

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE NORMATIVAS UTILIZADAS EN ENSAYOS  
NO DESTRUCTIVOS POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA  
PRÁCTICAS Y SERVICIOS DE LABORATORIO**

PRESENTADO POR:

**CARLA MARÍA BUSTAMANTE CONTRERAS**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

**M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIA GENERAL :

**M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO :

**Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR INTERINO :

**Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

PROPUESTA DE NORMATIVAS UTILIZADAS EN ENSAYOS NO  
DESTRUCTIVOS POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA  
PRÁCTICAS Y SERVICIOS DE LABORATORIO

Presentado por :

**CARLA MARÍA BUSTAMANTE CONTRERAS**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, julio de 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## DEDICATORIA

A mis padres, Lourdes y Rafael quienes desde el inicio me han brindado comprensión, amor y apoyo para conseguir mis sueños, sin ellos nada de esto sería posible.

A mi hermana, quien siempre me ha brindado su confianza y su apoyo, además de haberme dado el ejemplo que siempre se puede llegar lejos.

*Carla María.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar a Dios Todopoderoso y a María Auxiliadora, por brindarme la fuerza y los medios para cumplir una meta más en mi vida.

A mi familia, por apoyarme en cada momento a lo largo de toda mi carrera.

A mis compañeros desde el inicio de la carrera, por el apoyo y las experiencias compartidas durante los años de estudio.

A mis docentes, que durante toda mi etapa formativa compartieron su conocimiento y experiencia.

A mi docente asesor, Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por su paciencia y por cada consejo brindado durante toda mi carrera, especialmente en el proceso de elaboración de mi trabajo de graduación.

*Carla María.*

# PROPUESTA DE UN LABORATORIO DIDÁCTICO DE TRATAMIENTOS TÉRMICO SUPERFICIALES POR INDUCCIÓN

Estudiante: Br. Carla María Bustamante Contreras <sup>1</sup>

Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz<sup>2</sup>

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Universidad de El Salvador

## RESUMEN

Se ha realizado un estudio sobre el ensayo no destructivo por partículas magnéticas, la definición y su fundamento, además de su procedimiento. Luego, se procedió a hacer una propuesta de normativa tomando en consideración el equipo a utilizar, aplicando la norma de la ASTM designación E 1444, para ser utilizada en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica en futuros proyectos. Posteriormente se realizó una recopilación bibliográfica de diferentes ensayos realizados, aplicando campo magnético residual, magnetizando directamente y con partículas húmedas fluorescentes, pero siempre adecuados a la propuesta de normativa presentada. Finalmente, se presenta el análisis de resultados de los casos presentados y se concluye que éste es uno de los métodos más eficaces para encontrar defectos subsuperficiales, en especial en soldaduras.

Palabras claves: ensayo no destructivo, partículas magnéticas, y Normativa.

---

1 E-mail: [cbustamante2403@gmail.com](mailto:cbustamante2403@gmail.com)

2 E-mail: [jonathan.berrios@ues.edu.sv](mailto:jonathan.berrios@ues.edu.sv)

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Historia de las partículas magnéticas.....	3
1.2. Definición y fundamentos del ensayo.....	4
1.2.1. Definición.....	5
1.2.2. Fundamentos del ensayo.....	13
1.2.3. Materiales paramagnéticos.....	27
1.2.4. Materiales ferromagnéticos.....	28
1.2.5. Aplicaciones.....	31
1.3. Ventajas y limitaciones del ensayo con partículas magnéticas.....	32
1.3.1. Ventajas.....	32
1.3.2. Limitaciones.....	33
1.4. Procedimiento del ensayo con partículas magnéticas.....	34
2. DISEÑO DE LA PROPUESTA DE NORMATIVA PARA EL ENSAYO NO DESTRUCTIVO MEDIANTE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	37
2.1 Materiales y equipos.....	39
2.2 Normativas empleadas.....	41
2.2.1. Norma de la ASTM designación E 1444. Práctica estándar para el examen de partículas magnéticas.....	41

	Pág.
3. IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA DE NORMATIVA UTILIZADAS EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS. ....	56
3.1. Aplicaciones de ensayos no destructivos.....	56
3.1.1. Ensayo con partículas magnéticas aplicando campo residual ...	56
3.1.2. Ensayo con partículas magnéticas magnetizadas directamente.....	62
3.1.3. Estudio con partículas húmedas fluorescentes.....	66
3.2. Análisis de resultados.....	71
 CONCLUSIONES.....	 74
 REFERENCIAS.....	 76
 ANEXO A. PRÁCTICA DE LABORATORIO: ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	 ...78

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Indicadores de campo magnético para la adición de partículas magnéticas [6].....	40
Tabla 2.2. Intervalos de verificación requeridos [7].....	50
Tabla 2.3. Indicaciones requeridas cuando se Utiliza el Método de anillo [7].....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Leyes de magnetismo [3].....	14
Fig. 1.2. Principio de prueba de partículas magnéticas [3].....	15
Fig. 1.3. Magnetización con yugo [3].....	17
Fig. 1.4. Esquema de corriente alterna [3].....	18
Fig. 1.5. Esquema de corriente directa rectificada [3].....	19
Fig. 1.6. Porosidades en soldadura [5].....	23
Fig. 1.7. Inclusiones de escoria [5].....	23
Fig. 1.8. Fusión incompleta [5].....	24
Fig. 1.9. Penetración incompleta [5].....	24
Fig. 1.10. Fisura [5].....	25
Fig. 1.11. Socavadura [5].....	26
Fig. 1.12. Tamaños y perfiles de soldadura [5].....	26
Fig. 1.13. Dominios magnéticos con imanación de saturación en direcciones distantes en un material ferromagnético [6].....	30
Fig. 1.14. Imantación por a) Crecimiento de dominios; y b) rotación [6].....	31
Fig. 1.15. Métodos de magnetización circular.....	35
Fig. 1.16. Métodos de magnetización longitudinal.....	36
Fig. 2.1. Esquema del sistema de perturbación permanente del campo magnético [6].....	38
Fig. 2.2. ANSI KETOS Herramienta de anillo de hierro [7].....	51
Fig. 2.3. Configuración de defectos artificiales y su designación [7].....	53
Fig. 2.4. Ejemplo de corriente inducida de magnetización [7].....	54
Fig. 2.5. Grieta visualizada a través de partículas secas rojas [7].....	55

Fig. 2.6.	Grieta Visualizada mediante partículas negras húmedas [8].....	54
Fig. 2.7.	Comparativa entre partículas fluorescentes y visibles [8].....	54
		Pág.
Fig. 3.1.	Elementos empleados en la primera situación [9].....	57
Fig. 3.2.	Inducción del campo magnético a través del yugo [9].....	58
Fig. 3.3.	Añadidura de partículas magnéticas [9].....	58
Fig. 3.4.	Creación de líneas de campo [9].....	59
Fig. 3.5.	Existencia de magnetismo en la superficie de la placa de acero [9].....	60
Fig. 3.6.	Campo longitudinal continuo en la superficie [9].....	61
Fig. 3.7.	Fisura encontrada realizando el ensayo de partículas magnéticas [9].....	62
Fig. 3.8.	Elementos para la realización del segundo ensayo [10].....	63
Fig. 3.9.	Preparación previa al ensayo de magnetización por corriente directa [10].....	64
Fig. 3.10.	Añadidura de partículas magnéticas e inyección de corriente a la pieza [10].....	65
Fig. 3.11.	Discontinuidad hallada a través del ensayo de magnetización por corriente directa [10].....	66
Fig. 3.12.	Elementos para la realización del estudio con partículas húmedas fluorescentes [11].....	67
Fig. 3.13.	Ajuste de parámetro de intensidad de luz negra [11].....	68
Fig. 3.14.	Inyección de campo magnético y agregando partículas magnéticas [11].....	69
Fig. 3.15.	Indicativo de campo magnético sobre la superficie [11].....	69
Fig. 3.16.	Agregado de partículas magnéticas sobre la superficie [11].....	70
Fig. 3.17.	Hallazgo de discontinuidades en la superficie de la junta soldada [11].....	71

## LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

AMS:	Sociedad de la Información de Materiales
ANSI:	Instituto Nacional Americano de Estándares
ASNT:	Sociedad Americana de Pruebas No Destructivas
ASTM:	Sociedad Americana de Prueba de Materiales
AWS:	Sociedad Americana de Soldadura
END	Ensayo No Destructivo
fc:	Pie-candela
FWDC:	Corriente de Onda Completa
lx:	Lux
MIL-STD:	Estándar del Método de Prueba del Departamento de Defensa
SAE:	Sociedad Americana de Soldadura

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de soldeo están presentes en nuestro entorno en cualquier tipo de construcción, ya sea de máquinas, barcos, trenes, aviones, puentes, vehículos, o en cualquier tipo de unión formado por diferentes piezas, subconjuntos, conjuntos, entre otros. Las piezas y elementos soldados requieren de la verificación de cómo se elaboró el proceso de fabricación y también sirven para mantenimiento preventivo a nivel industrial, pues la presencia de grietas, escoria e imperfecciones puede causar la ruptura de las piezas.

Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de non destructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades mecánicas, físicas, dimensionales o químicas.

El propósito de estos ensayos es detectar discontinuidades superficiales e internas en materiales, soldaduras, componentes y partes fabricadas. Los ensayos son realizados bajo procedimientos escritos, que atienden a los requisitos de las principales normas o códigos de fabricación, tales como el ASME, ASTM, y el AWS entre otros. Entre estos ensayos se encuentra la inspección por partículas magnéticas, el cual utiliza campos magnéticos para revelar discontinuidades.

El presente trabajo consiste en el ensayo no destructivo por partículas magnéticas y una propuesta de normativa para la correcta aplicación de éste. En el capítulo uno se lleva a cabo una amplia descripción y explicación sobre la definición, principios y fundamentos del ensayo, así como también los materiales a los que se les puede realizar. En el capítulo dos se realiza el diseño de la propuesta de normativa, basada en la norma de la ASTM designación E 1444, donde se describe los materiales y equipo a utilizar, además del proceso. En el capítulo 3 se procede a implementar la propuesta de normativa a partir de 3

ensayos realizados bajo diferentes condiciones, como también se llevará a cabo el análisis de resultados, lo que servirá para las conclusiones del trabajo de graduación.

## **1. MARCO TEÓRICO**

En el método de ensayo no destructivo de partículas magnéticas, al igual que en el resto de métodos, es importante conocer los fundamentos teóricos en los que se basa. Éste se fundamenta en el principio de que las líneas del campo magnético, en presencia de material ferromagnético, se distorsionarán ante un cambio en la continuidad del material, como en un cambio dimensional agudo o una discontinuidad. Si la discontinuidad es abierta o cerrada a la superficie de un material magnetizado, las líneas del flujo se distorsionarán en la superficie, condición denominada “flujo disperso”. Cuando las partículas magnetizables finas se distribuyen sobre el área de la discontinuidad mientras existe el flujo disperso, serán mantenidas en el lugar y la acumulación de partículas será visible bajo condiciones lumínicas apropiadas. Al tiempo que existen variables en el método de partículas magnetizables, todas dependen de este principio, que las partículas magnetizables serán retenidas en las localizaciones del flujo disperso [1].

### **1.1. HISTORIA DE LAS PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

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

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

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

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

A partir de 1940, la industria petroquímica inspeccionó su infraestructura y equipo con partículas magnéticas, y muchas industrias de acero consideraron ésta técnica como un medio que incrementaba los rendimientos. Durante la segunda guerra mundial, se inspeccionaban estructuras soldadas en armamento, vehículos y naves aéreas [2].

## **1.2. DEFINICIÓN Y FUNDAMENTOS DEL ENSAYO**

El ensayo mediante partículas magnéticas es un método de detección de discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales magnetizables, que utiliza el efecto que produce un campo magnético al atravesar un material ferromagnético, de tal manera que si en la pieza se encuentra alguna discontinuidad, el campo magnético se verá repelido por la misma generando un campo de fuga.

### 1.2.1. DEFINICIÓN

A través de los años, diferentes autores han definido el ensayo no destructivo por partículas magnéticas de formas variadas.

La prueba con partículas magnéticas es una tecnología de las evaluaciones no destructivas que consiste en la aplicación de un material ferromagnético finamente dividido en un campo magnético, para detectar la presencia de grietas y otras discontinuidades no lineales en aleaciones de acero y otros materiales similares, en donde la superficie del componente a ser inspeccionado se magnetiza completa o localmente.

Es una prueba electromagnética que sirve de ayuda a la examinación visual y revela imperfecciones no detectadas por radiografía, su efectividad disminuye rápidamente dependiendo del tipo y profundidad del defecto, se puede aplicar en cualquier material ferromagnético. Es más efectiva en la detección de discontinuidades alargadas que en las de forma redondeada [2].

El principio de operación de este ensayo consiste en que el flujo magnético en un objeto magnetizado se distorsiona localmente por la presencia de una discontinuidad, esta distorsión causa que parte del flujo magnético salga y vuelva a entrar en la discontinuidad del objeto a prueba y al aplicar partículas finas de hierro al área de interés, se revela su presencia.

El flujo magnético escapa desde los lados de la ruptura indicando su localización debido a que la corriente magnética está en una apropiada dirección relativa a la discontinuidad, así la imperfección se puede mostrar mejor si el campo magnético es vertical a esta.

La magnetización del material ferromagnético, consiste en la aplicación de un campo magnético mediante una corriente por contacto directo a través de un material no conductor y mediante corriente inducida a través de una bobina,

conductor central o yugo magnético. Comúnmente ésta se realiza con un yugo, el cual se instala en un banco de prueba para que el material sea completamente magnetizado, si las discontinuidades se muestran en direcciones diferentes se pueden aplicar dos o más métodos de magnetización simultáneamente.

Se emplean polvos secos o tintes, que pueden ser fluorescentes o coloreados. El método húmedo utiliza tintas y es más sensitivo que el método seco, en este el polvo magnético es suspendido en un agente húmedo que puede ser aceite o agua con aditivos. En el método seco el material se rocía con polvo magnético o seco, este método es aplicado para mostrar discontinuidades grandes y para inspeccionar materiales calientes [2].

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

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

La detección de las imperfecciones depende de la condición superficial del área a ser inspeccionada, los defectos deben tener un valor menor que tres veces el valor de la rugosidad de la superficie. Bajo condiciones óptimas y con buenas

superficies, se pueden detectar imperfecciones de aproximadamente 0.5 mm de largo y 0.02 mm de profundidad [2].

A continuación, se enlista una serie de requisitos importantes a tener en consideración de las partículas magnéticas que son utilizadas en el ensayo:

## **A) Características de las partículas magnéticas**

Las partículas magnéticas son fabricadas de materiales ferromagnéticos, con propiedades físicas y magnéticas que afectan su funcionalidad como medio para formar indicaciones las cuales se mencionan a continuación:

### **a) Propiedades físicas**

Las propiedades físicas principales de las partículas magnéticas son el tamaño, forma, densidad y color:

- ✓ **Tamaño:** Estas partículas son mucho más pequeñas donde el intervalo de dimensiones varía desde 0.125 a 60  $\mu\text{m}$ . Las partículas muy finas no se tienden a mover como unidades separadas, se aglomeran para formar grandes acumulaciones.
- ✓ **Forma:** Las partículas magnéticas son una mezcla de formas esféricas y alargadas, unas proporcionan movilidad adecuada y otras polarizaciones magnéticas, juntas se enlazan para formar cadenas o puentes pequeños para los campos de fuga, con los que se forman las indicaciones visibles.
- ✓ **Densidad:** Es una propiedad que afecta la movilidad de las partículas. Por ejemplo, los polvos de tipo metálico y óxido son más densos que

el agua, por lo que las partículas húmedas, preparadas en agua o aceite, se tienden a asentar cuando no son agitadas.

- ✓ Color: Las partículas son coloreadas para proporcionar un color contrastante con la superficie de la pieza inspeccionada [3].

#### b) Propiedades magnéticas

Las partículas magnéticas deben ser muy sensibles al magnetismo, por lo que deben tener características magnéticas similares a los materiales ferromagnéticos, las cuales son:

- ✓ Alta permeabilidad magnética: Esto permite que las partículas puedan ser rápidamente magnetizadas, para que sean fácilmente atraídas y retenidas por campos de fuga débiles.
- ✓ Baja retentividad magnética: Esto significa que no retendrán prácticamente ningún magnetismo residual, lo que permite que sean fácilmente removidas [3].

