



Contenido de Partículas Magnéticas **NDTPEDIA**

Elaborado por: Ing. Diego Enrique Gamarra Azacon
Primera Edición. Febrero 2024





INDICE

Capítulo 1: Introducción a las Partículas Magnéticas	7
1. Definiciones y conceptos de Partículas Magnéticas	7
2. Ventajas y Limitaciones	8
3. Tipos de Partículas Magnéticas	8
3.1 Partículas Secas.....	8
3.2 Partículas Húmedas	9
Capítulo 2: Principios de Magnetismo.....	10
1. Introducción al Magnetismo	10
2. Campos Magnéticos	12
3. Magnetismo por Inducción	13
4. Definiciones, Unidades y Formulas de Medición Electromagnética	16
1.1 Regla Nemotécnica de Interrelación Magnética – PRRRC	17
5. Materiales Magnéticos.....	18
6. Materiales Ferromagnéticos y Dominios Magnéticos.....	20
7. Materiales y Magnetización	22
8. Curva de Histéresis.....	22
7.1 Curva de Histéresis de Acero Duro	26
7.2 Curva de Histéresis de Acero Suave	26
9. Desmagnetización	27
Capítulo 3: Magnetización e interacción con las discontinuidades.....	29
1. Interacción entre discontinuidades y campo magnético	31
1.1 Discontinuidades Superficiales	32
1.2 Discontinuidades Subsuperficiales	32
1.3 Fuga de flujo y la generación de la indicación	32
1.4 Formación de la indicación	33
2. Tipos de Magnetización.....	33
1.1 Inducción Directa	34
1.2 Inducción Indirecta	34
1.3 Magnetización Circular.....	34



1.4	Magnetización Lineal.....	34
2.3	Magnetización Multidireccional	35
2.	Importancia de la dirección del campo magnético.....	37
Capítulo 4: Tipos de Corriente		38
1.	Corriente Directa.....	38
1.1	Ventajas de Corriente Directa	38
1.2	Desventajas de Corriente Directa.....	39
2.	Corriente Alterna.....	39
2.1	Ventajas de Corriente Alterna.....	40
2.2	Desventajas de Corriente Alterna	40
2.3	Efecto de superficie – “Skin Effect”	40
3.	Corriente Alterna Rectificada.....	41
3.1	HWAC – Corriente Alterna de Media Onda	41
3.1.1	Ventajas de HWAC	42
3.1.2	Desventajas de HWAC	42
3.2	FWAC – Corriente Alterna de Onda Completa de una fase.....	43
3.2.1	Ventajas de FWAC de una Fase.....	43
3.2.2	Desventajas de FWAC de una Fase.....	43
3.3	FWAC – Corriente Alterna de Onda Completa de tres fases.....	43
3.3.1	Ventajas de FWAC de tres Fases.....	45
3.3.2	Desventajas de FWAC de tres Fases.....	45
4.	Comparación del Poder de Penetración.....	45
5.	Distribución de la magnetización en el componente.....	46
5.1	Evaluación de la distribución en un cilindro	46
5.2	Evaluación de la distribución en un cilindro hueco.....	48
Capítulo 5: Partículas Magnéticas		51
1.	Propiedades generales de las partículas magnéticas	51
2.	Partículas Magnéticas Secas.....	52
2.1	Efecto del tamaño en las partículas secas	53
2.2	Efecto de la geometría en las partículas secas	54
2.3	Movilidad de las partículas secas y aplicación	54
2.4	Comentarios generales	55



3.	Partículas Magnéticas Húmedas.....	55
2.1	Medio líquido de la suspensión.....	56
2.2	Efecto del tamaño de las partículas húmedas.....	57
2.3	Efecto de la geometría en las partículas húmedas	58
2.4	Movilidad de las partículas húmedas	58
2.5	Aplicación de partículas húmedas.....	58
2.5.1	Aplicación de partículas húmedas en sistemas portátiles	59
2.5.2	Aplicación de partículas húmedas en sistemas estacionarios.....	59
2.6	Formulación, concentración y contaminantes en el baño de partículas húmedas 60	
2.6.1	Formulación de las partículas húmedas	61
2.6.1.1	Preparación de la mezcla	62
2.6.2	Concentración de las partículas húmedas.....	63
3.	Selección del tipo de partícula. Húmeda o Seca.	64
	Capítulo 6: Equipos, técnicas y requerimientos de magnetización	65
1.	Sistemas Portátiles.....	65
1.1	Yugo Electromagnético – Inducción Indirecta – Campo Longitudinal	65
1.2	Yugo de Imán Permanente – Inducción Indirecta.....	66
1.3	Bobinas portátiles – Inducción Indirecta	66
2.	Equipos semiportátiles.....	67
2.1	Electrodos – Inducción Directa – Campo Circular.....	68
2.2	Cables.....	68
3.	Equipos Estacionarios.....	69
3.1	Magnetización mediante el uso de bobinas – Inducción Indirecta – Campo Longitudinal	70
3.2	Magnetización mediante Head Shot – Inducción Directa – Campo Circular	71
3.3	Magnetización mediante el uso de un conductor central – Inducción Indirecta – Campo Circular	71
4.	Técnica Continua y Residual	72
4.1	Forma Continua	72
4.2	Forma Residual	73
5.	Requerimientos y cálculos para la magnetización	73
5.1	Amperaje para la magnetización circular directa	73



5.2	Amperaje para la magnetización circular indirecta mediante conductor central	74
5.3	Amperaje para la magnetización lineal mediante el uso de bobinas.....	76
5.3.1	Bobinas con bajo factor de llenado	78
5.3.2	Bobinas con factor de llenado intermedio	79
5.3.3	Bobinas con alto factor de llenado o cables	80
5.3.4	Piezas huecas y su relación L/D	80
5.4	Amperaje cuando se implementan electrodos.....	81
Capítulo 7: Equipamiento Adicional en Partículas Magnéticas		82
1.	Equipos para técnicas fluorescentes.....	82
1.1	Radiómetro.....	82
1.2	Lámpara de Luz Ultravioleta.....	83
1.3	Precaución a la Luz Ultravioleta.....	84
2.	Blanco Contraste	85
3.	Gaussímetros.....	87
4.	Pie Gauge	89
5.	QQI	89
6.	Anillo de Ketos	90
6.1	Comparación de Técnicas con el Anillo de Ketos.....	92
Capítulo 8: Etapas de Partículas Magnéticas		93
1.	Selección de la Técnica de Partículas Magnéticas	93
2.	Consideraciones de seguridad para el método de partículas magnéticas.....	93
3.	Verificación de condiciones de iluminación	94
3.1	Condiciones de iluminación para partículas visibles	95
3.2	Condiciones de iluminación para partículas fluorescentes.....	95
4.	Verificación de magnetización previa y técnicas de desmagnetización.....	95
3.1	Verificación de magnetización previa o de desmagnetización	95
3.2	Técnicas de desmagnetización.....	96
3.2.1	Desmagnetización mediante bobina y corriente alterna.....	97
3.2.2	Desmagnetización mediante corriente directa	98
3.2.3	Desmagnetización con el Yugo Electromagnético.....	98
3.3	Efecto de la orientación de la desmagnetización.....	99
5.	Preparación Superficial	99



6. Magnetización del Componentes	99
7. Bloques y estándares de Referencia para Partículas Magnéticas.....	100
8. Desmagnetización posterior al ensayo	102

