de la composición del material	Sólo magnético	Poco
Facilidad de automatizar	Aceptable	Aceptable
Capacidades	Únicamente defectos	Únicamente defectos
Materiales que evalúa	Ferromagnéticos	No sólo ferromagnéticos

Fuente: *NDT Advanced materials & processes/June 2008. Pág. 41*

4.2 Cuadro comparativo de las características de los métodos de inspección por partículas magnéticas y por líquidos penetrantes

Tabla VI. Comparación de dos Métodos de pruebas no destructivas⁶

	Partículas magnéticas	Líquidos penetrantes
Características detectadas	Derrame de flujo magnético causado por discontinuidades superficiales o subsuperficiales, rajaduras, conexiones o cambios en materiales o su geometría.	Apertura en las superficies debido a rajaduras, porosidad, conexiones o dobleces.
Ventajas	Económico o costo moderado.	Económico
	Sensible a defectos superficiales o subsuperficiales.	Sensible a discontinuidades pequeñas superficiales.
	Método muy utilizado en la industria.	Fácil de usar.
	Se aplica de manera rápida.	Lo portátil lo hace práctico.
	Manejo de alto volumen.	No requiere electricidad.
	Poca o ninguna limitación de tamaño de pieza requerida.	Útil para probar piezas de distintos tamaños y formas.
	No se requiere de una limpieza muy detallada, previo a la prueba.	Se evalúa el 100% de la superficie.
	Se obtienen resultados inmediatos.	No está limitado a material ferromagnético.
	No se requiere interpretación de resultados en equipos complejos.	Puede utilizarse con la mayoría de materiales.
	Interpretación de indicaciones es visual.	Interpretación de indicaciones es visual.

	Partículas magnéticas	Líquidos penetrantes
Limitaciones	Limitado a material ferromagnético.	No es útil en materiales porosos, superficies ásperas o sucias.
	Preparación de la superficie puede requerirse.	La preparación de la superficie es crítica.
	Desmagnetización post-prueba necesaria.	No es ecológico y el manejo es sucio
	Detecta defectos superficiales y subsuperficiales pero no detecta defectos internos.	Detecta defectos superficiales únicamente (no subsuperficiales ni internos).
Ejemplos de uso	Detección de rajaduras en piezas metálicas, ruedas y carriles de ferrocarril, piezas fundidas, ganchos de plumas, ejes de transmisión, tuberías metálicas, soldaduras, eslabones de cadenas soldadas.	Rajaduras superficiales en turbinas y en piezas metálicas, en soldaduras, uniones, y para detectar defectos superficiales en materiales no porosos.
Tiempo de proceso	Resultados inmediatos	De 10 a 30 minutos promedio

5. OTROS MÉTODOS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

5.1 Método de inspección por medio de corrientes Eddy

5.1.1 Introducción a las pruebas con corrientes Eddy

La prueba de inspección mediante las corrientes Eddy o corriente parásita está basada en el principio de la inducción electromagnética. Un campo magnético crea perturbaciones eléctricas en forma de corrientes Eddy, que cambian de forma. El cambio de forma puede traducirse en señales eléctricas que pueden registrarse. Las pruebas de corriente Eddy ayudan a detectar irregularidades en la superficie, por ejemplo, grietas y picaduras antes de que ocasionen cortes de energía, forzados y pérdidas de tiempo. Este método no requiere contacto eléctrico directo con la parte que está siendo inspeccionada.

Este método es utilizado para detectar discontinuidades en partes que son conductoras de electricidad. Las corrientes Eddy inducidas en un conductor eléctrico varían en magnitud y distribución en respuesta de propiedades tales como conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, geometría y discontinuidades. Cuando las corrientes Eddy encuentran un obstáculo, tal como una rajadura, el camino normal y la fuerza de las corrientes cambian. Este cambio es detectado en una pantalla o en un medidor. Estas corrientes son inducidas en un conductor por medio de un campo magnético en un tiempo variante, fluyen en forma circular, pero sus rastros son orientados, perpendicularmente, a la dirección del campo magnético.