### **B) Tamaño de las partículas**

La influencia que el tamaño de las partículas pueda ejercer en la obtención de las indicaciones, es algo que resulta evidente. Si su tamaño es grande, lógicamente para conseguir sus desplazamientos serán necesarias fuerzas relativamente grandes, que sólo los campos de fuga de gran intensidad podrían proporcionar, mientras que las pequeñas discontinuidades no darían ninguna indicación. Por el contrario, si las partículas fuesen de muy pequeño tamaño o muy finas, es posible que se produzcan falsas indicaciones. El problema del tamaño de las partículas magnéticas no debe ser estudiado aisladamente debido, principalmente, a la necesidad de tener que considerar conjuntamente el método de aplicación de las mismas.

Cuando se trate del método de aplicación por vía seca, la sensibilidad para las discontinuidades de pequeño tamaño aumenta, al menos de una forma general, al disminuir el tamaño de las partículas. Sin embargo, cuando las partículas son muy finas, pueden, aún en piezas con acabado fino, se acumulan en las irregularidades superficiales dando lugar a falsas indicaciones que, incluso, se pueden llegar a formar por la presencia de huellas digitales o zonas ligeramente engrasadas. Por lo tanto, en este método de aplicación no es aconsejable el empleo de partículas finas, ya que pueden dar lugar a problemas de interpretación.

Consecuentemente, en la práctica, al emplear este método las partículas no tienen un único tamaño, sino que se hace uso de mezclas de diversos tamaños mezclados en proporciones elegidas cuidadosamente para que mientras las de menor tamaño proporcionen la sensibilidad requerida, las más grandes, dado su mayor facilidad de movimiento pueden ayudar [4].

Por su efecto de arrastre sobre las más finas, tanto a localizar las discontinuidades como a evitar la formación de falsas indicaciones.

En el método de aplicación de las partículas por vía húmeda, las partículas magnéticas van en suspensión en un medio líquido, permitiendo el que puedan ser utilizados tamaños mucho más pequeños.

Por cuanto al tamaño de las partículas se refiere que se tiene que tener en consideración que si éste sobrepasa ciertos valores no será fácil mantenerlas en suspensión en el medio líquido, inconveniente que también se pone de manifiesto por el hecho de que su movilidad disminuye, hasta que se llegue a anular, cuando disminuye el espesor de la capa líquida en la que las partículas van suspendidas y que moja la pieza.

De otra parte, las partículas gruesas presentan cierta tendencia a alinearse formando agrupaciones en forma de cadena que se deforman por la acción de las fuerzas de arrastre del líquido, pudiendo dar lugar a falsas

indicaciones. En este sentido, cabe destacar que, generalmente, como límite superior para el tamaño de las partículas se suele tomar el de 40 a 60  $\mu\text{m}$ , mientras que no se suele fijar límite inferior para su tamaño [4].

### **C) Forma de las partículas magnéticas**

La forma de las partículas magnéticas es factor de gran importancia sobre su comportamiento, cualquiera que sea el método de aplicación que se utilice.

Dado que las partículas tienden a alinearse siguiendo la dirección de las líneas de fuerza de los campos de fuga, resulta evidente que las partículas alargadas formarán dipolos, norte-sur, con más facilidad que aquellas partículas cuya forma sea redondeada o globular, siempre que se trate de partículas del mismo material. Esto quiere decir que, las partículas alargadas se orientarán mejor y más rápidamente que las redondeadas lo que en definitiva redundará en una indicación más clara. Esta mayor efectividad de las partículas alargadas, donde se pone más de manifiesto, es cuando se trata de detectar pequeñas grietas, superficiales o subsuperficiales, las cuales, por su naturaleza, dan lugar a campos de fuga muy débiles.

La influencia de la forma de las partículas es más acusada cuando la aplicación se hace por vía seca. En este caso, las partículas alargadas, por su natural tendencia a formar agrupaciones en forma de cadena, incluso en el recipiente que las contiene, no fluirán con regularidad por el orificio de salida del aparato que se utilice para su proyección sobre la pieza, lo cual puede llegar a ser causa de que el examen resulte incómodo y laborioso. Por el contrario, si se trata de partículas redondeadas o globulares, no se presentará este inconveniente, fluirán mejor, pero estas partículas redondeadas proporcionan indicaciones menos claras y cuya formación es más lenta. De todo ello se deduce que, en el caso de tener que efectuar la aplicación de las

partículas por vía seca, será preciso mezclar en proporciones convenientes partículas de distintas formas con el fin de que puedan fluir con facilidad y al mismo tiempo proporcionen indicaciones aceptables.

Si la aplicación de las partículas se hace por vía húmeda, la influencia de su forma no es tan acusada como en el caso anterior ya que, la presencia de un medio líquido que contiene las partículas en suspensión, da lugar a que su salida a través de la boquilla del aparato de proyección no presente dificultades; Como última consideración, por cuanto a la forma de las partículas se refiere, cabe indicar que el empleo exclusivo de partículas alargadas encarecería considerablemente el ensayo al tiempo que no reportaría las ventajas que del aumento de coste cabría esperar [4].

#### **D) Clasificación de las partículas magnéticas**

Las partículas magnéticas se pueden clasificar por:

##### a) Medio de transportación para su aplicación

- ✓ Partículas secas: Las partículas empleadas en forma de polvo dependen de que el aire las lleve a la superficie de la pieza, por lo que se pueden utilizar pistolas, bulbos o aplicadores en forma de pera o tipo salero. El método para aplicar las partículas secas se lleva a cabo esparciéndolas sobre el área a inspeccionar, proporcionando de esta forma un alto grado de movilidad. Como las partículas flotan hacia abajo, por encima de la pieza que está siendo magnetizada, tienen libertad para moverse en cualquier dirección, por lo que se pueden atraer por campos de fuga débiles.

Ofrece las siguientes ventajas; esta técnica es superior a la de partículas húmedas por la detección de discontinuidades cercanas a la superficie, para objetos largos cuando se usa equipo de magnetización

portable, la movilidad es mayor para la detección de fallas relativamente profundas usando como fuente de magnetización corriente directa rectificada de media onda. En cuanto a las desventajas no se pueden usar en áreas confinadas sin la ayuda de equipo de seguridad, la probabilidad de detección es menor para discontinuidades muy finas en la superficie, puede ser muy difícil para usarse sobre cabeza, es probable que tenga menores velocidades de producción en comparación con las húmedas [3].

- ✓ Partículas húmedas: Este tipo de partículas son designadas para ser usadas suspendidas en un vehículo tal como agua o petróleo ligero destilado para obtener la concentración de la aplicación para la superficie de prueba.

La presentación de estas partículas puede ser en forma de pastas, polvo y concentrados:

Pastas: Deben ser disueltas en aceite para conseguir el tamaño de partícula y la consistencia adecuada. La pasta es difícil de deshacer y no se puede evitar que se formen terrones que se puedan mezclar con la suspensión. Actualmente, casi ya no se suministran las partículas en forma de pastas.

Polvo: Las partículas en polvo tienen la necesidad de mezclarse con agentes que faciliten su dispersión, agentes humectantes, agentes inhibidores de corrosión. Este tipo de partículas pueden ser vertidas mezcladas previamente.

Al aplicar este método obtenemos partículas suspendidas en un medio destilado de petróleo sin el uso de un acondicionador y este vehículo provee una medida de protección de corrosión para las partes y el equipo usado. Sin embargo, los principales inconvenientes de este método son la flamabilidad y disponibilidad [3].

b) Tipos de partículas:

- ✓ Partículas visibles, no-fluorescentes, contrastantes o coloreadas

Las indicaciones de partículas visibles son examinadas con luz blanca, que pueden ser natural o artificial. Con partículas visibles la selección del color de la partícula a utilizar depende únicamente del cual proporcione el mayor contraste con el color de la superficie de la pieza inspeccionada.

- ✓ Partículas fluorescentes

En partículas magnéticas, la fluorescencia es la propiedad que tienen ciertas sustancias para emitir luz blanca, dentro del rango de luz visible, cuando son iluminadas o expuestas a la luz ultravioleta. Normalmente este tipo de partículas tienen una coloración verde-amarilla, la cual tiene la particularidad de ser la más fácilmente visible para el ojo humano, por encontrarse al centro del espectro visible. Con excepción de algunas aplicaciones, las partículas fluorescentes son usadas en el método húmedo. Con ello, la inspección con partículas fluorescentes es rápida, confiable y más sensible para discontinuidades muy finas en la mayoría de aplicaciones [3].

### **1.2.2. FUNDAMENTOS DEL ENSAYO**

El método de partículas magnéticas está basado en el principio de campo de las líneas magnéticas que se presentan en un material ferromagnético, que serán distorsionadas al haber un cambio en la continuidad del material, como un cambio fuerte en la geometría o una discontinuidad del material. Si la discontinuidad es abierta o cerrada a la superficie de un material magnetizado,

las líneas de flujo serán distorsionadas en la superficie en una condición llamada fuga de flujo. Cuando finas partículas magnéticas son distribuidas sobre el área de la discontinuidad mientras la fuga de flujo existe se acumularán las partículas en el lugar siendo visibles bajo las condiciones apropiadas de luz, esto consta de tres operaciones básicas [3]:

- Establecer un flujo magnético adecuado
- Aplicación de las partículas magnéticas
- Interpretación y evaluación de los resultados

Un imán tiene la capacidad de atraer materiales ferromagnéticos. Esta capacidad de atraer o repeler no es uniforme sobre toda la superficie del imán, esto se localiza únicamente en las áreas conocidas como “polos”. El flujo magnético, o las líneas de fuerza, entran o abandonan el imán por los polos magnéticos por lo que, un imán podrá atraer materiales ferromagnéticos, solamente en estas áreas [3].

Entonces, las leyes del magnetismo de atracción y repulsión para imanes son los siguientes (ver, Fig. 1.1):

- Polos magnéticos diferentes se atraen.
- Polos magnéticos semejantes se repelen.

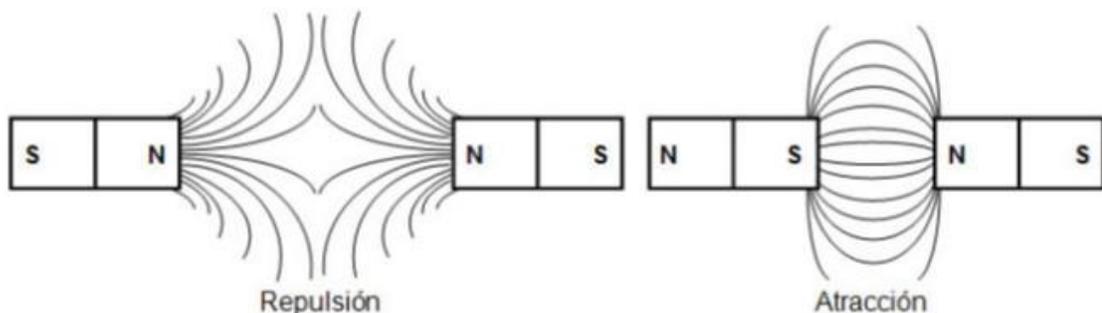


Fig. 1.1. Leyes de magnetismo [3].

Al tener un imán con una grieta en la superficie externa, esto inducirá inmediatamente un polo norte y un polo sur en los bordes de la discontinuidad (ver, Fig. 1.2). Esta grieta interrumpe el flujo uniforme de las líneas de fuerza dentro del imán, por lo que algunas de ellas se verán forzadas a salir del imán dando como resultado “fugas de flujo” y el campo magnético creado por las fugas de flujo es llamado “campo de fuga”. Por lo tanto, al esparcir las partículas magnéticas sobre el imán, éstas serán atraídas por los polos creados por la grieta, produciendo una indicación, por la concentración de partículas en la zona de la grieta [3].

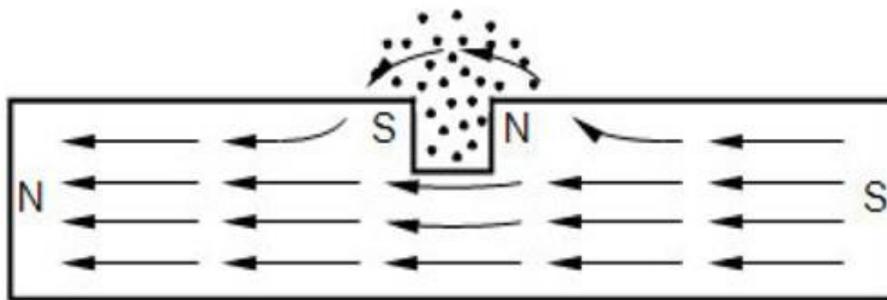


Fig. 1.2. Principio de prueba de partículas magnéticas [3].

La distorsión o fuerza de un campo de fuga, producido por una discontinuidad, depende de varios factores:

- a) El número de las líneas de fuerza; éste factor es afectado a su vez por varias características de la propia discontinuidad:
  - ✓ Ancho de la discontinuidad (la distancia entre sus polos).
  - ✓ Longitud de la discontinuidad.
  - ✓ Profundidad de la discontinuidad.

- ✓ Forma de la discontinuidad.
- ✓ Orientación de la discontinuidad. La discontinuidad debe estar orientada a 90°, y hasta 45°, con respecto a la dirección del flujo magnético, para que se podan detectar.

b) La condición de la superficie

c) La fuerza del flujo magnético generado, el cual es controlado por el amperaje utilizado para inducir el campo magnético y éste determina directamente el número de partículas magnéticas que pueden ser atraídas para formar una indicación [3].

Las características más importantes a tomar en consideración en el ensayo por Partículas Magnéticas son las siguientes:

a) Condición de la superficie

Sin tener en consideración las partículas que se van a utilizar, bien sean húmedas o secas, es primordial que las piezas examinadas estén bien limpias y libres de grasa, aceite, polvo, entre otros, ya que si no se cuenta con esto se puede disminuir la movilidad de las partículas y provocar que no sean atraídas hacia los campos de fuga [3].

b) Inducción de campo magnético

Los yugos son equipos portátiles en forma de "C", los cuales, inducen un campo magnético longitudinal entre sus polos (piernas), y son usados para magnetización local.

El campo magnético es generado en un sistema de bobina, localizada dentro del yugo, y transmitido a la pieza a través de sus polos. En la magnetización con yugo no existe el riesgo de producir quemadas por arco,

gracias a que se transmite a la pieza solamente el campo magnético y la corriente no entra a la pieza (ver, Fig. 1.3).

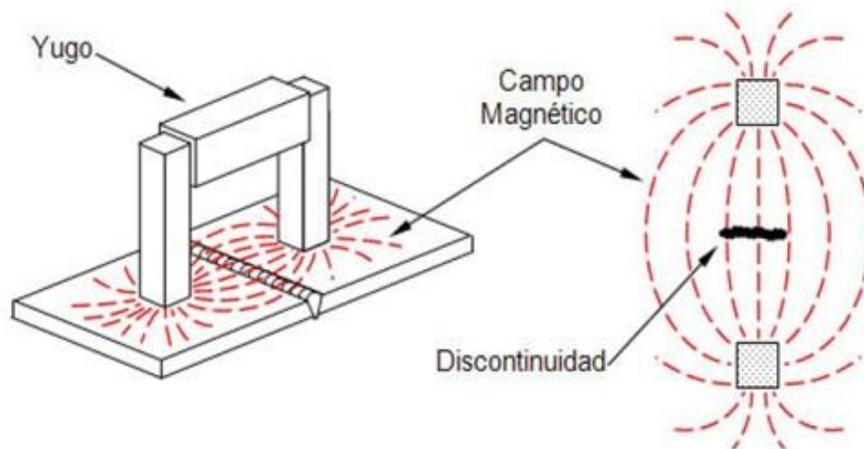


Fig. 1.3. Magnetización con yugo [3].

Existen yugos electromagnéticos que operan con corriente alterna solamente y otros que operan con corriente alterna y rectificada de media onda. Pueden contar con piernas fijas o articuladas, las cuales permiten ajustar el contacto en superficies irregulares o en superficies unidas en ángulo. La magnetización con yugo es más efectiva cuando las piernas se encuentran separadas entre 7.6 y 20 cm [3].