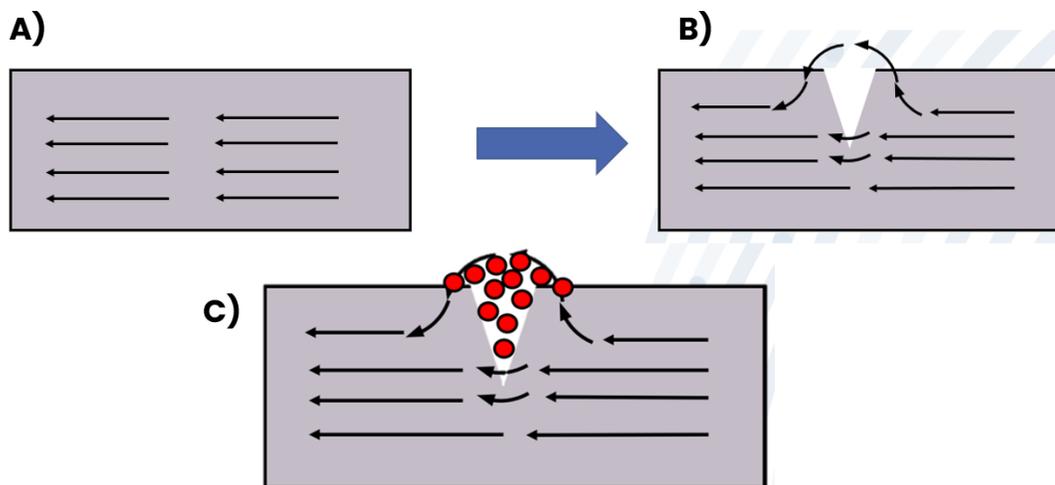
Capítulo 1: Introducción a las Partículas Magnéticas

1. Definiciones y conceptos de Partículas Magnéticas

El método de partículas magnéticas lo podemos definir como un método de inspección para detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales.

Se basa en la magnetización del componente evaluado y en el comportamiento de partículas magnetizables que se alinean al campo magnético y líneas de flujo desprendidas del material evaluado debido a la presencia de las discontinuidades.

De manera más sencilla podemos ver la siguiente figura.



Tal y como se aprecia en la figura anterior vemos en la parte A un componente con líneas de flujo magnético que lo recorren, al existir la presencia de discontinuidades genera que las líneas de flujo magnético se fuguen del material tal y como se aprecia en la parte B. Por último, en la parte C vemos como en la aplicación de partículas magnéticas se alinean a estas líneas de flujo externas y revelan la presencia de la discontinuidad.

Por lo tanto, podemos decir que estas partículas ferromagnéticas serán evidencia de discontinuidades en la pieza evaluada. De manera general se puede establecer en función de las partículas acumuladas: ubicación, tamaño, forma y extensión de la discontinuidad detectada.

Si establecemos a groso modo las etapas del método de partículas magnéticas podemos mencionar cuatro principales:

- ✓ Magnetización del componente
- ✓ Aplicación de las partículas magnéticas
- ✓ Interpretación de los resultados
- ✓ Desmagnetización

2. Ventajas y Limitaciones

Ventajas

- ✓ Este método es relativamente económico.
- ✓ Es un método sumamente rápido de implementar.
- ✓ No hay mucha limitación con respecto a la forma y tamaño de la pieza a inspeccionar.
- ✓ Se pueden detectar discontinuidades abiertas a la superficie y subsuperficiales.
- ✓ Generan una representación gráfica de la discontinuidad.
- ✓ La limpieza en comparación al método de líquidos penetrantes es menor. Se pueden detectar discontinuidades abiertas a la superficie que están llenas de algún contaminante.
- ✓ El equipo es sumamente portátil y adaptable a las piezas (Aunque también existe la opción de equipos estáticos).
- ✓ El entrenamiento del personal es relativamente sencillo.

Limitaciones

- ✓ La pieza evaluada debe ser ferromagnética.
- ✓ La detectabilidad podría verse limitada por diversos factores como: geometría, tamaño, acabado superficial, complejidad de la discontinuidad y orientación de la discontinuidad.
- ✓ La rugosidad de la superficie puede afectar las líneas de flujo.
- ✓ Se requiere de suministro de corriente eléctrica (dependerá del equipo implementado).
- ✓ Se requiere de al menos dos magnetizaciones (Debido a la orientación de las discontinuidades).
- ✓ Se requiere desmagnetizar la pieza luego de la inspección (Dependerá del componente evaluado).
- ✓ Cuando se implementan partículas magnéticas húmedas se requiere de verificar la compatibilidad del líquido con la pieza evaluada.
- ✓ A pesar de que las indicaciones son fáciles de observar se requiere de experiencia por parte del operador para interpretar y evaluar adecuadamente los resultados.

3. Tipos de Partículas Magnéticas

3.1 Partículas Secas

Al evaluar la curva de histéresis de un acero duro es muy fácil ver que la fuerza de magnetización que se requiere para efectivamente Partículas Secas

La utilización de partículas secas como su nombre lo dice se efectúa haciendo uso de partícula que se encuentran secas. Y esto significa que su aplicación es en forma de polvo de seco.

Esta técnica es preferible cuando se inspección superficies rugosas. Por ello las aplicaciones más comunes son la inspección de cordones de soldadura y piezas vaciadas.

Desde un punto de vista del contraste y la visibilidad que estas partículas pueden generar podemos mencionar tres tipos:

- ✓ Partículas con colores visibles.
- ✓ Partículas fluorescentes bajo UV-A.
- ✓ Partículas fluorescentes bajo luz visible.

3.2 Partículas Húmedas

La técnica de partículas húmedas se basa en la aplicación de partículas magnéticas que se encuentran suspendidas en un vehículo líquido, motivo por el cual se llaman partículas húmedas.

De manera general podemos decir que la ventaja que ofrece la técnica húmeda sobre la seca es que el componente inspeccionado será cubierto por las partículas de una manera más homogénea y rápida debido la humectabilidad que ofrece el líquido. Por otra parte, el vehículo líquido aumenta la movilidad de las partículas en la superficie.

Esta técnica se prefiere utilizar en sistemas de partículas magnéticas estáticos, aunque también para aplicaciones en campo se puede tener las latas de aerosol.

Desde un punto de vista de la sensibilidad esta técnica es más sensible que la técnica de partículas seca en superficies lisas. En el caso de superficies rugosas es contraproducente la movilidad de las partículas ya que los picos y valles que ofrece la superficie rugosa harán una función de pozos que limitarán el movimiento de las partículas.

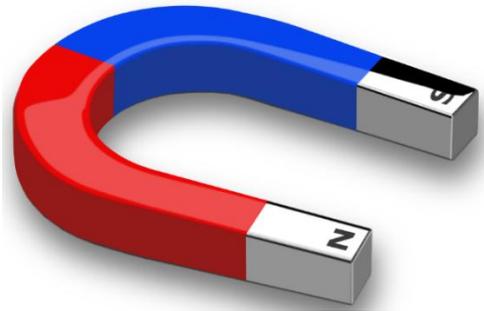
Desde un punto de vista del contraste y la visibilidad que estas partículas pueden generar podemos mencionar tres tipos:

- ✓ Partículas con colores visibles.
- ✓ Partículas fluorescentes bajo UV-A.

Capítulo 2: Principios de Magnetismo

1. Introducción al Magnetismo

Para hablar de lo que es un campo magnético lo mejor es empezar explicando que es un imán. En la siguiente figura podemos observar un imán.

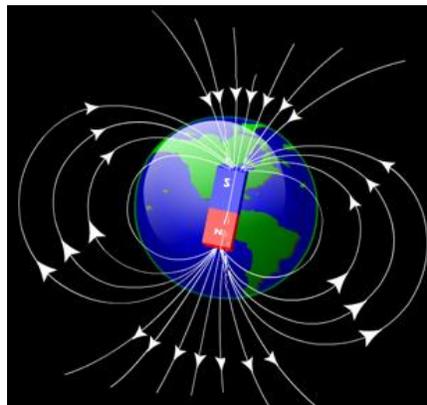


Tal y como se aprecia en la figura anterior podemos ver un imán en el que claramente se distinguen dos zonas. La primera zona de color rojo llamada N y la segunda zona de color azul llamada S.