Las pruebas con corrientes de Eddy, igual que la inspección con partículas magnéticas, son más adecuadas para detectar defectos cerca de la superficie de una muestra. Particularmente a altas frecuencias, las corrientes de Eddy no penetran profundamente debajo de la superficie.

La prueba con corrientes de Eddy es, particularmente, rápida en comparación con la mayor parte de las demás técnicas de prueba no destructivas. Por tanto, gran cantidad de piezas pueden probarse rápida y económicamente. A menudo la prueba con corriente de Eddy se toma como una prueba de "Pasa o No Pasa" estandarizada con piezas en buen estado.

5.1.2 Características de las pruebas con corrientes Eddy

- a. Detectar rajaduras superficiales y algunas subsuperficiales.
- b. Detectar discontinuidades en materiales.
- c. Determinar propiedades en materiales.
- d. Medir el grosor de metales delgados, capas conductoras, o, capas no conductoras sobre sustratos conductoras.

5.1.3 Ventajas de las pruebas con corrientes Eddy

- a. Alta velocidad
- b. Bajo costo
- c. Capacidad de record permanentes
- d. Se aplica a todos los metales, electroconductores y aleaciones.
- e. Medición exacta de la conductividad.
- f. Indicación inmediata.
- g. Detección de áreas de discontinuidades muy pequeñas (0.0387 milímetros cuadrados a 0.00006 pulgadas cuadradas)
- h. La mayoría de los equipos trabajan con baterías y son portátiles.
- i. La única unión entre el equipo y la pieza bajo inspección es un campo magnético, no existe posibilidad de dañar la pieza.

5.1.4 Limitaciones de las pruebas con corrientes Eddy

- a. Únicamente se puede realizar con material conductivo.
- b. Profundidad de penetración limitada restringida a menos de 6 mm.
- c. En algunos casos es difícil verificar los metales ferromagnéticos.
- d. Se aplica a todas las superficies, formas uniformes y regulares.
- e. Los procedimientos son aplicables, únicamente, a materiales conductores.
- f. No se puede identificar, claramente, la naturaleza específica de las discontinuidades.
- g. Se requiere de personal calificado para realizar la prueba.

5.2 Método de inspección por medio ultrasónico

5.2.1 Introducción a las pruebas ultrasónicas

El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en Hertz con ayuda de un aparato creado para ese fin. La prueba de ultrasonido es realizada mediante la emisión de un sonido de alta frecuencia que nos indica los defectos de nuestro material a través de la pantalla de un osciloscopio. Mide el espesor, la velocidad o detecta defectos internos y sus variaciones, tales como rajaduras, poros, grietas, defectos de soldadura, falta de fusión, falta de contacto, entre otros.

Las aplicaciones incluyen, metales, soldaduras, uniones, materiales no metálicos así como partes en servicio. Los materiales sometidos a la prueba de ultrasonido deben ser de forma regular y de materiales no porosos. Por otro lado, se encuentra que tanto los materiales ferrosos como los no ferrosos pueden ser sometidos a esta prueba.

5.2.2 Características de las pruebas ultrasónicas

Comúnmente, se utilizan tres técnicas para inspeccionar, ultrasónicamente, un material.

5.2.2.1 Método de pulso y eco, o, de reflexión

Se genera un pulso ultrasónico que es transmitido a través del material. Cuando la onda elástica choca con una interfase, parte de la onda, se refleja, regresando al transductor. En un osciloscopio es posible desplegar tanto el pulso inicial como el reflejado. Del despliegue, se mide el tiempo requerido para el viaje de ida y vuelta, con lo que se puede calcular la distancia a la que se encuentra la interfase. De no existir fallas en el material, el haz se reflejará desde su lado opuesto y la distancia será dos veces el espesor de la pared, mientras que moviendo el transductor sobre la superficie, se puede conocer, también, la longitud de la discontinuidad.