#### c) Tipo de corriente de magnetización

Los cuatro tipos básicos de corrientes utilizados en el examen con partículas magnéticas para establecer la parte magnetizadas son los siguientes:

##### ✓ Corriente alterna

Es utilizada para casi todos los servicios. Su rango de voltaje comercialmente disponible es de 110 a 440 V (ver, Fig. 1.4). Los circuitos

eléctricos para producir corriente alterna son simples y relativamente baratos, porque únicamente se requiere transformar el suministro comercial en voltajes bajos y corrientes de magnetización con altos amperajes.

La corriente alterna tiene poca capacidad de penetración, por lo que, el campo magnético inducido por la corriente alterna se concentra cerca de la superficie de la pieza que está siendo magnetizada, a esto se le conoce como efecto de piel.

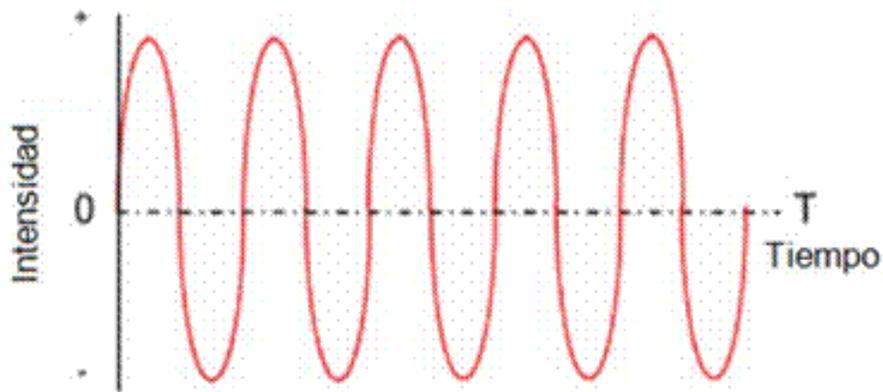


Fig. 1.4. Esquema de corriente alterna [3].

✓ Corriente directa rectificada de media onda

Este tipo de corriente es frecuentemente usada en conjunto con partículas secas y con magnetización localizada para lograr la misma profundidad de penetración para la detección de las típicas discontinuidades encontradas.

Cuando se rectifica una fase de corriente alterna, la corriente resultante es conocida como corriente directa rectificada en media onda. Esto significa simplemente que la polaridad inversa o porción negativa de

la curva sinusoidal de corriente alterna es eliminada, como se presenta en la figura 1.5.

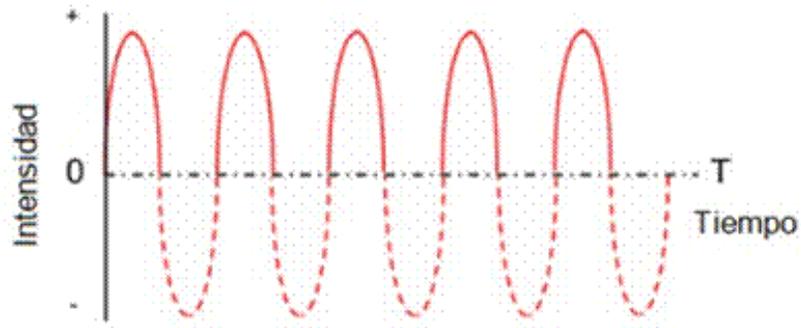


Fig. 1.5. Esquema de corriente directa rectificada [3].

Consiste de pulsos individuales de corriente alterna, con intervalos de tiempo en los que no fluye corriente, cada pulso dura medio ciclo, lo que resulta en una corriente que fluye en una sola dirección. Tiene un valor de densidad de flujo de cero en el centro de la pieza inspeccionada, y se incrementa hasta que alcanza un valor máximo en la superficie, por lo que, la densidad de flujo en el interior de una pieza es mucho mayor empleándose en los ensayos para detectar discontinuidades bajo la superficie, aunque se podrá detectar también discontinuidades superficiales, pero no son tan eficaces como la corriente alterna para este último caso [3]:

✓ Corriente alterna con rectificación de onda completa

Utiliza una o tres fases que tiene la ventaja de producir un bajo amperaje de línea, mientras que el equipo de fase simple es más barato. Esta técnica es usualmente utilizada cuando el método residual va a ser utilizado.

✓ Corriente directa

La corriente directa es un flujo continuo de corriente en una sola dirección. Una fuente común de corriente directa es la batería o la pila normal. Su principal desventaja es debido a que las altas corrientes únicamente pueden ser mantenidas mientras la carga de la batería o pila es adecuada y, muchas veces, es necesario contar con el flujo de corriente durante intervalos de tiempo prolongados [3].

d) Tipos de defectos detectables

Hasta ahora, se ha hablado de que el método de ensayo por partículas magnéticas permite detectar las discontinuidades que generen un flujo de fuga magnético.

Una discontinuidad es una interrupción de la estructura física normal de la pieza, tal como una grieta, porosidad, entre otras. Una discontinuidad puede afectar o no a la utilidad de la pieza.

Un defecto es una discontinuidad que interfiere con la utilidad que se pretende dar a la pieza, por lo que no todas las discontinuidades son defectos.

Además, la definición de defecto depende del tipo de pieza, de su construcción, del tipo de material, así como de las especificaciones o normas que le apliquen. Por ello, una discontinuidad sin importancia para una pieza puede ser un defecto muy importante en otro tipo de objeto.

Con el método de ensayo de, partículas magnéticas se podrán detectar aquellas discontinuidades que por su localización, orientación y profundidad, tamaño, originan un flujo de fuga magnético. Este flujo magnético atraerá las partículas magnéticas, dando lugar a indicaciones.

Una indicación es una acumulación de partículas magnéticas que sirve como evidencia de la existencia de un campo de fuga y requiere de una interpretación para determinar su significado. Las indicaciones se pueden clasificar en verdaderas y falsas.

Antes de definir las indicaciones falsas y verdaderas (relevantes y no relevantes), hacemos notar que, en función de la bibliografía empleada, se puede pensar que existen discrepancias en las definiciones que aparecen en distintos códigos y libros de consulta.

Se definen las falsas indicaciones como aquellas que aun respondiendo a la presencia de campos de fuga, no son reflejo de una heterogeneidad o discontinuidad del material.

Así, serían falsas indicaciones aquellas originadas a raíz de la escritura magnética, sobremagnetización, deformaciones en frío, materiales con tamaño de grano muy basto, uniones de materiales con distintas permeabilidades magnéticas, entre otras [4].

✓ Sobremagnetización

Es, quizá, la causa más frecuente de aparición de indicaciones falsas. Si el campo magnético es suficientemente intenso, puede dar lugar a acumulaciones de partículas en cambios de sección o en el extremo de piezas magnetizadas longitudinalmente. Las indicaciones en zonas con acuerdos precisan de una interpretación muy cuidadosa, ya que, por un lado, son realmente zonas propicias a la aparición de grietas y, por otro, su simple configuración geométrica da lugar a campos de fuga que pueden originar indicaciones falsas.

En estos casos se puede hacer una correcta interpretación de tales indicaciones falsas, ya que:

- En iguales condiciones de magnetización, todas las piezas iguales darán indicaciones en el mismo sitio.
- Las indicaciones siempre se pueden relacionar con características constructivas o geométricas de la pieza, que dan lugar a la aparición de campos de fuga originados por el flujo magnético en su recorrido a través del material.
- Estas indicaciones rara vez presentan apariencia similar a las reales para un observador experimentado. Este problema se resuelve, generalmente, disminuyendo la intensidad del campo magnético hasta la desaparición de las indicaciones falsas. En el caso de existir una discontinuidad o grieta, la constricción de las líneas de fuerza es suficiente para dar lugar a un campo de fuga y a la consiguiente formación de una indicación propia de la discontinuidad o grieta.

✓ Escritura magnética

Otra causa de aparición de indicaciones falsas, es la creación de polos locales surgidos del contacto entre una pieza endurecida y otra pieza magnetizada, o bien entre dos piezas magnetizadas a distinto nivel. Este tipo de indicaciones no suele causar problemas de interpretación, dada su peculiar configuración y apariencia. Además, si se desmagnetiza la pieza y se vuelve a ensayar, las indicaciones ya no aparecen [4].

e) Discontinuidades típicas en soldadura

En los procesos de soldadura se pueden generar varias discontinuidades típicas a continuación, se detallan los más comunes:

- ✓ Porosidades: Son la existencia de cavidades dentro del material de aporte, generalmente son esféricas, pero también pueden ser alargadas y se suelen presentar agrupadas (ver, Fig. 1.6).



Fig. 1.6. Porosidades en soldadura [5].

- ✓ Inclusiones de Escoria: Son materiales no metálicos atrapados en el metal de aporte, usualmente se presentan en la soldadura por arco producto de una falta de limpieza entre pases (ver, Fig. 1.7).

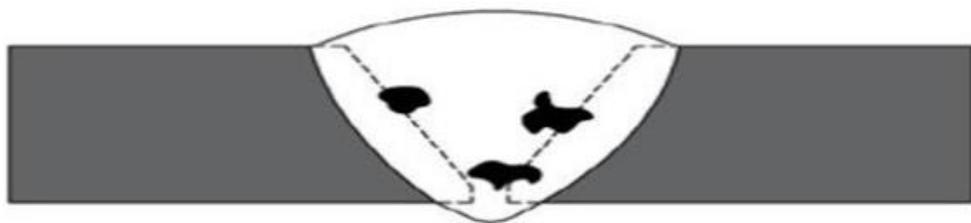


Fig. 1.7. Inclusiones de escoria [5].

- ✓ Fusión incompleta o falta de Fusión: Este tipo de discontinuidad ocurre cuando no existió fusión entre el metal de aporte y el metal base de la pieza, o a su vez los cordones de soldadura adyacentes (ver, Fig. 1.8).



Fig. 1.8. Fusi3n incompleta [5].

- ✓ Falta de penetraci3n: Se diferencia de la falta de fusi3n por su forma f3sica, el cord3n no cubre por completo la ra3z del metal base (ver, Fig. 1.9).



Fig. 1.9. Penetraci3n incompleta [5].

- ✓ Fisuras o grietas: Son definidas como discontinuidades de tipo lineal, son m3s largas que anchas, y de acuerdo a su posici3n se clasifican como

longitudinales, transversales o internas, además se consideran como un defecto grave debido a su posible crecimiento cuando son sometidos a esfuerzos, la mayoría de códigos y normas rechazan este tipo de discontinuidad sin importar su longitud (ver, Fig. 1.10).



Fig. 1.10. Fisura [5].

- ✓ Socavaduras: Este tipo de discontinuidades ocurren cuando el plasma del arco a soldar remueve más metal de la cara de unión del que reemplaza con metal de aporte (ver, Fig. 1.11).



Fig. 1.11. Socavadura [5].

- ✓ Tamaños y perfiles incorrectos: Los distintos códigos y normas utilizados en la industria establecen las dimensiones y tolerancias permisibles para los tamaños y perfiles de soldadura, con los cuales el inspector tiene una guía numérica y gráfica para emitir un criterio de aceptación o rechazo para este tipo de defectos (ver, Fig. 1.12).

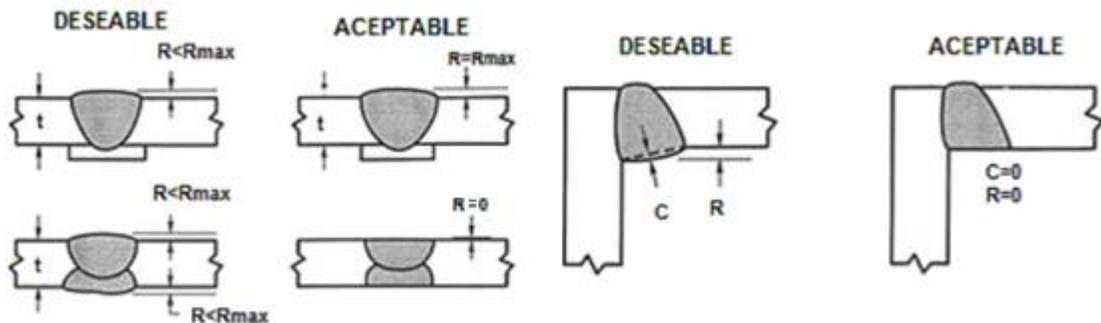


Fig. 1.12. Tamaños y perfiles de soldadura [5].

A continuación, se hará una breve explicación referente al tipo de materiales en los que se puede utilizar este ensayo, anteriormente se había mencionado los de naturaleza ferromagnética, pero se profundizará un poco más al respecto.

### **1.2.3. MATERIALES PARAMAGNÉTICOS**

Todo tipo de material está compuesto por átomos, que unidos se encargan de que la materia exista como tal; estos a su vez están constituidos por protones, electrones y neutrones; es muy importante tener claro estas acotaciones, porque de ellos dependerán las propiedades magnéticas de cada tipo de material. Es importante acotar que, los electrones que se encuentran en las capas incompletas (electrones de valencia) son los que contribuyen al momento magnético, debido a que en las capas electrónicas de los átomos el momento magnético de orbital y en el spin es nulo.

Como la mayoría de los átomos tienen capas incompletas, también tendrán un momento magnético no nulo. Pero esto sólo es posible en átomos libres y no para átomos situados en una red cristalina, los cuales se encuentran ligados entre sí por fuerzas de enlace. La razón es que la energía de intercambio de los electrones de átomos vecinos es normalmente mínima cuando sus spines están dispuestos de forma anti-paralela y de ahí que el momento dipolar total de la molécula sea nulo [6].

En los metales se origina el comportamiento paramagnético debido a los electrones que se encargan de la conducción interna de los mismos; por ende, no importa la temperatura a la cual se someta, no existe un grado de susceptibilidad que afecte el paramagnetismo en los materiales de metal. Los

ensayos de partículas magnéticas se utilizan en aquellos que tengan compuestos de hierro o de los compuestos denominados como “tierras raras”.

#### 1.2.4. MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

Los materiales ferromagnéticos disponen de las siguientes características:

- Existe una imanación espontanea de nombre “M”, que aparece sin la necesidad de que exista un campo magnético externo.
- La imanación espontanea es dependiente de la temperatura, cuando este valor se encuentra a 0 K, se podría destacar que M está en su máximo nivel; a medida que la temperatura aumenta se va reduciendo llegando a ser nula justo en el momento que la temperatura alcance el nivel de Curie ferromagnética.
- Cuando la temperatura sea mayor que el nivel de temperatura de Curie, existe una transición ferromagnética - paramagnética que presenta una susceptibilidad en la sección de paramagnetismo representada por la Ec. 1.1, así:

$$X = \frac{C}{(T - T_c)} \quad (1.1)$$

donde:

X no se encuentra definida para cuando la temperatura es menor que la de Curie, y es justo el momento en que se presenta la imantación espontanea.

- La imanación espontanea no tiene el mismo volumen en toda la superficie del material ferromagnético, por lo que existen pequeñas zonas en que la dirección es uniforme, denominados como dominios magnéticos y se encuentran ubicados al azar.
- Los únicos elementos ferromagnéticos que existen son el cobalto (Co), hierro (Fe), níquel (Ni), gadolinio (Gd) y el disprosio (Dy).

Para este tipo de materiales y cuando la temperatura es menor que la de Curie los momentos magnéticos se encuentran alineados a un nivel microscópico, pero a una escala más amplia se considera bajo o nulo; por lo que es necesario implementar un campo magnético externo, muy eficaz para estructuras que están compuestas que en su mayoría tienen internamente monocristales y aquellas que tengan muestras policristalinas. En la Fig. 2.2 se presentan las diferentes direcciones de los momentos magnéticos que se pueden encontrar en un material ferromagnético.

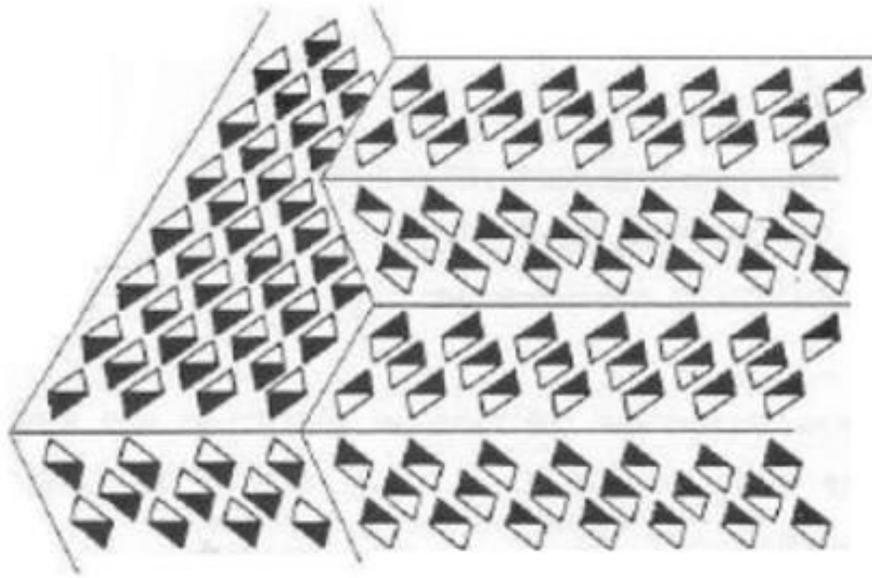


Fig. 1.13. Dominios magnéticos con imitación de saturación en direcciones distantes en un material ferromagnético [6].