Estos nombres de N y S hacen alusión al polo magnéticos llamados Norte y Sur que tiene el planeta tierra.

El conocimiento de los campos magnéticos viene de muchos años atrás, un claro ejemplo de esto son los compases que se utilizaban para las travesías marítimas y ayudaban a tener un curso “fijo”.

Si se deja una barra magnetizada suspendida en el aire o en agua esta se alinearán con los polos magnéticos que tiene la tierra. En la siguiente figura se aprecia el campo magnético que tiene la tierra y los polos.

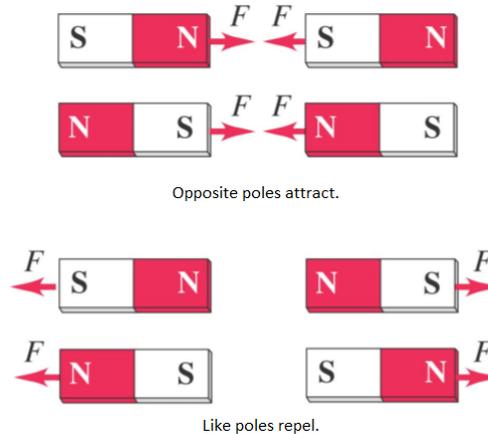


Si observamos la figura anterior podemos ver el polo magnético Norte que se ubica al sur de la tierra y el polo magnético Sur que se ubica al norte de la tierra.

Ahora bien, de la figura también podemos observar cómo salen líneas del polo magnético norte y llegan hasta el polo magnético sur. Esas líneas son las llamadas líneas de flujo magnético que son las responsables de que un compás pueda funcionar en cualquier parte del planeta tierra.

Esas mismas líneas de flujo son las que nos permitirán efectuar la inspección mediante partículas magnéticas. Evidentemente no se usan las líneas de flujo de la tierra para el ensayo, pero el principio físico es el mismo.

Al igual que con las cargas eléctricas los polos iguales se repelen y los polos opuestos se atraen. Esto lo podemos ver en la siguiente figura.



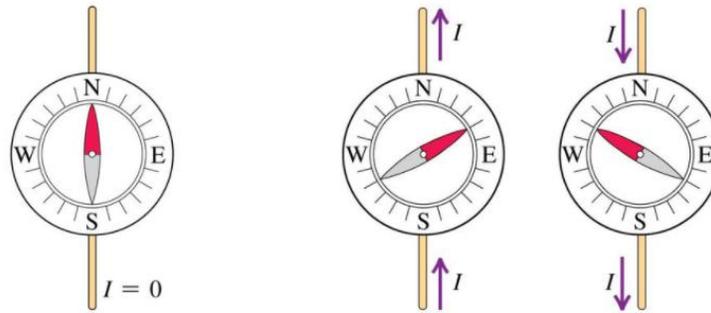
Tal y como se aprecia en la figura los polos opuestos se atraen y los similares se repelen. También se debe mencionar que siempre se van a tener dos polos en un solo componente, no se pueden aislar uno del otro. Es decir, si se tiene un polo sur necesariamente se tendrá adherido un polo norte y viceversa.

Ahora bien, para generar un campo magnético podemos hablar de dos cosas:

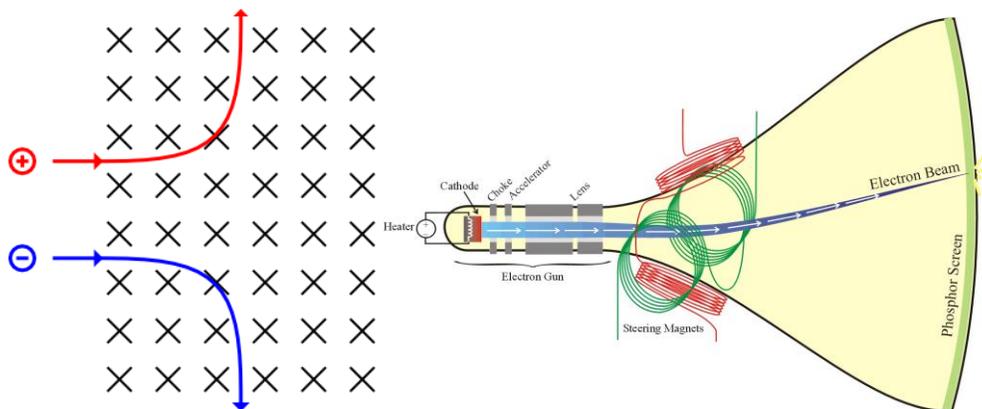
- ✓ ¿Qué podemos magnetizar?
- ✓ ¿Cómo generamos el campo magnético?

La primera pregunta será respondida con más detalle más adelante en este manual, pero brevemente podemos decir que todos aquellos materiales ferromagnéticos van a ser magnetizables y por lo tanto capaces de ser evaluados mediante partículas magnéticas.

Para responder la segunda pregunta lo mejor es empezar hablando de la siguiente figura.



En la figura anterior podemos observar como una corriente eléctrica afecta directamente un compás. Antes de responder la pregunta también necesitamos ver esta próxima figura.



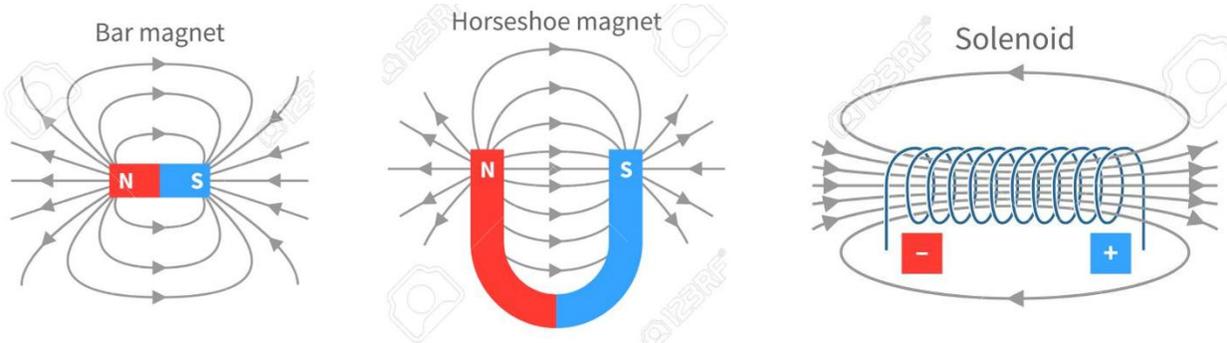
En la figura anterior vemos como una carga de voltaje positiva y/o negativa son afectadas por la presencia de un campo magnético, en la imagen de la derecha vemos la aplicación más conocida y en desuso que eran los televisores de tubos de rayos catódicos en los cuales se controlaba el disparo de los electrones a la pantalla para generar la imagen con un campo magnético.

Si hacemos un análisis de las últimas dos figuras podemos entender que los campos magnéticos y la electricidad están relacionados directamente.

Entonces, para responder la pregunta de ¿Cómo generamos el campo magnético? Tenemos que hacerlo a través del uso de corriente eléctrica y esto podríamos llamarlo específicamente Inducción Electromagnética.

2. Campos Magnéticos

Como ya se vio anteriormente la presencia de polos magnéticos generará en el espacio un campo magnético que visualmente lo podemos representar a través de líneas de flujo. En la siguiente figura, se muestran algunos ejemplos.



Tal y como se aprecia en la figura anterior tenemos tres tipos de generadores de campos magnéticos: Imán tipo barra, Imán tipo herradura y un solenoide.