5.2.2.2 Método de transmisión de un pulso a través del medio

En un transductor se genera un pulso ultrasónico y mediante un segundo transductor se detecta en la superficie opuesta. Los pulsos iniciales y los transmitidos se despliegan en el osciloscopio. La pérdida de energía entre el pulso inicial y el transmitido depende de si existe o no discontinuidad dentro del material.

5.2.2.3 Método de resonancia

Se utiliza la naturaleza ondulatoria de la onda ultrasónica. Se genera una serie de pulsos que viajan como onda elástica a través del material. Seleccionando una longitud de onda o frecuencia de manera que el espesor del material sea un múltiplo entero de medias longitudes de onda, se produce una onda elástica estacionaria, y, se refuerza en el material. Una discontinuidad dentro del material evita que la resonancia ocurra. Sin embargo, esta técnica se utiliza con mayor frecuencia para la determinación del espesor del material.

5.2.3 Ventajas de las pruebas ultrasónicas

- a. La prueba se efectúa, rápidamente, obteniendo resultados inmediatos.
- b. Se tiene mayor exactitud al determinar la posición de las discontinuidades internas; estimando sus dimensiones, orientación y naturaleza.
- c. Alta sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas.
- d. Alta capacidad de penetración, lo que permite localizar discontinuidades a gran profundidad del material.
- e. Se pueden probar materiales ferrosos y no ferrosos.
- f. Muy sensitivo a rajaduras
- g. Resultados inmediatos
- h. Posibilidad de automatizar
- i. Portátil

5.2.4 Limitaciones de las pruebas ultrasónicas

- a. Costo inicial elevado por el tipo de equipo necesario para realizar la prueba.
- b. Baja velocidad de inspección cuando se emplean métodos manuales.
- c. Requiere de personal con una buena preparación técnica y gran experiencia.
- d. Dificultad para inspeccionar piezas con geometría compleja, espesores muy delgados o de configuración irregular.
- e. Dificultad para detectar o evaluar discontinuidades cercanas a la superficie sobre la que se introduce el ultrasonido.
- f. Requiere de patrones de calibración y referencia.
- g. Es afectado por la estructura del material (tamaño del grano, tipo de material).
- h. Alto costo del equipo.
- i. Se requiere de agente acoplante.
- j. Complejo en partes pequeñas ya que son difíciles de revisar
- k. Requiere de operadores entrenados.

5.3 Método de inspección por medio radiográfico

5.3.1 Introducción a las pruebas radiográficas

El método de Rayos-X y Rayos-Gamma utiliza las habilidades de penetración de radiación electromagnética para examinar la parte interior de los objetos. Hay tres factores principales que determinan la cantidad de información radiográfica que puede proveer acerca de un objeto: 1) La composición del objeto, 2) La densidad del material del que está hecho el objeto, 3) La energía que los Rayos-X o Gamma inciden sobre el objeto.

Cuando hay alguna discontinuidad dentro del objeto ocurre un cambio localizado en las primeras dos características mencionadas arriba, y, por lo tanto, se vuelven detectables.

Aunque la radiografía va a revelar el interior de objetos opacos, no es posible detectar todo tipo de irregularidades o discontinuidades. Defectos pequeños tales como rajaduras finas o hendiduras en objetos gruesos serán difíciles de detectar.

El Método de pruebas radiográficas es caro, comparado con otros métodos y deberá ser utilizado para evaluar discontinuidades internas que no pueden ser evaluadas por otro método más económico. El principal uso del método radiográfico es mostrar discontinuidades internas.

5.3.2 Características del Método radiográfico

Mide o detecta, defectos internos y sus variaciones, porosidad, rajaduras, falta de fusión, corrosión, variación geométrica, cambios en densidad, mal ensamblaje y mal alineado.