Cuando estos materiales se someten a un campo magnético externo, la imitación aumenta y, lo hace en dos formas diferentes, por aumento de los dominios favorables con orientación hacia el campo magnético externo y por rotación de la dirección de imitación en dirección del campo externo, en la Fig. 2.3 se puede observar cada uno de los casos respectivamente.

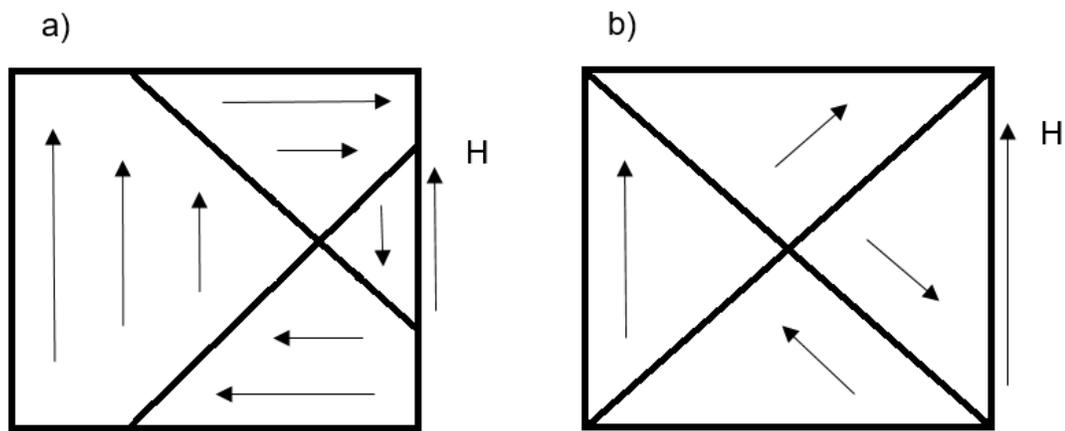


Fig. 1.14. Imantación por: a) Crecimiento de dominios; y b) rotación [6].

### 1.2.5. APLICACIONES

Las principales aplicaciones industriales de Partículas Magnéticas son la inspección final, inspección de recepción, inspección de procesados y control de calidad, mantenimiento e inspecciones de reparación en la industria del transporte, mantenimiento de plante y máquinas e inspección de grandes componentes. Aun cuando, la inspección con Partículas Magnéticas sea aplicada para detectar discontinuidades e imperfecciones en piezas y materiales tan pronto como sea posible en la secuencia de operación, la inspección final es necesaria para asegurar que no se han producido durante el proceso discontinuidades o imperfecciones. La inspección de recepción de material también se realiza sobre materias primas y piezas semideterminadas para detectar cualquier material defectuoso. Es ampliamente usada la recepción de barras o varillas, forjados y fundiciones.

En la industria del transporte (camiones, vías férreas y aviones) se planifica la inspección de las partes críticas en busca de fisuras [4].

### **1.3. VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL ENSAYO CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Así como los demás ensayos no destructivos para detectar discontinuidades, el ensayo con partículas magnéticas tiene sus propias ventajas y limitaciones, las cuales se deben mantener en consideración al momento de realizarlo.

#### **1.3.1. VENTAJAS**

Las ventajas principales del ensayo por Partículas Magnéticas son las siguientes:

- Inspección relativamente rápida y de bajo costo.
- Equipo relativamente simple, provisto de controles utilizados para ajustar la corriente y un amperímetro para verificar la intensidad del campo magnético que ha sido creado para la inspección.
- Equipo portátil y adaptable a muestras pequeñas o grandes.
- Se requiere menor limpieza que en líquidos penetrantes.
- Se pueden detectar discontinuidades con una profundidad cercana a la superficie.
- Las indicaciones se forman directamente en la superficie de la muestra.

- No se requiere de lecturas electrónicas de calibración o mantenimiento excesivo.
- Se obtienen mejores resultados en la detección de discontinuidades llenas de algún contaminante (escoria) y que no pueden ser detectadas en una inspección por líquidos penetrantes [3].

### **1.3.2. LIMITACIONES**

Se enumeran a continuación, las limitaciones del ensayo por Partículas Magnéticas:

- Aplicable solamente en materiales ferromagnéticos.
- Requiere un suministro de corriente eléctrica.
- No se pueden detectar discontinuidades localizadas a grandes profundidades.
- Aplicación en el campo es de mayor costo, ya que se necesita suministro de energía eléctrica.
- Rugosidad superficial puede distorsionar el campo.
- Se requiere realizar dos o más magnetizaciones.
- Generalmente, es necesario desmagnetizar después de la inspección.
- Aunque las indicaciones son fácilmente observables, la experiencia para su interpretación y evaluación es necesaria.

- Capas de pintura o de algún otro recubrimiento no magnético afectan la sensibilidad del método [3].

#### **1.4. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

El procedimiento para llevar a cabo esta prueba no destructiva, consta de los siguientes pasos:

- a) Pre-limpieza y secado de la pieza de prueba: Consiste en eliminar grasas, aceites, herrumbre y otros contaminantes de la superficie de prueba, con solventes, agentes lavables, agua, detergentes, vapor, removedores o ultrasonido.
- b) Establecimiento de un campo circular: Consiste en pasar una corriente longitudinalmente a través del conductor central. Si una grieta cruza el flujo circular de inmediato se crean los polos norte y sur en la discontinuidad, y las partículas magnéticas aplicadas serán atraídas por este flujo magnético, tal como se presenta en la Fig. 1.15.
- c) Inspección de indicaciones longitudinales: Es el examen visual, interpretación y evaluación de las indicaciones longitudinales de la pieza de prueba. Requiere de iluminación con luz negra.
- d) Desmagnetización (opcional): Es la reducción del magnetismo residual a un nivel aceptable para que no interfiera en los procesos adicionales o servicios de limpieza. Esta se realiza por fuerza a través de presión o vibración, exposición a altas temperaturas o exposición a un campo magnético

adicional. Para desmagnetizar la pieza, se debe aplicar un campo magnético alternante, cuya intensidad se debe reducir progresivamente hasta cero.

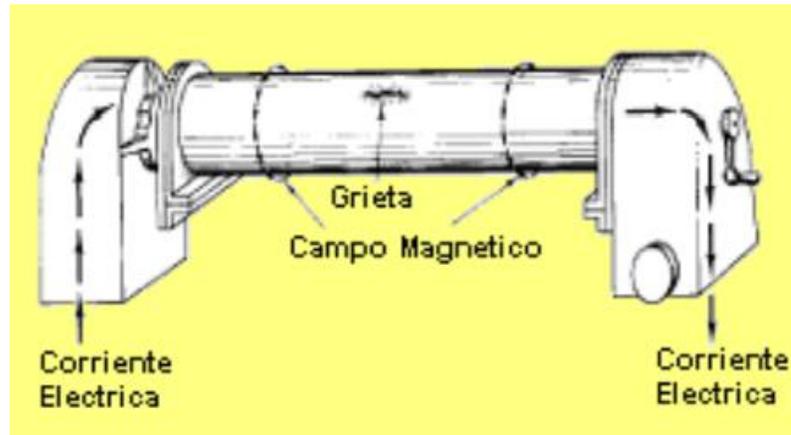


Fig. 1.15. Métodos de magnetización circular.

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

- e) Establecimiento de un campo magnético longitudinal: Consiste en crear un campo magnético a lo largo de pieza magnética con polos norte y sur, por los cuales sale y entra el flujo magnético. Si las líneas del campo magnético son interrumpidas por una discontinuidad, se forman polos adicionales norte y sur, los cuales atraen a las partículas magnéticas aplicadas, tal como se presenta en la Fig. 1.16.

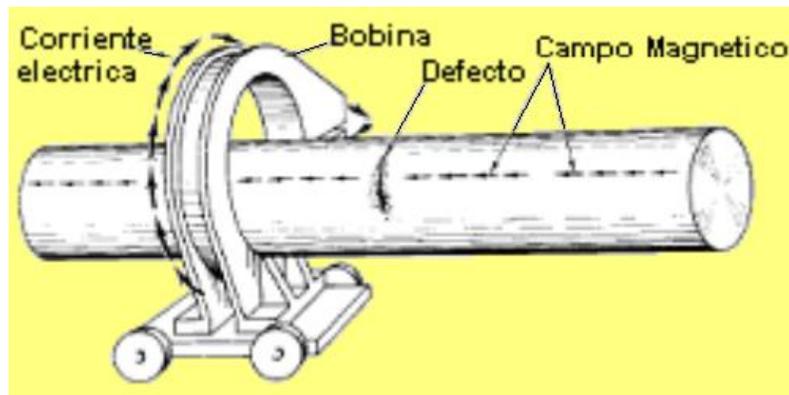


Fig. 1.16. Métodos de magnetización longitudinal.

- f) Inspección de indicaciones transversales: Es el examen visual, interpretación y evaluación de las indicaciones transversales de la pieza de prueba. Requiere de luz negra.
- g) Desmagnetización final (opcional)
- h) Post-limpieza: Es la remoción de partículas magnéticas que quedan en la pieza de prueba para prevenir la corrosión, esta se puede realizar por cualquier método apropiado [2].

A partir de la información bibliográfica recopilada en este capítulo correspondiente a los fundamentos en que se basa el ensayo no destructivo por partículas magnéticas, se continuará con la propuesta de normativa en el segundo capítulo.

## **2. DISEÑO DE LA PROPUESTA DE NORMATIVA PARA EL ENSAYO NO DESTRUCTIVO MEDIANTE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Una vez realizada la introducción teórica acerca del ensayo de partículas magnéticas, se ha llegado el momento de implementar una normativa que mediante la aplicación de lo visto anteriormente, permita establecer los principios bajo los cuales se deben regir las personas que se destinen a su utilización dentro del laboratorios del Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de esta Escuela. Se debe tener en consideración que, el desarrollo de una normativa que busque la estandarización de este ensayo es un procedimiento que consta de una sistematización progresiva de la investigación; es decir, que se debe someter siempre a evaluaciones y mejoramientos desde la base que se busca definir con este trabajo de graduación.

Generalmente, el ensayo de partículas magnéticas enfoca su procedimiento en la fuga de flujo magnético (MFL), sin embargo este enfoque presenta dificultades de hallazgo, debido a que en las estructuras geométricas de aeronaves u otras invenciones no se cumple del todo en encontrar discontinuidades, por ello es más recomendable utilizar el método de perturbación permanente del campo magnético (PMFP) cuyo principio se presenta en la Fig. 2.1.

Este método permite determinar la presencia o ausencia de las discontinuidades en el material por medio de los cambios en la condición de contorno magnético que se producen debido a las discontinuidades geométricas en el material ferromagnético. Lo que mejora la aplicación en partes como soportes instalados en la raíz de plano, alojamiento de trenes y patín de cola de aeronaves [6].

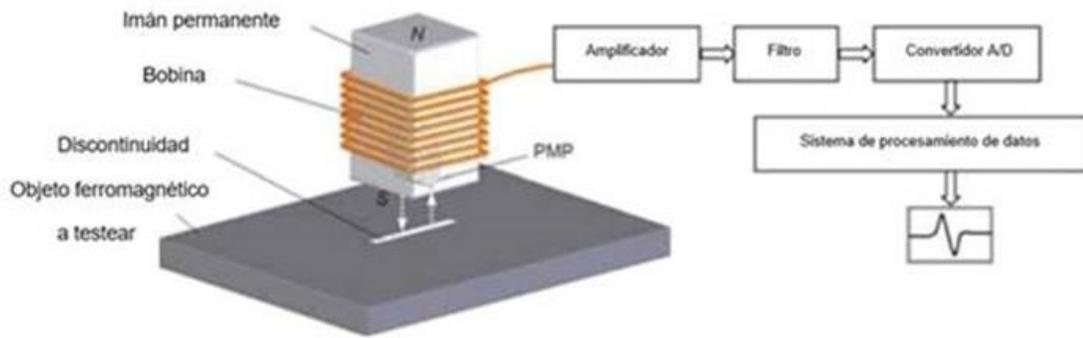


Fig. 2.1. Esquema del sistema de perturbación permanente del campo magnético [6].

La orientación hacia este enfoque, facilita en gran forma el encontrar problemas de grietas en el que el análisis de la fuga del flujo magnético no ofrece resultados exactos, a diferencia del análisis por perturbación permanente, que si garantiza los hallazgos sin importar la orientación que estas tengan en la estructura

Ahora, es momento de establecer los principios bajo los cuales se realizará el diseño de la normativa que será utilizada para implementar este tipo de ensayos dentro del laboratorio de la universidad, basándose en la utilización de del ensayo no destructivo mediante partículas magnéticas vía húmeda, con la finalidad de encontrar discontinuidades que afecten las áreas superficiales y subsuperficiales, que afecten a los materiales ferromagnéticos, esta inspección se puede aplicar como control de calidad a todas las piezas que se dispongan para identificar posibles defectos en la estructura.

## 2.1. MATERIALES Y EQUIPOS

A continuación se presenta una lista con los materiales y equipos que se utilizan en el ensayo no destructivo mediante partículas magnéticas:

- Yugo electromagnético de corriente alterna.
- Banco de partículas magnéticas, el equipo debe contar con un amperímetro que se encuentre bien calibrado acorde con la normativa DE LA ASTM DESIGNACIÓN E 1444.
- Unidad horizontal de banco estático de partículas magnéticas, apropiada para utilizar partículas húmedas fluorescentes, instalada en un cuarto oscuro, que tendrá un sistema de recirculación continua, que permita mantener la adecuada agitación de las partículas magnéticas y en forma óptima la aplicación del baño a través de rociado [6].
- Partículas húmedas fluorescentes que, deben cumplir con las normativas AMS 3041, AMS 3042, AMS 3043, AMS 3044, AMS 3045 o AMS 3046 con alta permeabilidad para permitir la correcta magnetización y la atracción hacia la discontinuidad con baja memoria para evitar aglomeraciones de partículas magnéticas. No deben ser tóxicas ni presentar revestimientos como pintura, óxido o incluso polvo. Se debe disponer de dos tipos de partículas, unas húmedas en aerosol y fluorescentes Magnaglo 14. La concentración de las mismas se debe encontrar en el intervalo de 0.1 a 0.4 ml en 100 ml de muestra; estos parámetros se encuentran establecidos en las normativas DE LA ASTM DESIGNACIÓN E 1444.
- Indicadores de campo magnético, en la Tabla 2.1 se presenta los diferentes tipos de campo magnético que existen.

- Tubo centrífugo para determinar el nivel de concentración de las partículas húmedas fluorescentes.
- Fuente de luz negra.
- Medidores de luz negra.
- Desmagnetizador.

Tabla 2.1. Indicadores de campo magnético para la adición de partículas magnéticas [6].

Indicador de Campo Magnético Circular	Indica la dirección del flujo del campo magnético externo
Campo Magnético Residual	Indica la fuerza residual del campo magnético de la pieza a inspeccionar de $\pm 1.5$ gauss por división o menor, con un rango total de escala de -10 a +10 gauss
Efecto Hall	Mide la fuerza del campo magnético que se genere en magnetización circular (conductor por cabezotes) y magnetización longitudinal (bobina). Valores en un rango de 30 a 90 Gauss (2.4 a 4.8 kA/m)
Calidad cuantitativa y bloque Patrón (QQI)	Indica discontinuidades y la sensibilidad de las partículas magnéticas.