Podemos hacer la acotación de que los imanes tienen los polos magnéticos que generan las líneas de flujo. Por otra parte, el solenoide tiene una corriente eléctrica que es la responsable de generar el campo magnético.

Como queda en evidencia en la figura anterior es claro que la geometría del generador del campo magnético afectará el recorrido que tendrán las líneas de flujo. Pero algo que sí podemos establecer es que las líneas de flujo siempre siguen 4 propiedades sumamente importantes:

1. Las líneas del flujo deben ser tangentes en cualquier punto de la línea de flujo.
2. A medida que la densidad de líneas de flujo es mayor la intensidad del flujo es mayor.
3. Las líneas de flujo siempre van de cargas positivas a cargas negativas. O del polo Norte al polo Sur.
4. Las líneas de flujo nunca se cruzan entre sí.
5. Las líneas de flujo siempre buscan el camino de menor resistencia.

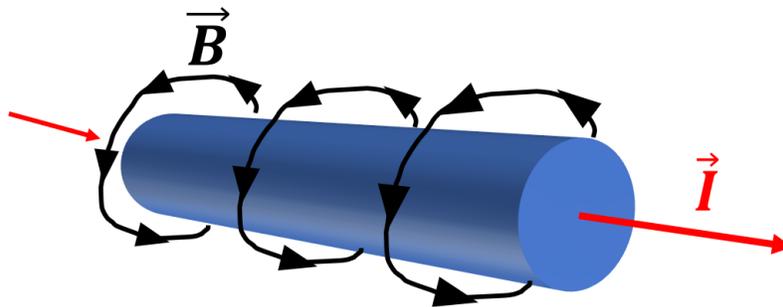
3. Magnetismo por Inducción

La inducción electromagnética es la magnetización de un componente mediante la utilización de una corriente eléctrica. Este fenómeno es crucial para el método de partículas magnéticas ya que sin las líneas de flujo saliendo de la pieza evaluada no podríamos efectuar la inspección. En la siguiente figura se aprecia un proceso de magnetización en una inspección.



En la figura anterior se aprecia la inspección de partículas magnéticas en donde se utiliza un yugo electromagnético para generar un campo magnético en la pieza evaluada.

Para entender cómo funciona la inducción electromagnética podemos basarnos en la siguiente figura.

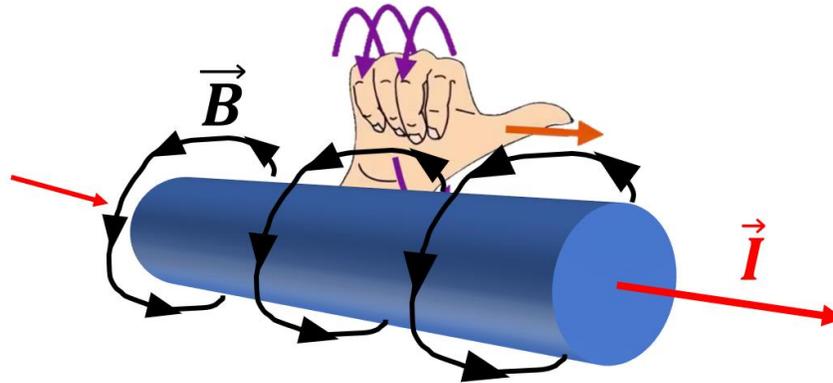


En la figura anterior vemos un cilindro azul que pensemos que básicamente es un cable conductor a través del cual pasa una corriente eléctrica denotada con la letra I.

Como ya hemos visto existe una relación entre la corriente eléctrica y los campos magnéticos y esto lo podemos apreciar en la figura anterior. Se aprecian las líneas negras denotadas por la letra B, esa letra B significa campo magnético.

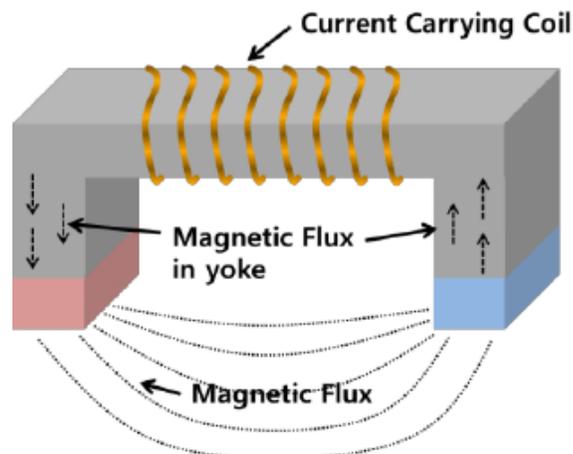
Toda corriente eléctrica generara un campo magnético perpendicular al movimiento del flujo de la corriente.

Si queremos verlo desde un punto de vista práctico y mucho más fácil de recordar podemos hablar de la conocida regla de la mano derecha que se ilustra en la siguiente figura.



Vemos que la relación entre la corriente eléctrica y el campo magnético se puede relacionar con la posición de la mano derecha colocándola de la forma en que se encuentra en la figura.

Ahora bien, si trasladamos este fenómeno al yugo electromagnético que vimos anteriormente tenemos que pensar que debe existir una corriente eléctrica pasando a través del yugo y a su vez esa corriente eléctrica estará generando un campo magnético entrará en contacto con la pieza evaluada. Esto lo podemos observar en la siguiente figura.



Tal y como se aprecia en la figura anterior un yugo electromagnético consta de un solenoide a través de la cual fluye la corriente y genera un campo magnético que pasara a través de la superficie del componente evaluado.

Ahora bien, el hecho de que el campo magnético generado por el yugo entre en contacto con un componente no significa que se magnetizara.

Ya mencionamos anteriormente que una condición es que el material tenga la capacidad de ser magnetizado y para ello debe ser un material ferromagnético.

Un material ferromagnético al ser sometido a una carga eléctrica o a un campo magnético resultará en un proceso de magnetización a través de la reorientación de sus dominios magnéticos, esto será explicado más adelante.

4. Definiciones, Unidades y Formulas de Medición Electromagnética

Ya que tenemos una base teórica de la magnetización es momento de definir algunos conceptos y establecer las unidades de medición que se utilizan en este campo de la física.

Imán: Un imán es un cuerpo con magnetismo. Dicho magnetismo es capaz de atraer otros imanes o metales ferromagnéticos como hierro, cobalto, níquel, entre otros.

Electroimán: Un electroimán es un tipo de imán en el que el campo magnético que produce se debe al flujo de una corriente eléctrica. Normalmente un electroimán consiste de un embobinado de alambre con una corriente eléctrica que fluye a través de este embobinado, un ejemplo sería el yugo electromagnético que se mostró previamente en este manual.

Líneas de Flujo: Las líneas de flujo de un campo magnético son las líneas ficticias que van del polo norte de un imán al polo sur. Estas líneas nos ayudan a comprender el comportamiento del campo magnético al igual que visualizar su campo de acción.

Campo Magnético: El campo magnético es una zona en la que la fuerza magnética actúa. Desde un punto de vista físico el campo magnético se representa con la letra H.

Retentividad: Es la capacidad que tiene un material de mantener un campo magnético luego de la remoción de la fuerza magnetizante.

Magnetismo Residual: El campo magnético remanente es un campo magnético generado por un material ferromagnético que fue previamente magnetizado por un campo magnéticos externo y luego fue removido. La remanencia de esa magnetización es la que genera el campo magnético remanente.

Flujo Magnético: El flujo magnético representa la superficie a través de la cual el campo magnético B. El flujo magnético se representa con la letra Φ .

Maxwell: El maxwell (Mx) es la unidad del sistema CGS (Centímetro – Gramo – Segundo) para representar el flujo magnético Φ_B .

Weber: El weber (Wb) es la unidad del sistema internacional SI para representar el flujo magnético Φ_B . $1\text{Wb} = 10^8\text{Mx}$.