5.3.3 Ventajas del Método radiográfico

- a. Registros permanentes
- b. Portátil
- c. Variación geométrica no tiene efecto en la dirección del rayo de radiación.

5.3.4 Limitaciones del Método radiográfico

- a. Peligro de radiación
- b. Caro
- c. Requiere de operadores con entrenamiento.
- d. Puede no verse la detección lineal.
- e. No se indica la profundidad del defecto.
- f. Se requiere acceso al menos a dos lados de la pieza.

5.4 Método de inspección visual

5.4.1 Introducción a las pruebas por inspección visual

La inspección visual, es sin duda una de las Pruebas no destructivas (PND) más ampliamente utilizadas, ya que gracias a ésta, se puede obtener información rápidamente, de la condición superficial de los materiales que se estén inspeccionando, con el simple uso del ojo humano. Este método es utilizado para detectar defectos y discontinuidades superficiales en piezas.

5.4.2 Características del Método por inspección visual

La inspección visual es el primer método que debe realizarse al realizar una prueba no destructiva. Durante la inspección visual, en muchas ocasiones, el ojo humano recibe ayuda de algún dispositivo óptico, ya sea para mejorar la percepción de las imágenes recibidas por el ojo humano (anteojos, lupas, etc.) o, bien, para proporcionar contacto visual en áreas de difícil acceso, tal es el caso de la inspección visual del interior de tuberías de diámetro pequeño, en cuyo caso se pueden utilizar boroscopios, ya sean éstos, rígidos o flexibles, pequeñas videocámaras, etc. Existen unidades de video portátiles así como robots que se utilizan para inspeccionar áreas donde es imposible tener acceso visual. El examinador visual deberá seguir procedimientos que varían desde simples hasta complejos.

5.4.3 Ventajas del Método por inspección visual

- a. Bajo costo
- b. Portátil
- c. Obtención de resultados casi inmediato.
- d. No siempre es necesario utilizar equipo adicional.
- e. Puede apoyarse en equipo adicional para realizarse la inspección.
- f. No hay límite en el tamaño de la pieza a inspeccionar.
- g. Se realiza en componentes de cualquier material.

5.4.4 Limitaciones del Método por inspección visual

- a. Detecta defectos superficiales, únicamente.
- b. Alguna área a inspeccionar puede no estar visible o accesible.
- c. La observación depende de la vista humana.
- d. Puede no verse algún defecto.

CONCLUSIONES

1. Las pruebas no destructivas (PND) por medio de partículas magnéticas y líquidos penetrantes son poco conocidas en nuestro medio, pero, muy necesarias en la industria. Es de vital importancia conocer estos métodos para realizar pruebas en piezas ferromagnéticas y, así, lograr detectar si existen defectos en el material evaluado que pueda poner en riesgo vidas humanas.
2. Tanto el método por medio de líquidos penetrantes como el de partículas magnéticas, son métodos fáciles de aplicar, de bajo costo, portátiles y en corto tiempo, se logra determinar si una pieza ferromagnética tiene defectos o no.
3. La electricidad es un elemento imprescindible para aplicar las partículas magnéticas en la detección de defectos en una pieza ferromagnética. De igual manera, en varios de los otros métodos existentes, el electromagnetismo también forma parte indispensable en las pruebas.
4. Al aplicar una PND para detectar un defecto en una pieza ferromagnética debe tenerse en cuenta que los métodos especificados en este trabajo se complementan entre sí.
5. El método de inspección por medio de partículas magnéticas presenta numerosas ventajas sobre el método de líquidos penetrantes, uno de ellos es, se puede obtener resultados inmediatos y localizar las discontinuidades subsuperficiales, no sólo las superficiales.

6. Las PND por partículas magnéticas y líquidos penetrantes se pueden utilizar en la inspección durante la fabricación de piezas metálicas industriales en sus distintas etapas, por ejemplo: la inspección de procesos y control de calidad, la inspección de recepción y la inspección final de las piezas.