## **2.2. NORMATIVAS EMPLEADAS**

Con la descripción ya realizada de los equipos a utilizar, es momento de identificar bajo que normativas se debe basar el ensayo no destructivo mediante partículas magnéticas, las cuales se basan en las normas de la ASTM:

- NORMA DE LA ASTM DESIGNACIÓN E 1444. Práctica estándar para el examen de partículas magnéticas.

A continuación, se realiza una breve descripción de las normativas en las que se establece el procedimiento con normas internacionales.

### **2.2.1. NORMA DE LA ASTM DESIGNACIÓN E 1444. PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA EL EXAMEN DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Las secciones que se escriben a continuación son las indicadas en esta norma para la aplicación del ensayo no destructivo mediante partículas magnéticas:

#### **A) Requisitos de aceptación**

Los requisitos de aceptación aplicables a la parte o grupo de partes serán incorporados en el procedimiento escrito ya sea específicamente o por referencia a otros documentos aplicables, como MIL STD-1907, que contienen la información necesaria a ser aplicada. Los dibujos u otros documentos se deberán especificar el tamaño de aceptación y concentración

de discontinuidades para el componente, con zonificación de áreas únicas según lo requieran los requisitos de diseño.

Estos requisitos de aceptación serán los aprobados en o como especificado por la agencia contratante como los métodos para establecer los requisitos de aceptación para piezas; los requisitos para las piezas forjadas de acero se tratan en el Método de prueba A 275. Los métodos para clasificar las piezas de fundición de metal son dados en MIL-STD-2175 y AMS 5355. MIL-STD-1907 proporciona un esquema de clasificación para metales forjados ferromagnéticos, fundiciones, extrusiones y soldaduras.

## **B) Cualificación del personal**

El personal que realice exámenes de acuerdo con esta práctica deberá estar cualificado y certificado de acuerdo con la Cualificación del personal de ASNT SNT-TC-1A o MIL-STD-410 para fines militares, o como sea especificado para las aplicaciones que sean requeridas.

## **C) Procedimiento escrito**

Se realizará de acuerdo con un procedimiento escrito aplicable a las partes o grupo de partes sometidas a prueba. El procedimiento debe estar de acuerdo con los requisitos y directrices de esta práctica. El procedimiento deberá ser capaz de detectar las discontinuidades rechazables más pequeñas especificadas en los requisitos de aceptación.

El procedimiento escrito puede ser general si se aplica claramente a todas las partes especificadas que se están probando y cumple con los requisitos de esta práctica. Todos estos pasos, se deben aprobar por una persona calificada y certificado en el nivel III para el examen de partículas

magnéticas de acuerdo con la cualificación del personal; los procedimientos se someterán a la agencia contratante cuando se solicite. El procedimiento escrito debe incluir al menos los siguientes elementos, ya sea directamente o por referencia a los documentos aplicables:

- ✓ Número de identificación del procedimiento y fecha en que se ha escrito.
- ✓ Identificación de las partes a las que se aplica el procedimiento. Esto incluirá el material y la aleación por intermedio de los cuales se fabrican las piezas.
- ✓ Secuencia del examen de partículas magnéticas en relación con la operación del proceso de fabricación, si corresponde.
- ✓ Identificación de las piezas de prueba utilizadas para la verificación del rendimiento del sistema.
- ✓ Áreas de la pieza a examinar (incluir una ilustración, ya sea un boceto o una foto).
- ✓ Preparación de la pieza requerida antes de la prueba.
- ✓ Instrucciones para colocar el artículo con respecto al equipo de magnetización.
- ✓ El tipo de corriente magnetizante y el equipo para ser utilizado.
- ✓ Método para establecer la magnetización (cabeza, bobina, puntas, horquilla, envoltura de cable, etc.).
- ✓ Direcciones de magnetización que se utilizarán, el orden en que se aplican, y cualquier procedimiento de desmagnetización a ser utilizado entre disparos.
- ✓ El nivel actual, o el número de amperios vueltas, a ser utilizado y la duración de su aplicación.

- ✓ Tipo de material de partículas magnéticas (seco o húmedo, visible o fluorescente, etc.) que se utilizará y el método y equipo a utilizar para su aplicación y, para el caso de que las partículas sean húmedas, los límites de concentración de partículas.
- ✓ Tipo de registros y método de marcado de partes después de realizado el ensayo.

#### **D) Secuencia de ensayo**

Cuando se especifica el examen de partículas magnéticas, se debe realizar después de completar las operaciones cuales serían los posibles defectos que causan el daño en la superficie o cerca de la superficie. Estas operaciones incluyen, entre otras, forjado, tratamiento térmico, enchapado, pasivado, conformado en frío, soldadura, rectificado, enderezado, mecanizado y carga de prueba. Además, las partes que reciban un tratamiento térmico, éstos se deben efectuar hasta una resistencia máxima a la tracción de 180 ksi o superior, y posteriormente galvanizados; para que sean inspeccionados luego por personal cualificado.

#### **E) Registro de ensayo**

Se registrarán todos los resultados de los ensayos de las inspecciones por partículas magnéticas. Todos estos deben ser registrados, identificados, archivado y puesto a disposición para su revisión por parte del personal capacitado. Los registros deberán prever trazabilidad a la pieza o lote específico inspeccionado y, los procedimientos utilizados en la inspección, el tamaño del lote, así como también el número de piezas que han aprobado el ensayo.

## F) Iluminación

A continuación, se lista los diferentes tipos de iluminaciones:

- ✓ **Luz visible:** Se debe usar luz visible cuando se examina con partículas no fluorescentes. La intensidad de la luz en la superficie de la pieza sometida a examen debe ser mantenido a un mínimo de 100 fc (1000 lx).
- ✓ **Luz ambiental visible:** A menos que se especifique lo contrario, se realizarán exámenes con partículas magnéticas fluorescentes en un área oscura con un nivel máximo de luz visible ambiental de 2 fc (20 lx) medidos en la superficie de la pieza.
- ✓ **Fuente de luz interna visible especial:** Cuando se deben realizar exámenes de superficies internas utilizando fuentes de luz visible, la imagen producida debe tener suficiente resolución para evaluar eficazmente las discontinuidades requeridas.
- ✓ **Luces negras:** Todas las luces negras se verificarán en los intervalos especificados en la Tabla 2.2. El mínimo aceptable en cuanto a la intensidad es de  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  en la parte que se está examinando. Los reflectores de luz y los filtros se revisarán diariamente para verificar su limpieza e integridad. Los reflectores o filtros que estén dañados o sucios se deben reemplazar o corregir de otra manera según corresponda.
- ✓ **Examen de la parte interna:** Cuando las lámparas sean físicamente demasiado grandes para iluminar directamente la superficie del ensayo, se utilizará iluminación especial. Características internas como taladros, orificios y pasajes de menos de 12.5 mm (0.5 pulg) de diámetro no requerirá un examen de partículas magnéticas.

## G) Materiales

Los requisitos que deben cumplir los materiales son los siguientes:

- ✓ **Requisitos de partículas secas:** Las partículas secas deben cumplir los requisitos de la AMS 3040. Al aplicar la AMS 3040, las partículas deben presentar las indicaciones que se enumeran en la Tabla 2.3 utilizando el método de anillo de la Fig. 2.2 utilizando el siguiente procedimiento:
  - ✓ Colocar un conductor con un diámetro entre 25 y 31 mm (1 y 1.25 pulg) y una longitud superior a 40 cm (16 pulg) a través del centro del anillo. Centre el anillo en la longitud del conductor.
  - ✓ Magnetizar el anillo de forma circular pasando la corriente especificada en la Tabla 2.3 a través del conductor. Apretando el bulbo u otro aplicador adecuado.
  - ✓ Aplicar las partículas a la superficie del anillo mientras fluye la corriente. Examinar el anillo dentro de 1 minuto después de la aplicación actual bajo una luz visible de no menos de 100 fc (1000 lx). Las indicaciones deben cumplir o superar las especificadas en la Tabla 2.3.
- ✓ **Requisitos de partículas húmedas:** Las partículas húmedas deben cumplir los requisitos de AMS 3041, 3042, 3043, 3044, 3045 o 3046, según corresponda. Al aplicar estas especificaciones, las partículas deben presentar las indicaciones que se enumeran en la Tabla 2.3 en el ensayo. Gran parte debe estar magnetizada en al menos dos direcciones a la derecha y ángulos entre sí. Dependiendo de la geometría de la pieza, se puede utilizar la magnetización circular en dos o más direcciones, e incluso longitudinal.
- ✓ **Magnetización Multidireccional:** La magnetización se puede utilizar para cumplir con el requisito de magnetización en dos direcciones si se demuestra que es eficaz en todas las áreas críticas. Defectos artificiales

que están grabados o maquinado, como se presenta por un dispositivo igual a la Fig. 2.3, se puede utilizar para establecer la dirección del campo. Es de vital importancia que la intensidad del campo se equilibre en todas las direcciones de modo que una dirección no abrume a otra dirección. Al usar este método, la aplicación de partículas se debe cronometrar para que la magnetización pueda alcanzar su valor total en todas las direcciones durante el tiempo que las partículas son móviles en la superficie bajo prueba.

- ✓ **Magnetización directa:** La magnetización directa se logra pasando corriente directamente a través de la pieza que este bajo pruebas. El contacto eléctrico se realiza con la pieza mediante el cabezal y cola, picanas, pinzas, sanguijuelas magnéticas o por otros medios. Se deben tomar precauciones para asegurar que la corriente eléctrica no fluya mientras se aplican o quitan los contactos y que no se produzca un calentamiento excesivo en el área de contacto.
- ✓ **Magnetización indirecta:** Utiliza bobinas preformadas, envolturas de cables, yugos, accesorios de flujo de campo o un conductor central para producir un campo magnético de fuerza y dirección adecuada para magnetizar la pieza bajo prueba.
- ✓ **Magnetización de corriente inducida:** La magnetización (campo toroidal o circunferencial) se logra acoplado inductivamente una pieza a una bobina eléctrica para crear un flujo de corriente adecuado en la pieza como se presenta en la Fig. 2.4. Este método es a menudo ventajoso en piezas en forma de anillo con un de apertura central y con una relación L/D menor que tres, especialmente donde la eliminación de arcos o quemaduras es de vital importancia.

## H) Intensidad del campo magnético

Las condiciones a tomar en consideración con el campo magnético son las siguientes:

- ✓ **Fuerza del campo magnético:** El campo magnético aplicado debe tener la fuerza suficiente para producir indicaciones satisfactorias, pero no debe ser tan fuerte que cause el enmascaramiento de indicaciones relevantes por acumulaciones no relevantes de partículas magnéticas. Se debe además, incluir el tamaño, la forma y la permeabilidad del material de la pieza, la técnica de magnetización, el método de aplicación de partículas y el tipo y ubicación de las discontinuidades buscadas; porque todos estos factores determinan y afectan la intensidad del campo magnético, la cual puede ser determinada por la combinación de uno o inclusive la combinación de ciertos métodos como:
  - ✓ Al probar piezas que tengan defectos conocidos o artificiales del tipo, tamaño y ubicación especificados en los requisitos de aceptación.
  - ✓ Mediante el uso de un gausímetro de sonda de efecto Hall capaz de medir los valores máximos del campo tangente.

Cuando se utiliza un gausímetro de sonda de efecto Hall, las intensidades de campo tangenciales, medidas en la superficie de la pieza, están en el intervalo de 30 a 60 G (2.4 a 4.8 kAm - 1) los valores máximos son normalmente adecuados niveles de magnetización para el examen de partículas magnéticas. Además, es importante asegurar que existan intensidades de campo en este intervalo en todas las áreas a inspeccionar en la pieza:

- **Niveles de corriente de magnetización:** Los valores actuales dados son valores de corriente pico y se aplican directamente a corriente rectificadas de onda completa. Para otros tipos de corriente, el manual

del operador o el fabricante del equipo debe ser consultado para determinar qué factor de corrección, si corresponde, debe ser utilizado para convertir la lectura del medidor a corrientes picos equivalentes.

- **Niveles de corriente de los prods (electrodos):** Cuando se usan prods en un material de 19 mm (3/4 de pulg) de espesor o menos, se debe utilizar 90 a 115 A/pulg de espaciamiento de prods (3.5 a 4.5 A/mm). Para material mayor de 19 mm (3/4 pulg) de espesor, se debe utilizar un espaciamiento de prods de 100 a 125 A/pulg (4.0 a 5.0 A/mm). El espaciado de los prods no debe ser inferior a 50 mm (2 pulg) o superior a 200 mm (8 pulg). El ancho efectivo del campo de magnetización cuando se usan puntas es un cuarto del espaciado de los prods a cada lado de una línea a través los centros de producción.
- **Magnetización circular directa:** Al magnetizar pasando corriente directamente a través de la pieza, la corriente debe ser de 300 a 800 A/pulg del diámetro de la pieza (12 a 32 A/mm). El diámetro de la pieza será tomado como la mayor distancia entre dos puntos cualesquiera en la circunferencia exterior de la pieza. Las corrientes normalmente serán 500 A/pulg (20 A/mm) o menos, con las corrientes más altas (hasta 800 A/pulg) que se utiliza para inspeccionar inclusiones o para inspeccionar aleaciones de baja permeabilidad como aceros endurecidos por precipitación. Para pruebas utilizadas para localizar inclusiones en aceros endurecidos por precipitación, se pueden utilizar corrientes incluso más altas, hasta 40 A/mm (1000 A/pulg).
- **Magnetización circular del conductor central:** La magnetización se puede suministrar pasando corriente a través de un conductor que pasa por el interior de la pieza. El propósito de la prueba es inspeccionar las discontinuidades de la superficie en la superficie interior de la pieza. Si sólo el interior de la pieza es para ser

inspeccionado, el diámetro debe ser la mayor distancia entre dos puntos, separados 180° en la circunferencia interior.

Tabla 2.2. Intervalos de verificación requeridos [7].

Artículo	Tiempo máximo entre verificación
Iluminación:	
Intensidad de luz negra	1 día
Intensidad de luz ambiental	1 día
Intensidad de luz visible	1 día
Rendimiento del sistema utilizando la pieza de prueba o la muestra de anillo de la Fig. 2.4	1 día
Concentración de partículas húmedas	8 horas
Prueba de ruptura con agua	1 agua
Contaminación por partículas húmedas	1 semana
Verificación de calibración del equipo:	
Lectura cero del Gausímetro	Antes de usar
Precisión del Gausímetro	6 meses
Precisión del Amperímetro	6 meses
Control del temporizador	6 meses

Tabla 2.3. Indicaciones requeridas cuando se Utiliza el Método de anillo [7].

Partículas usadas	Amperaje del conductor central FWDC	Número mínimo de agujeros
Suspensión húmeda, fluorescente o no fluorescente	1400	3
	2500	5
	3400	6
Polvo seco	1400	4
	2500	6
	3400	7

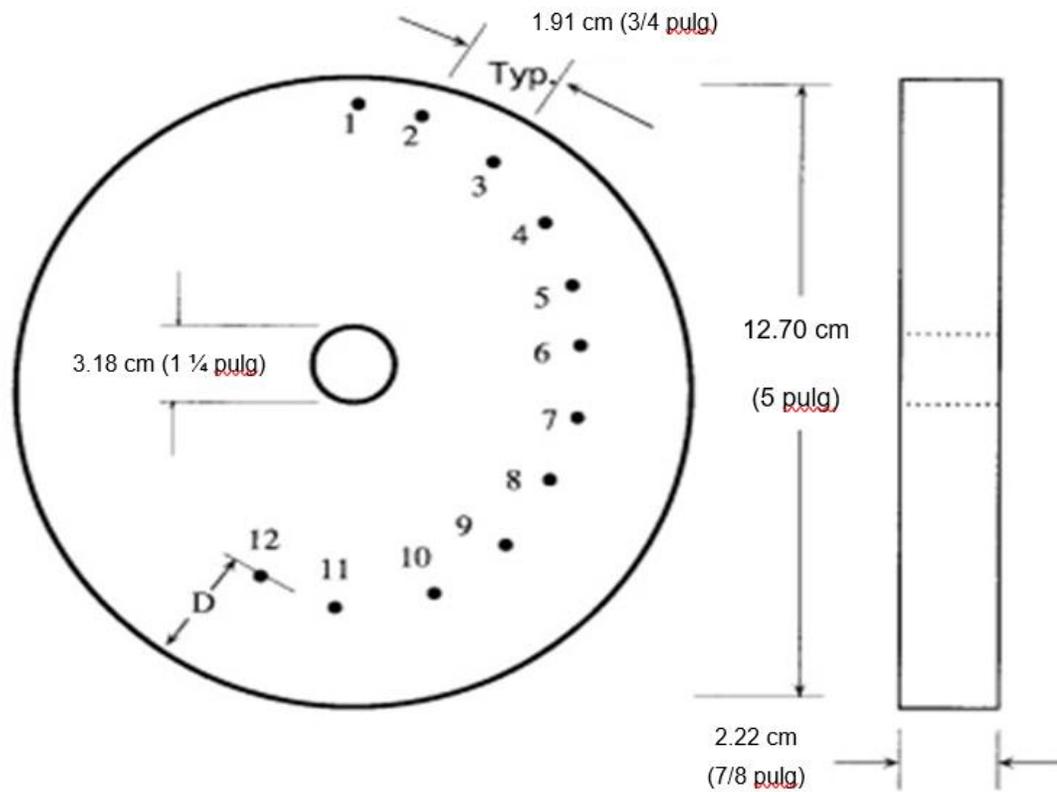


Fig. 2.2. ANSI KETOS Herramienta de anillo de hierro [7].