Densidad de Flujo: La densidad de flujo magnético básicamente es el flujo magnético del campo magnético por unidad de área de una sección normal a la dirección del flujo. Se representa con la letra B.

Gauss: El gauss (G) es la unidad del sistema CGS (Centímetro – Gramo – Segundo) para representar la densidad del flujo magnético Φ_B .

Tesla: El tesla (T) es la unidad del sistema internacional SI para representar el flujo magnético Φ_B en donde el T básicamente es Wb/m^2 . Tenemos que $1Wb/m^2 = 1T = 10^4G$.

Permeabilidad Magnética: La permeabilidad magnética es la capacidad que tienen los materiales conductores de atraer y conducir líneas de flujo. Dicho de otra forma, es la medida de que tan fácil el componente se magnetiza. La permeabilidad magnética se denota por la letra μ .

Reluctancia: La reluctancia magnética es la resistencia que tiene un material al paso del flujo magnético. Es decir, a mayor reluctancia será más difícil que el flujo magnético pase. Por lo tanto, un material con alta permeabilidad magnética significa menor reluctancia.

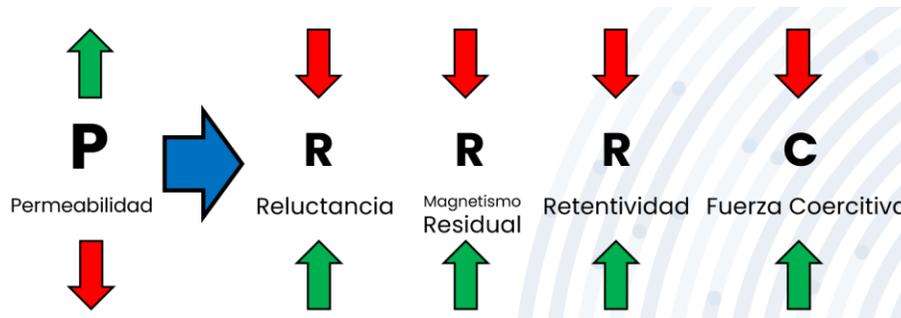
Fuerza Coercitiva: La fuerza coercitiva es la intensidad que se requiere aplicar del campo magnético para desmagnetizar el material ferromagnético.

Histéresis Magnética: La histéresis magnética es el fenómeno que ocurre cuando un campo magnético externo se aplica sobre un componente magnetizable y luego de remover dicho campo magnético la pieza producto de la magnetización genera un campo magnético.

Dominios Magnéticos: Los dominios magnéticos son regiones dentro de un material en donde la magnetización en dicho dominio está alineada. Los materiales ferromagnéticos están conformados por estos dominios y si todos los dominios magnéticos se alinean tendremos un componente magnetizado. Esto explica porque el hierro no es espontáneamente magnético, debe pasar por un proceso de magnetización.

1.1 Regla Nemotécnica de Interrelación Magnética – PRRRC

Una herramienta sumamente útil para saber las relaciones entre algunas propiedades magnéticas es PRRRC. El significado de este acrónimo lo podemos ver en la siguiente figura.



Tal y como se aprecia en la figura anterior existe una relación entre la permeabilidad magnética y el resto de las propiedades. Entonces podemos decir que:

A medida que la permeabilidad magnética es mayor:

- ✓ Disminuye la reluctancia. Es decir, se magnetiza más fácilmente.
- ✓ Disminuye el magnetismo residual. Es decir, que se tiene menos campo magnético residual.

- ✓ Disminuye la Retentividad. Es decir, que es más difícil de mantener el campo magnético residual.
- ✓ Disminuye la fuerza coercitiva. Es decir, se requiere de menos energía para desmagnetizar el componente.

Por el otro lado, a medida que la permeabilidad magnética es menor:

- ✓ Aumenta la reluctancia. Es decir, es más difícil de magnetizar.
- ✓ Aumenta el magnetismo residual. Es decir, que se tiene más campo magnético residual.
- ✓ Aumenta la Retentividad. Es decir, que es más fácil de mantener el campo magnético residual.
- ✓ Aumenta la fuerza coercitiva. Es decir, se requiere de más energía para desmagnetizar el componente.

5. Materiales Magnéticos

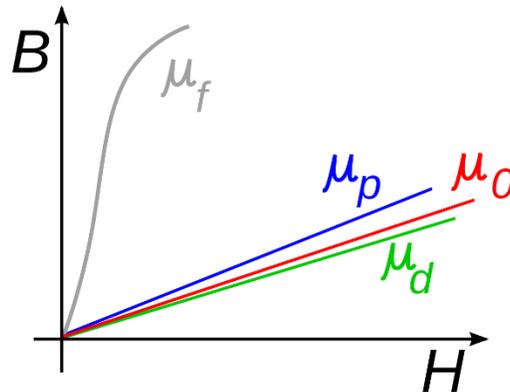
Podemos decir que todos los materiales poseen propiedades magnéticas ya que ciertamente se verán afectados por los campos magnéticos a cierto grado.

Evidentemente que tanto afectara el campo magnético a un material dependerá del tipo de material que entre en contacto con el campo magnético. Desde un punto de vista general y sin entrar mucho en la teoría sabemos que existen materiales conductores como el cobre y materiales aislantes como el caucho.

Solo pensando en eso podemos darnos cuenta de la variedad en comportamiento que puede existir y esto será producto de la permeabilidad magnética μ que tenga cada material.

Podemos distinguir tres grandes grupos de materiales: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos. Ahora bien, una variable que es sumamente importante y que determina el tipo de material es la permeabilidad magnética.

A manera de ilustrar las diferencias de valores de permeabilidad magnética en función del tipo de material observemos la siguiente figura.



En la imagen anterior observamos un eje de coordenadas que evalúa el flujo magnético B en función al campo magnético H de un material. Dependiendo de la permeabilidad magnética del material la relación entre estas variables tendrán distintos comportamientos.

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío.

μ_f = Permeabilidad magnética de un material ferromagnético

μ_p = Permeabilidad magnética de material paramagnético.

μ_d = Permeabilidad magnética de un material diamagnético.

La relación entre B, H y μ se puede definir en una ecuación que es la siguiente.

$$B = \mu \times H$$

Material Diamagnético: Un material diamagnético es aquel material que tiene una permeabilidad magnética por debajo de 1. Algunos materiales diamagnéticos son: Oro, zinc, bismuto y mercurio.

Estos materiales cuando son colocados en campos magnéticos su campo magnético inducido van en el sentido opuesto generando el fenómeno de repulsión. Esta es una magnetización muy débil que no suele mantenerse luego de la remoción del campo magnético.

Material Paramagnético: Un material paramagnético es aquel material que tiene una permeabilidad magnética por encima de 1. Algunos materiales paramagnéticos son: Aluminio, plata, madera, entre otros.

Cuando este material se encuentra en dentro de un campo magnético se alineará y será atraído por este. El magnetismo no se mantiene luego de la remoción del campo externo.

Material Ferromagnético: Un material ferromagnético es aquel material que tiene una permeabilidad magnética muy por encima de 1. Algunos materiales ferromagnéticos son: Hierro, cobalto, níquel, algunas aleaciones de cobre, algunas aleaciones de aluminio, entre otros.