7. Se utilizan las PND en el mantenimiento y en las inspecciones de reparaciones, así como en el mantenimiento preventivo o fabricación de piezas como eslabones de cadenas soldadas, tuberías metálicas, soldaduras en tuberías, fundiciones, ganchos de plumas, ejes de transmisión, calderas, entre otros.

RECOMENDACIONES

1. Las pruebas no destructivas (PND) por medio de partículas magnéticas y líquidos penetrantes son métodos que pueden ser estudiados científicamente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) para proporcionarle al estudiante, al profesional y a los usuarios de este servicio, conocimientos en esta área, capacitándolos para implementarlas en la industria.
2. Ambos métodos son fáciles de aplicar y de bajo costo en consumibles, por lo que representan una opción viable para la implementación de pruebas de laboratorio en la Escuela de Mecánica Eléctrica de la USAC.
3. Antes de seleccionar el método de PND que se pretenda aplicar, siempre se deberá realizar primero una inspección visual a la pieza, ya que al hacer esto puede agilizarse el proceso de encontrar defectos en el material de la misma.
4. Actualmente, existen cursos de capacitación para cada método de PND. Sin embargo, muchos de ellos son impartidos en Estados Unidos y en idioma inglés. Podría aprovecharse esta limitante para invertir recursos en capacitación propia para, luego, implementar una serie de cursos e impartirlos en nuestro país.

5. Es importante conocer que existe la Sociedad Americana para Pruebas no destructivas (*American Society for Nondestructive Testing, Inc.*, ASNT) y poder obtener beneficios de ello. La ASNT es la sociedad más grande del mundo de profesionales en pruebas no destructivas (PND). A través de esta organización y membresía, la ASNT provee de un foro para intercambiar información técnica, programas y material educativo, así como estándares y servicios para la certificación de personal en dichas pruebas. La ASNT promueve la disciplina de PND como una profesión y, facilita su investigación y aplicaciones tecnológicas.

6. Es necesario recibir capacitación sobre las PND para cumplir a cabalidad con lo estipulado en el código de Pruebas no destructivas según la ASNT y, así, evitar errores en su implementación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. United States Air Force. ***Nondestructive inspection methods, Basic Theory. Technical manual.*** Estados Unidos de América: 2007.
2. Iowa State University. ***NDT Education resource center.*** Estados Unidos de América: 2001.
3. John D. Krauss. **Electromagnetismo.** 3ª ed. México: McGraw-Hill, 1986. p.852
4. Robert M. Rose, Lawrence A. Shepard y John Wulff. **Propiedades electrónicas.** México: Limusa, 1978. p.316
5. William H. Hayt. **Teoría electromagnética.** México: McGraw-Hill, 1979. p.511
6. General Electric. **NDT Guide to nondestructive testing.** Estados Unidos de América: 2008.
7. LLOG, S.A. de C.V. **Tutorial partículas magnéticas.** México.

BIBLIOGRAFÍA

1. Blitz, Jack. ***Electrical and magnetic methods of non-destructive testing***. Second edition. London: Chapman & Hall, 1997.
2. Cartz, Louis. ***Nondestructive testing. ASM International***. USA: 1995.
3. General Electric. ***NDT Guide to nondestructive testing***. USA: 2008.
4. Halmshaw, R. ***Introduction to the non-destructive testing of welded joints***. Second edition. Abington Publishing Ltd., 1996.
5. Hayt, William H. ***Teoría electromagnética***. 1979.
6. Hellier, Charles J. ***Handbook of nondestructive evaluation***. USA: McGraw-Hill, 2001.
7. Iowa State University. ***NDT Education resource center***. USA: 2001.
8. Krauss, John D. ***Electromagnetismo***. McGraw-Hill, 1986.
9. United States Air Force. ***Nondestructive inspection methods, basic theory. Technical Manual***. USA: 2007.
10. Rose, Robert y Lawrence Shepard. ***Propiedades electrónicas***. Limusa, 1978.