De la Fig. 2.2 se deben poner a consideración los siguientes aspectos:

- 1) Todos los diámetros de los orificios son de 1.75 mm. Los agujeros del 8 al 12 son opcionales.
- 2) Todas las dimensiones están en centímetros, excepto como se indica.
- 3) El material es acero para herramientas ANSI O1 de material redondo recocido.
- 4) El anillo se puede tratar térmicamente de la manera siguiente: Calentar entre 760 a 790 °C (1400 a 1450 °F). Mantener a esta temperatura durante 1 h. Enfriar a un ritmo máximo de 22 °C/h (40 °F/h) por debajo de 540 °C (1000 °F). Enfriar al aire hasta la temperatura ambiente.

En la Fig. 2.3 se presenta ejemplos de calzas artificiales utilizadas en partículas magnéticas con la finalidad de realizar la verificación del sistema de inspección, la cual no está dibujado a escala. Además, las calzas están construidas de acero con bajo contenido de carbono (acero SAE 1005). El defecto artificial está grabado o mecanizado en un lado de la hoja hasta una profundidad del 30% del espesor de la hoja. En uso, las calzas están firmemente unidas a la pieza de prueba (por Ej. con cinta alrededor de los bordes) con el defecto hacia la parte.

En la Fig. 2.4 se presenta a manera de ejemplo, como la corriente primaria establece un campo oscilante. Este campo magnético primario induce una corriente en el anillo o pieza conformada bajo prueba.

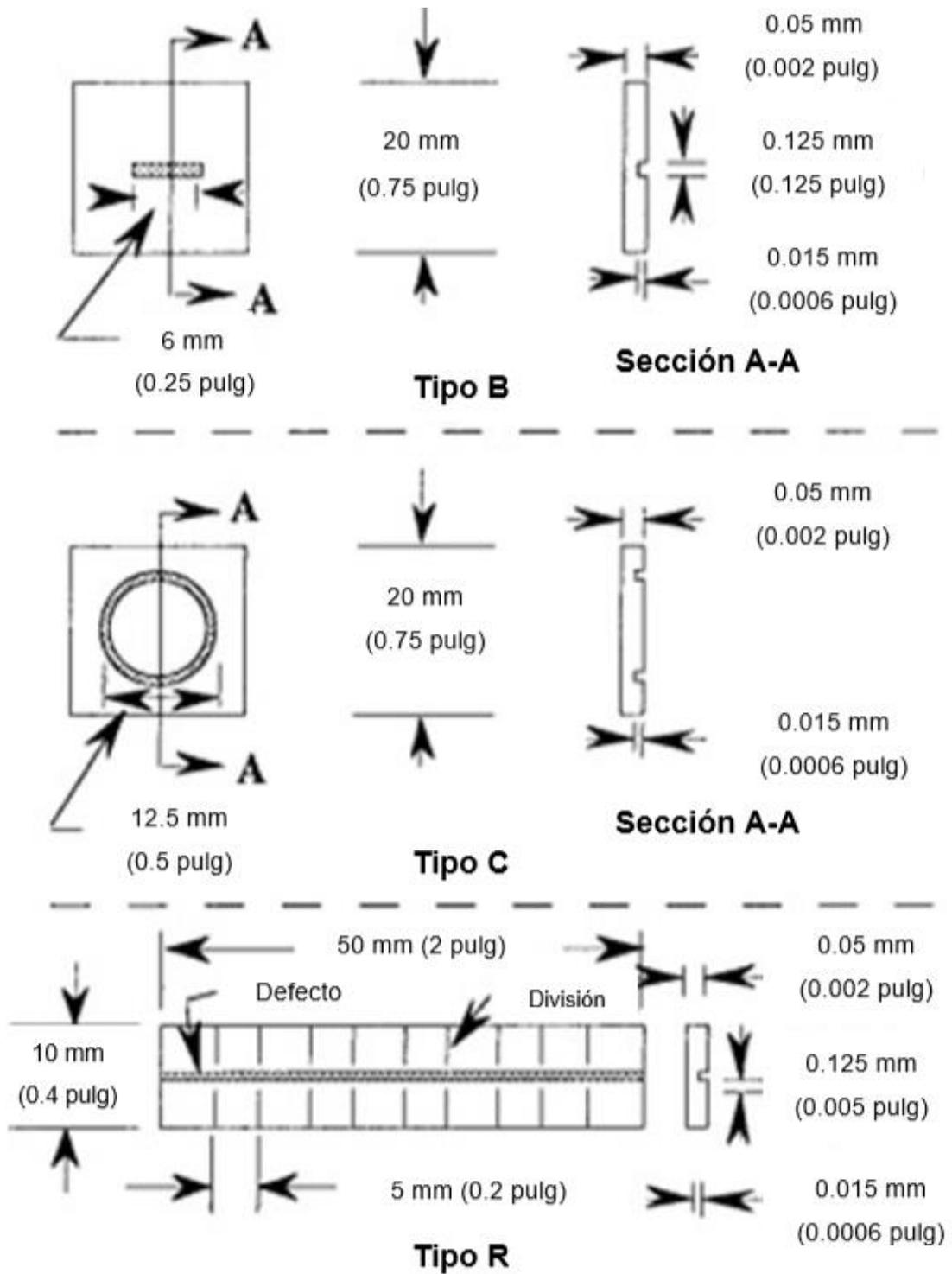


Fig. 2.3. Configuración de defectos artificiales y su designación [7].

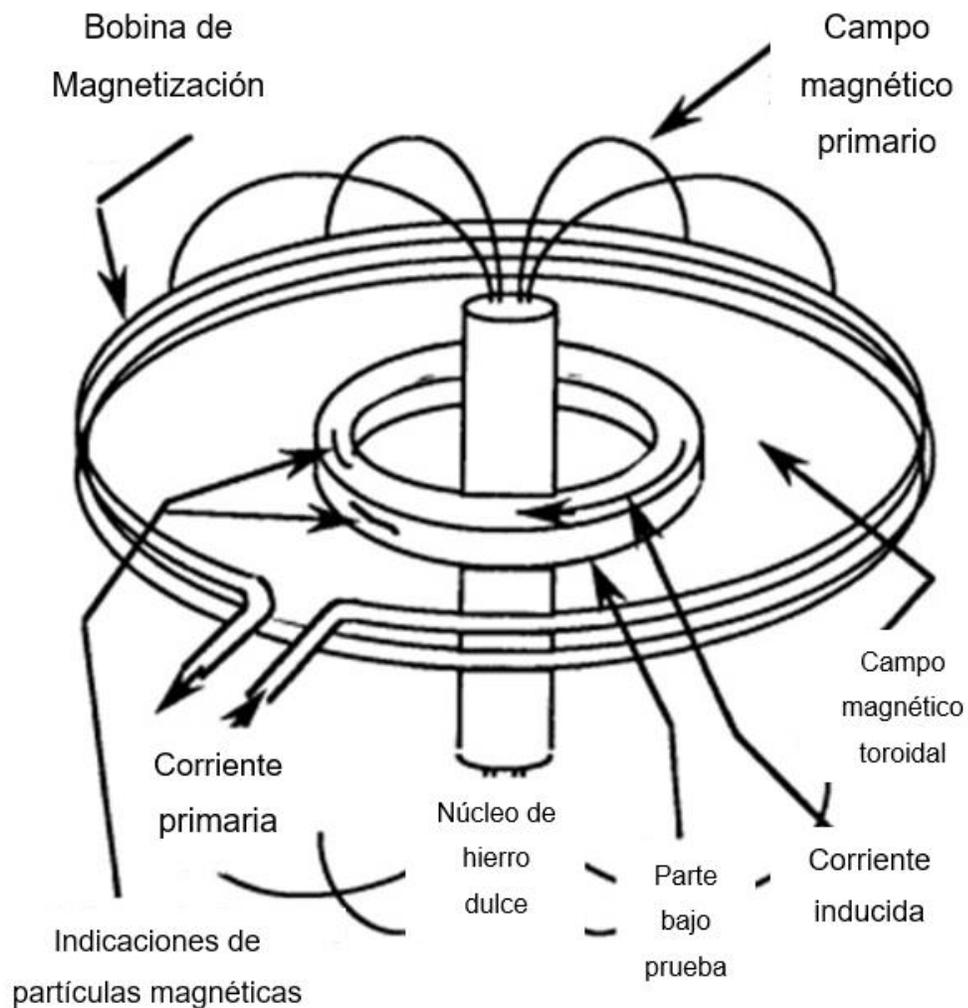


Fig. 2.4. Ejemplo de corriente inducida de magnetización [7].

De esta forma se desarrolló y se deja estipulado todas las normativas bajo las cuales se debe efectuar el ensayo no destructivo mediante partículas magnéticas, realizando sobre la base de los lineamientos estipulados en la norma de la ASTM designación E 1444, de donde se extrajeron los aspectos más relevantes con respecto al uso de las partículas en diferentes tipos de estructuras; aparte, se provee de una resolución a implementar a través de las pruebas a realizar en muestras de anillos de hierro. Por último, en las Figs. 2.5 – 2.7 se presenta la manera de cómo se identifican las grietas en las piezas metálicas con la aplicación de diferentes tipos de partículas magnéticas:



Fig. 2.5. Grieta visualizada a través de partículas secas rojas [8].



Fig. 2.6. Grieta visualizada mediante partículas negras húmedas [8].



Fig. 2.7. Comparativa entre partículas fluorescentes y visibles [8].

### **3. IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA DE NORMATIVA UTILIZADAS EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

En este capítulo se presenta un conjunto de situaciones con sus procesos en los que se realizó la inspección del material a través de los ensayos no destructivos por partículas magnéticas, acompañadas de su respectivo análisis de resultados, basadas en la propuesta de normativa anteriormente presentada.

#### **3.1. APLICACIONES DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Se presentan tres aplicaciones del ensayo no destructivo, bajo diferentes condiciones, como lo son: Aplicando campo residual, Magnetizando de forma directa y utilizando partículas fluorescentes; siempre utilizando la norma de la ASTM designación E-1444 y poniendo en práctica la Propuesta de Normativa.

##### **3.1.1. ENSAYO CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS APLICANDO CAMPO RESIDUAL**

En el primero de los casos se realiza el ensayo no destructivo de partículas magnéticas sobre una placa de acero; en éste se realizó la medición del campo a través de un medidor de campo residual, partículas magnéticas y un yugo magnético. De forma inicial, en este procedimiento se explica cómo se lleva a cabo un procedimiento normal de partículas magnéticas sobre un material magnético empleando como instrumento principal de sometimiento de campo un

yugo, la medida de este campo será realizada a través del medidor de campo residual. Así, el procedimiento es el siguiente:

- A) Se inicia con la ejecución de la limpieza previa de la superficie de la placa de forma que no existan agentes externos que puedan alterar el ensayo, para ello se utilizaron solventes removedores; en la Fig. 3.1 se presenta los implementos que se emplearon en este primer caso.



Fig. 3.1. Elementos empleados en la primera situación [9].

- B) El siguiente paso es suministrar un campo magnético sobre la superficie de la pieza a magnetizar (en este caso la placa de acero) a través del yugo magnético como se presenta en la Fig. 3.2, de esta manera se crean los polos norte y sur.



Fig. 3.2. Inducción del campo magnético a través del Yugo [9].

Mientras se induce el campo magnético sobre la placa se añaden las partículas magnéticas a la placa tal como se presenta en la Fig. 3.3.



Fig. 3.3. Añadidura de partículas magnéticas [9].

C) El siguiente paso es realizar una inspección visual sobre las indicaciones longitudinales que se crearon a partir de la inducción del campo magnético y

la reacción de las partículas a este sobre la superficie tal como se presenta en la Fig. 3.4.



Fig. 3.4. Creación de líneas de campo [9].

Además, en la Fig. 3.4 se presenta cómo las partículas crean una forma circular que es el campo magnético alrededor de los puntos de generación del campo (imanes del yugo), además a través del medidor de campo residual se evidencia que existe magnetismo en la superficie de la placa tal como se presenta en la Fig. 3.5.



Fig. 3.5. Existencia de magnetismo en la superficie de la placa de acero [9].

D) Sabiendo que ya existe magnetismo en la superficie de la placa y que el campo magnético ha sido establecido, el siguiente paso es observar que exista un campo longitudinal que va de un polo a otro (norte a sur) continuo, sin que existan grietas o discontinuidades entre estas líneas, tal como se presenta en la Fig. 5.6.



Fig. 3.6. Campo longitudinal continuo en la superficie [9].

E) A través de este proceso de magnetización de la superficie se busca determinar alguna imperfección en la placa, primero se desmagnetiza (se quita de la placa el yugo), luego se realiza una inspección visual y se limpia la superficie del objeto para poder encontrar fisuras y, en efecto es lo que se encuentra en esta placa como se puede observar en la Fig. 3.7, al remover las partículas sobrantes y desmagnetizar luego de establecer el campo con líneas longitudinales se pudo encontrar una imperfección situada en la región cercana a la soldadura.



Fig. 3.7. Fisura encontrada realizando el ensayo de partículas magnéticas [9].

### **3.1.2. ENSAYO CON PARTÍCULAS MAGNÉTICAS MAGNETIZADAS DIRECTAMENTE**

En este caso se presenta el ensayo no destructivo de partículas magnéticas, pero utilizando el método de magnetización directa; la puesta en marcha de este ensayo se realiza a través de un equipo que hará pasar corriente eléctrica a través de una muestra de acero. Esta corriente denominada como de magnetización cuenta con una rectificación de media onda; así en el instante en que esta corriente circule por la pieza se creará un campo magnético circular que detectará discontinuidades que se encuentren en forma perpendicular a este campo, es decir, en contra de las líneas longitudinales, en la Fig. 3.8 se presenta la disposición de los elementos para este ensayo.



Fig. 3.8. Elementos para la realización del segundo ensayo [10].

De manera general se requiere de la pieza de prueba localizada entre los soportes que darán la corriente eléctrica, las partículas magnéticas y por supuesto de la máquina que genera la corriente eléctrica Así, el procedimiento es el siguiente:

- A) Se inicia de igual manera que el anterior, realizando la limpieza previa de la muestra de metal para que no existan agentes que puedan alterar el resultado.
- B) Antes de iniciar con el proceso de inducción de corriente a la pieza, se fijan los valores adecuados de intensidad de esta, de igual forma se dispone de una iluminación adecuada, tal como se presenta en la Fig. 9.