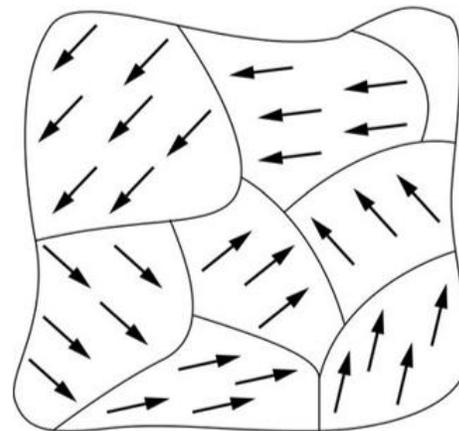
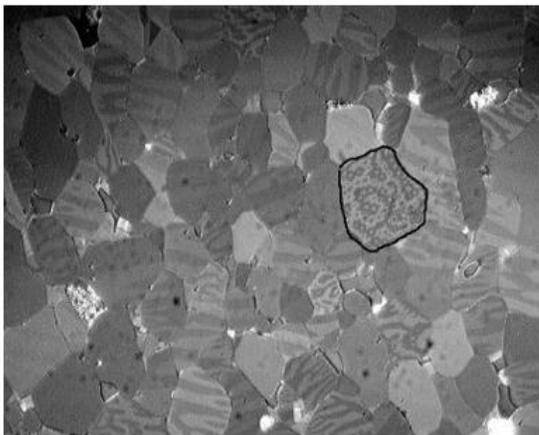
La siguiente sección especificar en detalle sobre los materiales ferromagnéticos.

6. Materiales Ferromagnéticos y Dominios Magnéticos

Los materiales ferromagnéticos son aquellos materiales que son fuertemente atraídos por las fuerzas magnéticas y esto se debe a que este tipo de material se magnetiza fácilmente.

La permeabilidad magnética que tienen estos materiales es sumamente alta y es por ello que son fácilmente magnetizables.

Ahora bien, la facilidad que poseen estos materiales de magnetizarse se explica a través de la presencia de los dominios magnéticos que conforman estos materiales. La mejor manera de explicarlo es a través de la siguiente figura.

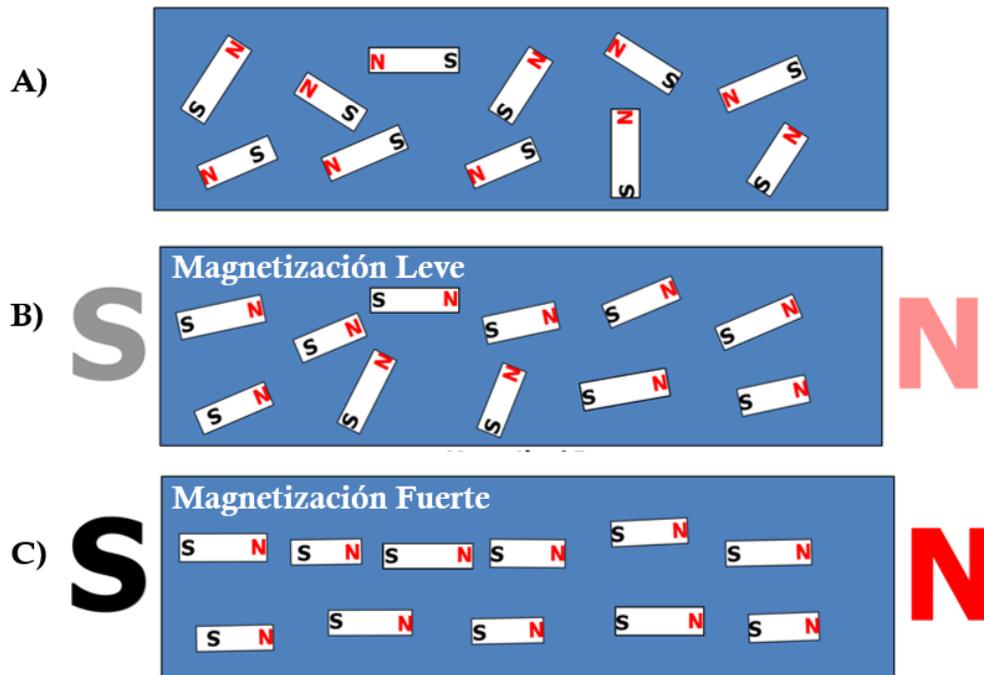


Tal y como apreciamos en la figura anterior y sin entrar en mucha profundidad en ciencias de los materiales podemos ver que los materiales ferromagnéticos están conformados por unas regiones claramente definidas. Estas regiones las podemos llamar granos en el mundo de ciencias de los materiales y a su vez las podemos llamar dominios magnéticos.

Cada uno de estos dominios tiene polaridad positiva y negativa, esto significa que cada uno de los dominios es como si fuera una especie de imán. Ahora bien, como se aprecia en la figura anterior todos estos dominios no tienen una orientación global definida, pero si

logramos orientar todos los dominios generaríamos una especie de imán gigante y básicamente este es el proceso de magnetización.

En la siguiente figura podemos observar cómo los dominios magnéticos se alinean debido a una fuerza de magnetización externa.



Tal y como se aprecia en la figura anterior a medida que la fuerza de magnetización se imprime sobre el componente ferromagnético los dominios se alinean hasta generar dos polos magnéticos globales.

Una vez que la fuerza de magnetización externa se remueve del componente los dominios magnéticos mantienen su orientación queriendo decir que el componente retiene cierta cantidad del magnetismo impreso y por lo tanto genera su propio campo magnético que para nosotros como inspectores de partículas magnéticas es lo que ciertamente nos interesa.

Gracias a ese campo magnético que permanecerá en la pieza podemos proceder a utilizar las partículas magnéticas para evaluar el flujo magnético que recorre la pieza.

A manera de resumen podemos decir que los materiales ferromagnéticos tienen las siguientes características:

- Son fuertemente atraídos por campo magnéticos.
- Son capaces de mantener cierta cantidad de magnetismo debido a la alineación de los dominios magnéticos.
- La permeabilidad magnética de estos materiales es bastante alta.

7. Materiales y Magnetización

Como se ha observado a lo largo de este manual, sabemos que el material debe tener las características adecuadas para poder ser candidato para ser evaluado mediante el método de partículas magnéticas. En este apartado hablaremos de algunos materiales específicos, que podemos encontrar con recurrencia en las diversas industrias, y evaluaremos su capacidad de ser evaluado mediante el método.

Acero Inoxidable: El acero inoxidable es un material ferromagnético que se magnetiza fácilmente. Sin embargo, la magnetización puede variar según la composición química y el tratamiento térmico del acero inoxidable.

Acero Inoxidable Ferrítico: El acero inoxidable ferrítico es un tipo de acero inoxidable que contiene cromo y hierro, son magnéticos y su estructura metalográfica está formada básicamente por ferrita. Es un material ferromagnético que se magnetiza fácilmente.

Aceros Inoxidables Austeníticos: Los aceros inoxidables austeníticos son un tipo de acero inoxidable que contienen níquel, cromo y hierro. Son materiales paramagnéticos que no se magnetizan fácilmente.

Aceros Inoxidables Martensíticos: Los aceros inoxidables martensíticos son un tipo de acero inoxidable que contienen cromo y hierro, se caracterizan por su estructura cristalina martensítica. Son materiales ferromagnéticos que se magnetizan fácilmente.

Aceros Aleados: Los aceros aleados son materiales ferromagnéticos que se magnetizan fácilmente. La capacidad de magnetización puede variar según la composición química y el tratamiento térmico del acero.