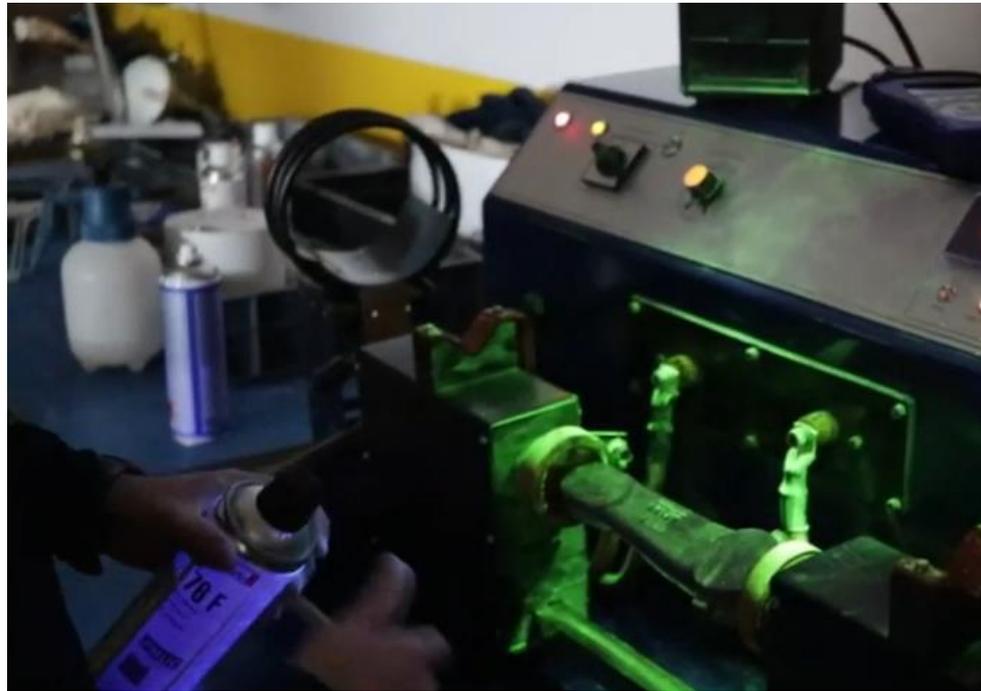


Fig. 3.9. Preparación previa al ensayo de magnetización por corriente directa [10].

C) Teniendo ya todo a disposición, se realiza entonces la inyección de corriente a la pieza y se añaden las partículas de forma uniforme a la muestra, tal como se presenta en la Fig. 10. Luego de esto se realizará una inspección visual sobre la superficie del material, observándose que se han acumulado partículas magnéticas en los lugares donde el campo magnético longitudinal ha generado fugas magnéticas.



Fig. 3.10. Añadidura de partículas magnéticas e inyección de corriente a la pieza [10].

D) El campo magnético generado en el metal se formó correctamente, es decir, que las líneas longitudinales abarcaron ambos polos hasta el punto en que se presentaron las discontinuidades transversales descritas en el literal anterior como las fugas magnéticas visibles en el centro de la pieza. Cabe mencionar que estas discontinuidades se encuentran paralelas en la dirección de la pieza, por lo tanto, son perpendiculares a las líneas longitudinales del campo magnético generado por el paso de corriente eléctrica, tal como se presenta en la Fig. 11.

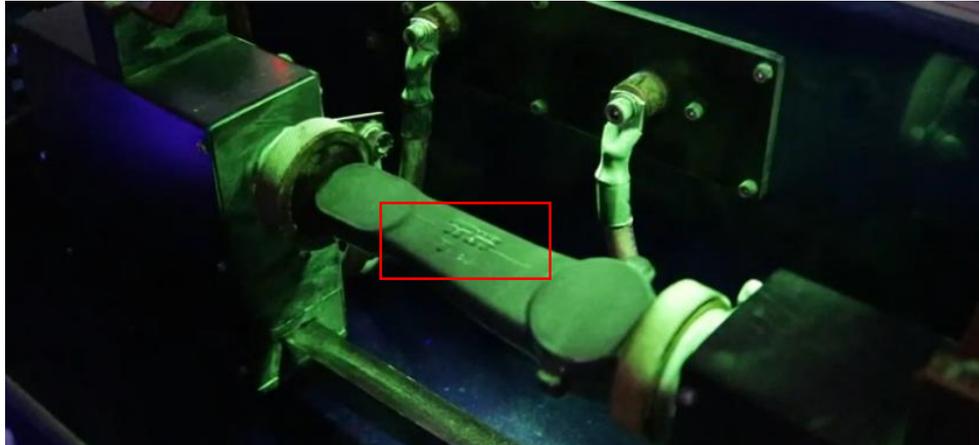


Fig. 3.11. Discontinuidad hallada a través del ensayo de magnetización por corriente directa [10].

- A) Posterior a este paso se desmagnetiza la pieza y se ejecuta la limpieza posterior al ensayo.

### 3.1.3. ESTUDIO CON PARTÍCULAS HÚMEDAS FLUORESCENTES

Para este caso de estudio, se realizará el mismo procedimiento descrito en los ensayos anteriores, pero a diferencia de las situaciones anteriores, las partículas magnéticas que se utilizaron en esta prueba son AWS D1.1 que están relacionadas con la aplicación de partículas húmedas fluorescentes, además se utilizan lámparas de luz ultravioleta. Estos elementos deben estar revisados bajo la normativa AWS para garantizar la correcta funcionalidad de estas lámparas y que los resultados sean los idóneos; dentro de los parámetros a tener en cuenta se tienen la longitud de onda de la emisión de luz que debe estar entre los 365 a los 370 nm.

Otra especificación importante para este ensayo es la ubicación donde se va a realizar el ensayo, la zona debe ser oscura y contar con un control de intensidad de luz normal, así como también de luz ultravioleta. Sobre la pieza donde se realiza el ensayo debe existir según la AWS una intensidad de luz ultravioleta focalizada que debe ser mayor a los  $1000 \text{ mW/cm}^2$ ; para este ensayo también se utilizará al yugo magnético como elemento principal para suministrar el campo magnético, de igual forma que será empleada la luz negra para esta prueba, así todos los elementos se presentan en la Fig. 3.12.

Al igual que en el primer caso de estudio, también se utilizan medidores que permiten obtener la intensidad de luz negra y ultravioleta con el fin de garantizar los valores adecuados durante el ensayo, así en la Fig. 3.13 se presenta la forma de realiza la medición para poder determinar cuál es la distancia idónea desde la lámpara hasta el sensor para cumplir con el estándar establecido por la AWS.



Fig. 3.12. Elementos para la realización del estudio con partículas húmedas fluorescentes [11].



Fig. 3.13. Ajuste de parámetro de intensidad de luz negra [11].

El procedimiento para realizar el ensayo con partículas húmedas fluorescentes magnéticas es el siguiente:

- A) El primer paso como en los demás ensayos, es llevar a cabo la limpieza de la pieza metálica soldada para que no existan agentes que alteren el resultado del ensayo.
- B) El siguiente paso es el establecimiento de un campo magnético a través del yugo y agregar las partículas magnéticas.

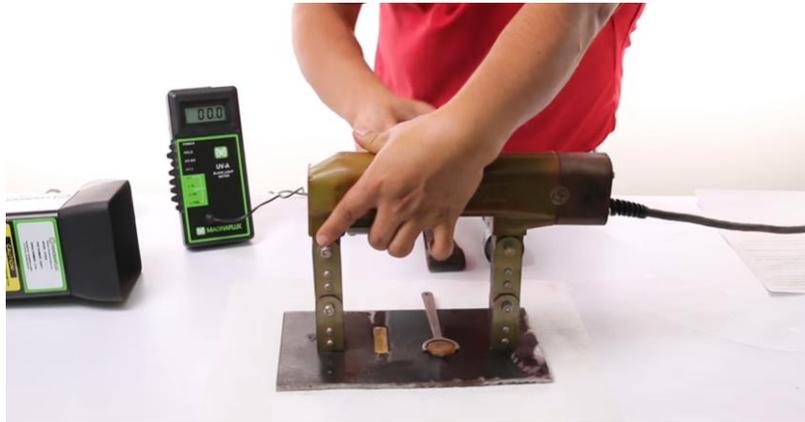


Fig. 3.14. Inyección de campo magnético y agregando partículas magnéticas [11].

- C) Luego de implementados estos pasos, es momento de realizar una inspección tanto de líneas longitudinales de campo magnético como de intensidad de luz negra, se procede a apagar la luz del área donde se está realizando la prueba, mediante las partículas y con el uso del medidor de flujo tipo pastel se puede identificar claramente que existe un campo magnético en la superficie de la junta soldada como se presenta en la Fig. 3.15.



Fig. 3.15. Indicativo de campo magnético sobre la superficie [11].

D) Luego de confirmado que el campo magnético dado por el yugo es el adecuado se procede entonces a verificar la existencia de líneas transversales o discontinuidades presentes en la soldadura de la placa, para ello se ubicará el yugo de forma recta de manera que el campo magnético se ubique de forma perpendicular a la fisura que pueda existir, entonces se aplica el flujo y se agregan las partículas magnéticas como se presenta en la Fig. 3.16. Ahora se apaga la luz y se emplea la lámpara de luz negra para poder visualizar si existe o no discontinuidad, dando como resultado la existencia de tres fisuras, dos que son muy pequeñas mientras que una de ellas si se puede observar sin dificultad. En función de la ubicación y orientación se puede interpretar que son grietas abiertas ocasionadas por el calor, tal como se presenta en la Fig. 3.17.



Fig. 3.16. Agregado de partículas magnéticas sobre la superficie [11].

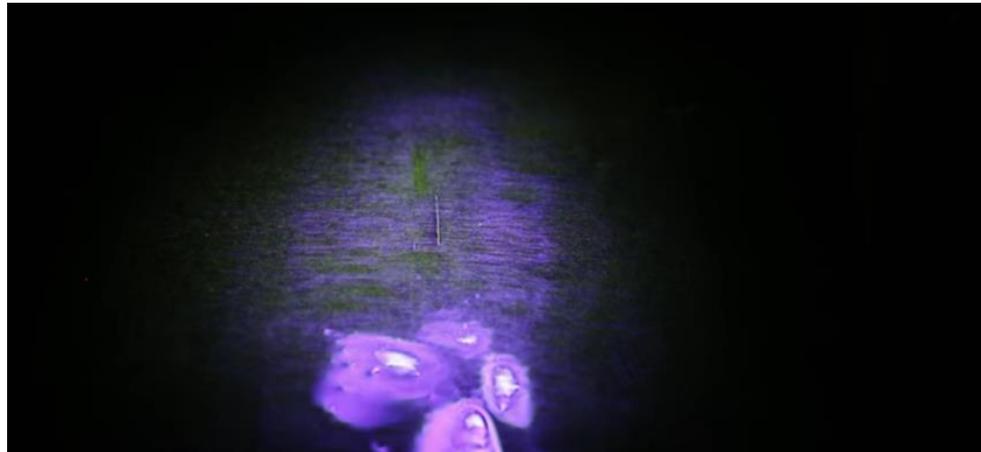


Fig. 3.17. Hallazgo de discontinuidades en la superficie de la junta soldada [11].

Por lo tanto, la inspección por partículas magnéticas fluorescentes incrementa la sensibilidad del sistema de inspección siempre y cuando se realice cumpliendo con los requisitos que establecen los códigos en las normas y especificaciones.

- E) Por último, se realiza la limpieza posterior de la placa de prueba y se desmagnetiza el objeto.

### **3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En el primer ensayo con partículas magnéticas aplicando campo residual, se realizó el ensayo no destructivo de partículas magnéticas para poder identificar si existían imperfecciones como por ejemplo fisuras en la placa, es importante acotar que en esta prueba se encontraba una soldadura en la mitad del metal, esto con la finalidad de realizar el ensayo en una situación de la vida

real. El resultado de llevar a cabo el procedimiento fue positivo dado que se pudo encontrar una fisura en la zona cercana a la soldadura, por lo que el ensayo funcionó de manera óptima y se logró determinar la imperfección en la placa de acero estudiada. Además, es muy importante conocer el modo de funcionamiento de este ensayo, ya que a partir de ello se podrá llevar a cabo una correcta interpretación de la situación para poder implementar una solución.

A través del segundo ensayo con partículas magnéticas magnetizadas directamente, se obtuvo otra manera de implementar el ensayo de partículas magnéticas, pero a través de la inyección de una corriente eléctrica, diferente al anterior en el que se aplica un campo magnético a través del yugo, acá es un efecto propio de la corriente. Las partículas magnéticas se acumulan sobre las discontinuidades encontradas, estas imperfecciones se encuentran perpendiculares a las líneas longitudinales del campo magnético y se necesitó de una iluminación adecuada para una mejor visualización, en este caso la luz es fluorescente permitiendo una mejor perspectiva de la fisura encontrada. Así, de esta manera se emplea otro método de ensayo no destructivo empleando las partículas magnéticas como medio principal, la intensidad de corriente y los parámetros necesarios para ser ingresados en la maquina fueron calculados en función de las propiedades de la pieza, tomando en cuenta la resistividad y otras propiedades físicas acordes con la intensidad requerida para que se genere un campo magnético sobre el material.

A diferencia de los primeros dos casos de ensayo, las partículas magnéticas húmedas aplicadas en el último ensayo, se requirió de lámparas especiales que emitían luz negra, esto con la finalidad de hallar grietas o discontinuidades utilizando la intensidad. El elemento principal para generar campo magnético fue el yugo magnético y al igual que en los casos anteriores, fue primordial asegurar que las líneas de campo longitudinales realizaran correctamente el recorrido; a partir de acá el procedimiento fue básicamente el

mismo la diferencia fue la inclusión del tipo nuevo de partículas y las lámparas especiales emisoras de luz.

En el mismo sentido, con el estudio de tres casos distintos de aplicación del ensayo se puede constatar que un procedimiento no es mejor que el otro o que no contemplan grandes diferencias, además se podría decir entonces que el caso de ensayos dos (2) y tres (3) requieren de mayores conocimientos técnicos que el primero de los ensayos, garantizando con mayor precisión el hallazgo de posibles fisuras indeseadas en las piezas que quizás en el instante de aplicar el primer método no serían encontradas por ejemplo las dos fisuras más pequeñas encontradas en el último caso de estudio en las que se utilizó partículas magnéticas húmedas y luz negra.

Sin importar cuál sea el procedimiento a ser aplicado sobre las juntas de soldaduras de materiales ferromagnéticos, es importante mencionar que este ensayo no destructivo es esencial para poder encontrar discontinuidades en las placas de material ferromagnético sin necesidad de someterlas a pruebas de mayor complejidad que puedan afectar la integridad de la misma. Además, ha quedado evidenciado que es una prueba rápida y no requiere de un gran trabajo por parte de la persona que la practica; dependiendo del tipo de procedimiento escogido los costos pueden ser elevados por ejemplo al utilizar el método de corriente directa o de menos valor como el primer caso de estudio presentado.

## CONCLUSIONES

- Los ensayos no destructivos son utilizados en la mayoría de actividades que tienen gran envergadura, como por ejemplo en el análisis a infraestructuras muy grandes como aviones, barcos, etc., pero también, se pueden utilizar en cualquier rama donde sea necesario establecer verificaciones a las estructuras de metal.
- Con la aplicación de los ensayos no destructivos, no se requiere someter a condiciones extremas el material, como por ejemplo sometimiento a temperaturas altas de fundición, pruebas de choque físico; sino simplemente mediante evaluaciones visuales, o con técnicas como la analizada, a través de magnetismo, se puede realizar la detección de problemáticas y discontinuidades volumétricas en la capa subsuperficial.
- La aplicación de las partículas magnéticas, tienen todo un procedimiento que se ha de llevar a cabo para que se cumpla de manera efectiva, y se obtengan resultados confiables. Su aplicación requiere del cumplimiento de muchas variables físicas, que a su vez son dependientes de los materiales y equipos que las generan, como el yugo, el tipo de partículas a utilizar (secas o húmedas), una instalación de luz acorde con el tipo de partículas, entre otras.
- Tener a disposición los equipos para la implementación de este tipo de ensayos en el laboratorio, garantiza un mejor cumplimiento de la enseñanza en cuanto a los puntos que deben ver los estudiantes en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica; ya que esto les brindará de forma más clara y práctica los procedimientos de detección de

discontinuidades subsuperficiales, a través de ensayos con partículas magnéticas.

- La normativa propuesta en este trabajo de graduación, busca no sólo establecer los principios que se deben considerar para elaborar ensayos de esta naturaleza, sino también promover, las buenas prácticas de laboratorio que, no sólo serán útiles para desarrollar en las prácticas, dado que están basadas en reglamentos internacionales específicos de este ensayo, le será de mucha utilidad al estudiante en el campo profesional; aparte de promover la estructura teórica que todo profesional del área debe manejar.
- En función de los casos de estudio planteados, se observó que sin importar la naturaleza del estudio el resultado de ensayo no destructivo es garantizado que las discontinuidades o fisuras serán encontradas de manera correcta a través de esta prueba.
- Cada ensayo de partículas magnéticas tiene la misma finalidad, pero dependiendo de la técnica pueden ser unos mucho más efectivos que otros, logrando determinar la mayor cantidad de imperfecciones posibles dentro de juntas soldadas.
- El ensayo por partículas magnéticas húmedas arrojó los mejores resultados en cuanto al hallazgo de todo tipo de discontinuidades, no sólo los más destacadas sino también aquellas que son muy pequeñas como para que puedan ser detectadas por las otras pruebas de estudio. El método de inyección de corrientes de Eddy también es funcional para este tipo de discontinuidades, pero realizarlo implica costos más elevados.