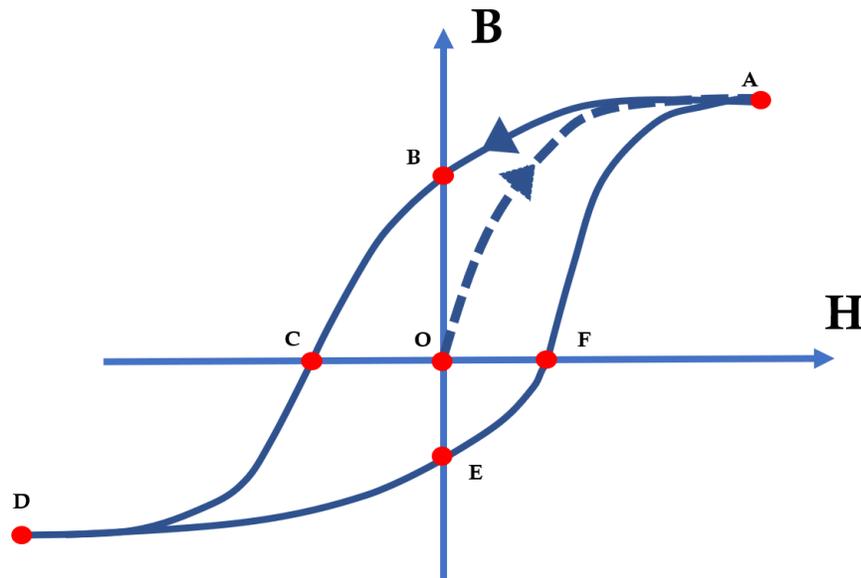
Aceros de alto contenido de carbono: Los aceros de alto contenido de carbono son materiales ferromagnéticos que se magnetizan fácilmente. La capacidad de magnetización puede variar según la composición química y el tratamiento térmico del acero.

8. Curva de Histéresis

Como ya se definió anteriormente la histéresis magnética es el fenómeno que ocurre cuando un campo magnético externo se aplica sobre un componente magnetizable y luego de remover dicho campo magnético la pieza producto de la magnetización genera un campo magnético.

Por otra parte, sabemos que los materiales magnetizables son los materiales ferromagnéticos y dependiendo del material su capacidad de ser magnetizado variara (no todos los materiales son iguales).

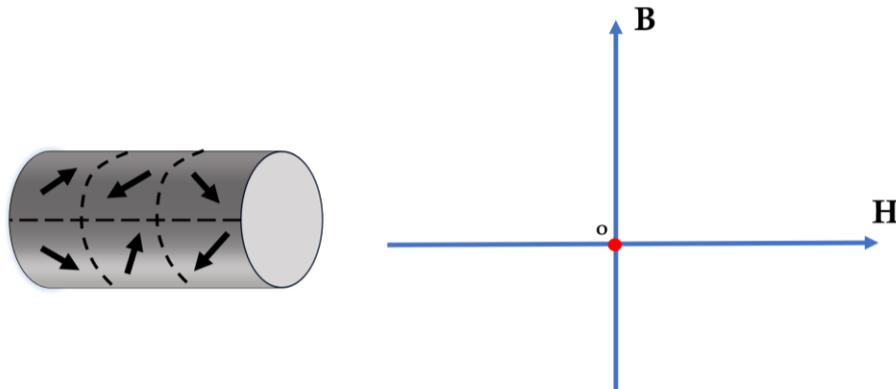
Mediante la curva de histéresis magnética podemos en primer lugar observar cómo se da el fenómeno de magnetización y en segundo lugar podemos evaluar las características de cada fenómeno material. A continuación, podemos observar la curva.



Tal y como se aprecia en la figura anterior la curva de histéresis se presenta en un plano cartesiano que relaciona H y B. Pero por otra parte vemos que nuestra curva de histéresis posee varias partes definidas en la figura. Estas partes son:

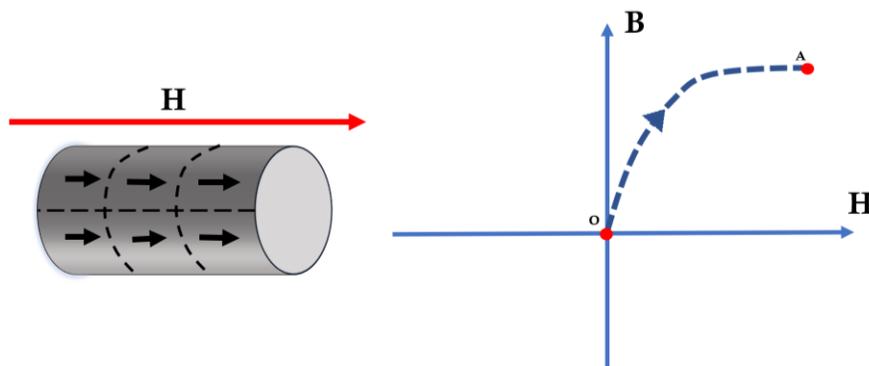
- O: Componente desmagnetizado.
- A: Componente magnetizado con saturación máxima.
- B: Magnetismo residual en el componente cuando $H=0$.
- C: Fuerza coercitiva para llevar B a 0.
- D: Componente magnetizado con saturación máxima.
- E: Magnetismo residual en el componente cuando $H=0$.
- F: Fuerza coercitiva para llevar B a 0.

Para entender qué es lo que estamos observando en la curva de histéresis veremos cada una de las etapas.



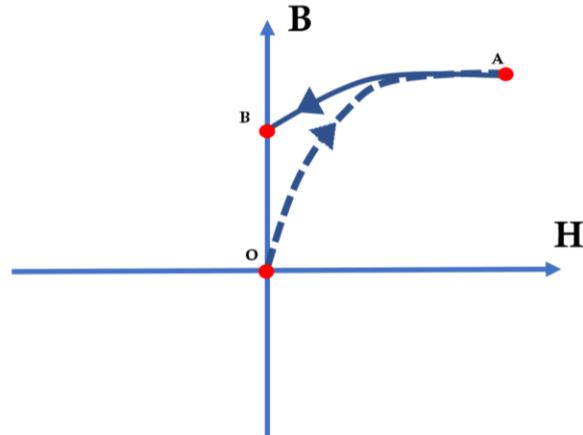
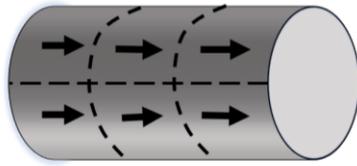
El punto O es el origen de la curva de magnetización, en este punto el componente metálico se encuentra desmagnetizado y cómo podemos apreciar los dominios magnéticos no se encuentran alineados.

Cuando se le aplica un campo magnético a la barra comienza el proceso de orientación de los dominios y cómo podemos observar en la siguiente figura como a poco se llega al punto A.



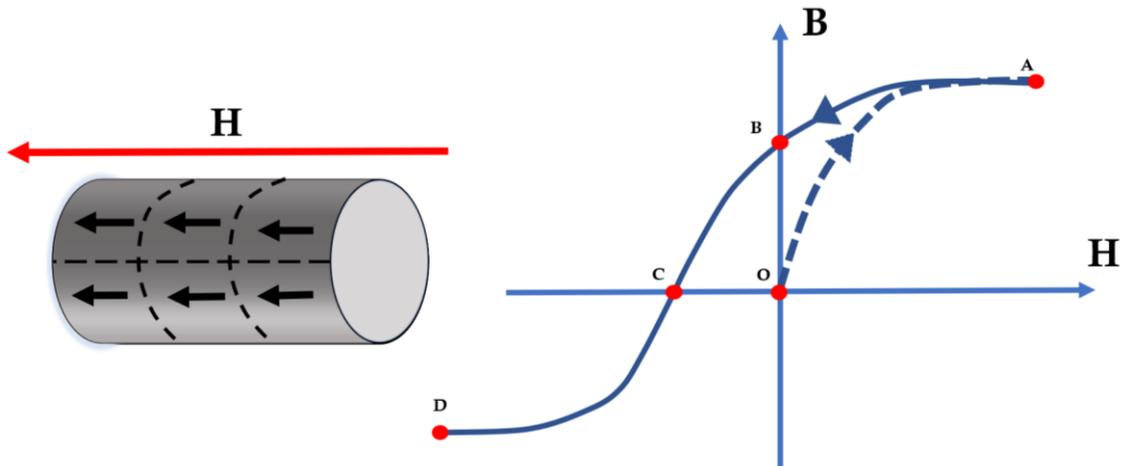
Cuando se llega al punto A significa que el material ha llegado a su punto máximo de magnetización que básicamente sería su saturación magnética. Este tramo O-A nos da una idea de la permeabilidad magnética que tiene el componente.