## REFERENCIAS

- [1] ASTM International (s.f.). *ASTM E 709 – 01. Guía Estándar para Examen con Partículas Magnéticas.*
- [2] Morelos, A. (2000). *Métodos de pruebas no destructivas* (Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”). Repositorio Digital UAAAN.
- [3] Ballesteros, A. (2010). *Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados en ambientes marinos* (Tesis de Posgrado, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales). Repositorio Institucional de COMIMSA.
- [4] Villacís, J. (2011). *Ensayos no destructivos por el método de partículas magnéticas y su incidencia en materiales ferromagnéticos* (Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Ambato). Repositorio Digital de UTA.
- [5] Miño, B. (2020). *Determinación, interpretación y evaluación de discontinuidades en juntas soldadas de estructuras metálicas por ensayos no destructivos, basado en el Código AWS D1.1* (Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito). Repositorio Institucional Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador.
- [6] Rincón, S., Calvo, D. & Estrada, E. (2015). *Técnica de Partículas Magnéticas: Caso del Laboratorio del CAMAN*. Ciencia y Poder Aéreo. Volumen 10. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. Colombia. ISSN 1909-7050/E- ISSN 2389-2468
- [7] TianLi. (s.f.). *ASTM E – 1444 – 12 Standard Practice for Magnetic Particle Examination.*
- [8] Asociación Española de Ensayos no Destructivos (2016). *Introducción a los END*. Madrid, España.

- [9] Llogsa Mercadotecnia (2013). *Principios de inspección por partículas Magnéticas*. [Vídeo]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=GF4qUSoqpn8>
- [10] Grupo Ipunto (2021). *Ensayos no destructivos. Partículas magnéticas. Magnetización directa entre cabezales*. [Vídeo]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=anB7r2ht0IY>
- [11] Llogsa Mercadotecnia (2017). *Inspección por partículas magnéticas de acuerdo a AWS D 1.1*. [Vídeo]. <https://www.youtube.com/watch?v=8-o0LIYQuFM>

**ANEXO A. PRÁCTICA DE LABORATORIO: ENSAYO NO DESTRUCTIVO  
POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DEPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN**

**PRÁCTICA DE LABORATORIO:  
ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

**A.1. INTRODUCCIÓN**

El ensayo mediante partículas magnéticas es un método de detección de discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales magnetizables, que utilizan el efecto que produce un campo magnético al atravesar un material ferromagnético, de tal manera que si en la pieza se encuentra alguna discontinuidad, el campo magnético se verá repelido por la misma generando un campo de fuga.

El principio de operación de este ensayo consiste en que el flujo magnético en un objeto magnetizado se distorsiona localmente por la presencia de una discontinuidad, esta distorsión causa que parte del flujo magnético salga y vuelva a entrar en la discontinuidad del objeto de prueba y al aplicar partículas finas de hierro al área de interés, se revela su presencia.

El flujo magnético escapa desde los lados de la ruptura indicando su localización debido a que la corriente magnética está en una apropiada dirección relativa a la discontinuidad, así la imperfección se puede presentar mejor si el campo magnético es transversal a esta.

A continuación, se describen los componentes más importantes para la realización del ensayo:

**A) Yugo electromagnético:** Con el yugo se crea un campo longitudinal de dirección conocida entre los polos. Es seguro de usar sobre piezas tratadas térmicamente sin ningún riesgo de quemar la superficie, o sobre cualquier superficie en la que no se permite quemaduras por arco. Son capaces de

generar campos magnéticos fuertes en la porción de la pieza que se encuentra entre sus polos. Están disponibles para operar con corriente alterna, corriente directa rectificada en media onda o corriente directa pulsada. En la Fig. A.1 se presenta un yugo electromagnético portátil.



Fig. A.1. Yugo electromagnético.

Los cuatro tipos básicos de corrientes utilizadas en la examinación por partículas magnéticas para establecer la parte magnetizada son los siguientes:

- a) Corriente alterna. Es utilizada para casi todos los servicios. Su intervalo de voltaje comercialmente disponible es de 120 a 440 V. La corriente alterna tiene poca capacidad de penetración, por lo que, el campo magnético inducido por la corriente alterna se concentra cerca de la superficie de la pieza que está siendo magnetizada, a esto se le conoce como efecto de piel.
- b) Corriente directa rectificada de media onda. Este tipo de corriente es frecuentemente usada en conjunto con partículas secas y con

magnetización localizada para lograr la misma profundidad de penetración para la detección de las típicas discontinuidades encontradas.

- c) Corriente alterna de onda completa rectificadas. Esta técnica es usualmente utilizada cuando el método residual va a ser utilizado.
- d) Corriente directa. La corriente directa es un flujo continuo de corriente en una sola dirección. Una fuente común de corriente directa es la batería o la pila normal. Su principal desventaja es debido a que las altas corrientes únicamente pueden ser mantenidas mientras la carga de la batería o pila es adecuada y, muchas veces, es necesario contar con el flujo de corriente durante intervalos de tiempo prolongados.

**B) Partículas magnéticas:** Las partículas magnéticas se fabrican de materiales ferromagnéticos, con propiedades físicas y magnéticas que afectan su funcionalidad como medio para formar indicaciones. En la Fig. A.2 se presenta un frasco de aerosol de suspensión de partículas magnéticas de alta sensibilidad base aceite 7HF, para ensayos por partículas magnéticas por método húmedo no fluorescente.



Fig. A.2. Frasco de aerosol de suspensión de partículas magnéticas.

Las partículas magnéticas se pueden clasificar según:

a) Medio de transportación para su aplicación:

- ✓ Partículas secas: Las partículas empleadas en forma de polvo dependen de que el aire las lleve a la superficie de la pieza, por lo que se pueden utilizar pistolas, bulbos o aplicadores en forma de pera o tipo salero.
- ✓ Partículas húmedas: Este tipo de partículas son designadas para ser usadas suspendidas en un vehículo tal como agua o petróleo ligero destilado para obtener la concentración de la aplicación para la superficie de prueba.

b) Presentación de estas partículas puede ser en forma de pastas, polvo y concentrados, así:

- ✓ Pastas: Deben ser disueltas en aceite para conseguir el tamaño de partícula y la consistencia adecuada.
- ✓ Polvo: Las partículas en polvo tienen la necesidad de mezclarse con agentes que faciliten su dispersión, agentes humectantes, agentes inhibidores de corrosión.

c) Tipos de partículas:

- ✓ Partículas visibles, no-fluorescentes, contrastantes o coloreadas. Las indicaciones de partículas visibles son examinadas con luz blanca, que pueden ser natural o artificial. Con partículas visibles la selección del color de la partícula a utilizar depende únicamente del cual proporcione el mayor contraste con el color de la superficie de la pieza inspeccionada.
- ✓ Partículas fluorescentes. Normalmente este tipo de partículas tienen una coloración verde-amarillo, lo cual le confiere la particularidad de ser lo más fácilmente visible para el ojo humano, por encontrarse al centro del espectro visible. Con excepción de algunas aplicaciones, las partículas fluorescentes son usadas en el método húmedo. Con ello, la inspección con partículas fluorescentes es rápida, confiable y más

sensible para discontinuidades muy finas en la mayoría de aplicaciones.

**C) Medidor analógico de campo magnético residual:** Ayuda a comprobar y medir la intensidad y dirección del campo magnético durante el proceso de inspección por partículas magnéticas aplicando campo residual. En la Fig. A.3 se presenta un ejemplo de medidor de bolsillo, que proporciona flexibilidad para medir el magnetismo residual de las piezas, la dirección y la intensidad del campo AC/DC en las aplicaciones de ensayos por partículas magnéticas.



Fig. A.3. Indicador de campo.

A continuación en las Figs. A.4 - A6 se presentan algunos ejemplos de grietas/defectos encontrados a través del ensayo por partículas magnéticas:



Fig. A.4. Grieta visualizada a través de partículas secas rojas.



Fig. A.5. Grieta visualizada mediante partículas negras húmedas.



Fig. A.6. Comparación entre partículas fluorescentes y visibles.

A continuación, en la Tabla 1, se presenta un resumen de las diferentes formas en que se puede realizar el ensayo no destructivo mediante partículas magnéticas, para los casos que se puedan presentar:

Tabla A.1. Características de diseño de los equipos de ensayo por partículas magnéticas

Características de diseño					Finalidad del ensayo	
Básicas	Variantes					
Sistemas de magnetización	Magnetización por imanes	Imán permanente			Aplicable, en general, para ensayos por zonas en piezas grandes y soldaduras	
		Yugo magnético (Electroimán)				
	Magnetización circular	Paso de corriente	A través de la muestra		Detección de discontinuidades en dirección de la corriente (longitudinales)	
			A través de un conductor coaxial a la muestra			
		Por inducción				
	Magnetización longitudinal	Solenoides	Fijo	Electroimán	Detección de discontinuidades transversales a las líneas de fuerza	
			Móvil			
	Magnetización por corriente eléctrica	Magnetización multidireccional			Magnetización de piezas grandes de geometría compleja	
		Tipos de corriente	Alterna			Detección de discontinuidades superficiales
			Continua			Detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales
			Alterna monofásica semirectificada			Detección de discontinuidades subsuperficiales (gran sensibilidad)
			Alterna monofásica totalmente rectificada			Detección de discontinuidades subsuperficiales
			Alterna trifásica totalmente rectificada			Detección de discontinuidades subsuperficiales
		Tiempo de magnetización	Sin prefijar			Examen de muestras de distinta geometría
	Con temporizador			Examen de grandes series		
Instalaciones	Universales	Portátiles	Imanes	Examen por zonas en piezas		
			Electrodos de contacto			
	Fijos	Magnetización	Corriente eléctrica	Examen de muestras pequeñas y medianas		
			Electroimán			
Especiales		Automáticas		Aplicables a grandes series		

Continúa.

Continuación.- Tabla A.1. Características de diseño de los equipos de ensayo por partículas magnéticas.

Características de diseño					Finalidad del ensayo	
Básicas	Variantes					
Partículas magnéticas	Modo de aplicación	Por vía seca	Manual (espolvoreando)		Detección de discontinuidades subsuperficiales (gran sensibilidad)	
			Equipos especiales (pistolas de aire a baja velocidad)			
		Por vía húmeda	Riego		Detección de discontinuidades superficiales finas (gran sensibilidad)	
			Inmersión			
	Características de las partículas	Tamaño	Gruesas		Vía seca	Detección de discontinuidades grandes subsuperficiales
			Finas		Vía seca y húmeda	Detección de discontinuidades finas y grandes superficiales
			Mezcla de gruesas y finas			
		Forma	Redondeadas		Vía seca y húmeda	Formación lenta y difusa de indicaciones
			Alargadas			Formación rápida y definida de ind.
			Mezcla de redondeadas y alargadas			Formación aceptable de indicaciones (bajo costo)
		Permeabilidad magnética		Elevada		Formación rápida de ind. (gran definición)
		Fuerza coercitiva		Baja		Formación de indicaciones con gran contraste
		Retentividad	Baja		Vía seca	Evita aglomeración de partículas
			Media		Vía húmeda	Evita formación de gramos
	Movilidad		Grande		Formación rápida de ind. (gran nitidez)	
	Visibilidad y contraste	Coloreadas	Grises	Vía seca y húmeda	Aplicables a todo tipo de muestras	
			Rojas			
		Negras				
	Fluorescentes	Amarillo verdoso	Vía húmeda	Óptima visibilidad y contraste		
Secuencia de aplicación	Continuo				Aplicables a muestras de baja retentividad	
	Residual				Aplicables a muestras de elevada retentividad	
Sistemas de desmagnetización	Unidades	Fijas	Corriente alterna de 50 Hz		Eliminación del magnetismo residual	
			Corriente alterna de 10 Hz o menor			
		Portátiles	Corriente alterna		Eliminación de polos magnéticos muy localizados	

## **A.2. OBJETIVO GENERAL**

Poner en práctica los conceptos, equipos, materiales y procedimiento referentes al ensayo no destructivo por partículas magnéticas.

## **A.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Al finalizar la práctica, el estudiante será capaz de:

- 1) Seleccionar los instrumentos adecuados y materiales utilizados en ensayos por partículas magnéticas.
- 2) Realizar pruebas de manera correcta con el yugo y las partículas magnéticas.
- 3) Conocer las diferentes formas de realizar el ensayo.

## **A.4. TIEMPO REQUERIDO**

El tiempo que se requiere para la realización de la práctica, y se completen los objetivos es de: 100 min.

## **A.5. INSTRUMENTOS Y MATERIALES A UTILIZAR**

El instrumento y materiales que se utilizaran durante el desarrollo de la práctica son:

- 1) Yugo magnético,
- 2) Partículas magnéticas secas,
- 3) Aspensor,
- 4) Desengrasante, y
- 5) Pieza ferrosa para el ensayo.

## A.6. PROCEDIMIENTO

La práctica se desarrollará realizando los pasos descritos en la Tabla 2. Además, cada paso se culminará complementando las evidencias del cumplimiento de dichos pasos, esto es con fotografías complementando la observación.

Tabla A.2. Procedimiento del ensayo no destructivo por partículas magnéticas.

Paso	Descripción	Evidencias
1	<b>Preparación de la superficie:</b> Es importante que la superficie de prueba, en este caso la soldadura, esté limpia, seca y libre de suciedad, grasa, incrustaciones, pintura u otros materiales que puedan interferir con la inspección.	
2	<b>Preparación para la magnetización:</b> La pieza debe prepararse para que se le aplique la corriente de magnetización. Las patas del yugo se deben colocar ~1 pulg de distancia del posible defecto, teniendo siempre en cuenta utilizar el amperaje adecuado y el indicador de campo para verificar la intensidad del campo magnético.	

Continúa.

Continuación.- Tabla A.2. Procedimiento del ensayo no destructivo por partículas magnéticas.

Paso	Descripción	Evidencias
3	<p><b>Aplique corriente magnética:</b> Se energiza el yugo y se desliza sobre el área a examinar. Se recomienda realizar la magnetización en direcciones perpendiculares a la pieza para poder detectar las grietas en las distintas direcciones posibles.</p>	
4	<p><b>Aplique partículas magnéticas:</b> Luego de realizar la magnetización, se aplica las partículas a la pieza y se elimina el exceso del polvo magnético mientras la corriente aún se está aplicando.</p>	
5	<p><b>Inspección:</b> La indicación aparecerá instantáneamente, si no se utilizan partículas fluorescentes, en caso contrario se debe utilizar una lámpara de luz UAV para poder visualizar las grietas.</p>	

Continúa.

Continuación.- Tabla A.2. Procedimiento del ensayo no destructivo por partículas magnéticas.

Paso	Descripción	Evidencias
6	<p><b>Magnetización adicional:</b>  Dependiendo de los resultados, se puede requerir un disparo electromagnético adicional para encontrar otras indicaciones en diferentes orientaciones la pieza o superficie de prueba. En este caso, repita los pasos del 2 al 5.</p>	
7	<p><b>Desmagnetización:</b> Utilizando la corriente magnética, intensidad de campo y dirección apropiadas, desmagnetice la pieza al final de la inspección y use un <u>medidor de campo</u> para verificar que no haya magnetismo residual.</p>	
8	<p><b>Limpieza:</b> La pieza se debe limpiarse después de la inspección para eliminar las partículas magnéticas restantes.</p>	

## A.7. BIBLIOGRAFÍA

- ✓ ILOG SA de CV (2019). Curso de Partículas Magnéticas. ILOG SA de CV  
Sitio web: [www.llogsa.mx](http://www.llogsa.mx)
- ✓ Morelos, A. (2000). *Métodos de pruebas no destructivas* (Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”). Repositorio Digital UAAAN.
- ✓ Juan Carlos Monsalvo (2007). Ensayos No Destructivos Partículas Magnetizables. Universidad Tecnológica Nacional Sitio web: <https://frh.cvg.utn.edu.ar>
- ✓ Ballesteros, A. (2010). *Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados en ambientes marinos* (Tesis de Posgrado, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales). Repositorio Institucional de COMIMSA.