Luego si procedemos a remover el campo magnético externo la curva de histéresis ira del punto A al punto B tal y como observamos a continuación.



Podemos observar que al remover el campo magnético externo los dominios magnéticos del material se mantienen alineados y esto quiere decir que el componente se mantiene magnetizado. Esa magnetización remanente se ve representada en la curva de histéresis como el punto B, en ese punto no tenemos un campo magnético externo H, pero mantenemos una magnetización remanente.

Si procedemos a aplicar un campo magnético externo, pero en el sentido opuesto al aplicado inicialmente veremos cómo la curva de histéresis va del punto B hasta el punto D, pasando por el punto C.

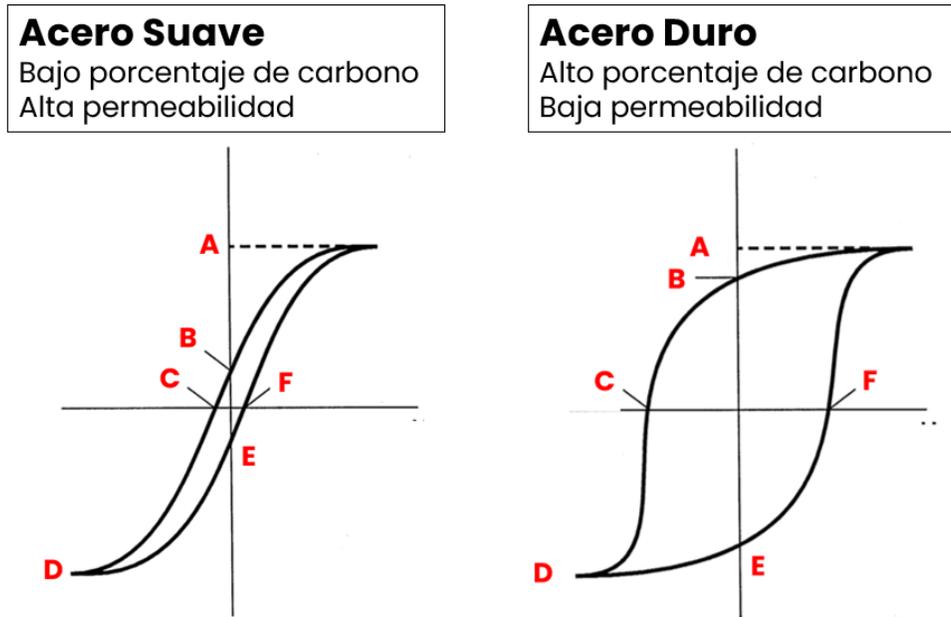


El punto C hace referencia a la fuerza coercitiva que se necesita para regresar al punto (0,0) que significa que el material se encuentra desmagnetizado. Si se mantiene la magnetización se llegará al punto de saturación D.

Finalmente, si repetimos la magnetización en el sentido inicial cerraremos el ciclo de la curva de histéresis.

Dependiendo del tipo de material la curva de histéresis variará levemente. Se pueden definir dos tipos de aceros que tienen curvas de histéresis características, estos son: Acero Duro y Acero Suave.

De manera comparativa podemos observar la siguiente figura.



La imagen A de la figura anterior hace alusión a la curva de histéresis de un acero suave y la imagen B hace referencia a la curva de histéresis de un acero duro.

7.1 Curva de Histéresis de Acero Duro

Al evaluar la curva de histéresis de un acero duro es muy fácil ver que la fuerza de magnetización que se requiere para efectivamente magnetizar este tipo de material es mayor que la necesaria para un acero suave.

Pero, por otra parte, el acero duro retendrá un campo magnético residual mucho mayor que los que podría retener un acero suave.

En la siguiente lista sintetizamos las características de un acero duro:

- ✓ Baja Permeabilidad – Es difícil de magnetizar.
- ✓ Alta Retentividad – Mantiene un campo magnético residual fuerte.
- ✓ Alta Reluctancia – Tiene una alta resistencia a la fuerza de magnetización.
- ✓ Magnetismo residual alto – Mantiene un campo magnético residual fuerte.
- ✓ Alta fuerza coercitiva – Requiere de una fuerza magnética alta para remover la magnetización.

7.2 Curva de Histéresis de Acero Suave

La curva de los aceros suaves podríamos decir que es el opuesto de los aceros duros ya que se magnetizan fácilmente y la fuerza del campo magnético residual es bajo en comparación a un acero duro.

En la siguiente lista sintetizamos las características de un acero suave:

- ✓ Alta Permeabilidad – Es fácil de magnetizar.
- ✓ Baja Retentividad – Mantiene un campo magnético residual débil.
- ✓ Baja Reluctancia – Tiene una baja resistencia a la fuerza de magnetización.
- ✓ Magnetismo residual bajo – Mantiene un campo magnético residual débil.
- ✓ Baja fuerza coercitiva – Requiere de una fuerza magnética baja para remover la magnetización.

9. Desmagnetización

La desmagnetización de un componente es un proceso sumamente importante sobre todo para las inspecciones de ensayos no destructivos. A continuación, podemos listar algunos de los motivos por los cuales la desmagnetización es tan importante:

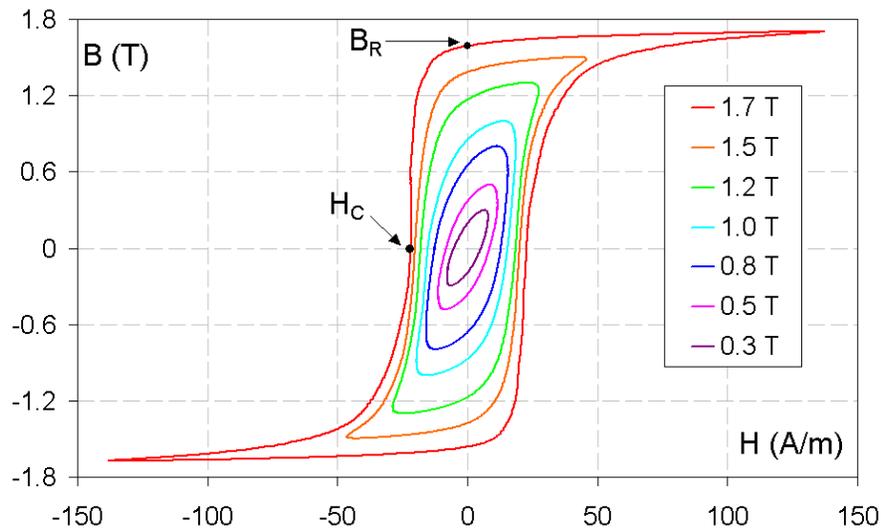
- ✓ La magnetización puede interferir con operaciones de maquinado en donde la viruta puede adherirse a los componentes de maquinado y estropear el proceso.
- ✓ La magnetización interfiere con la plasma ionizada en los procesos de soldadura.
- ✓ Interfiere con componentes dinámicos adhiriéndose a ellos y causando posibles problemas en operación.
- ✓ Piezas pequeñas que se encuentren magnetizadas se unirán entre sí.

Ciertamente la desmagnetización es sumamente importante ya que como podemos ver por los puntos anteriores puede tener efectos negativos en distintos procesos.

Ahora bien, en el caso de que la magnetización no influya en las operaciones posteriores en el uso de dicho componente podríamos decir que la desmagnetización no es necesaria, pero a fin de cuentas la responsabilidad de decidir si la pieza se debe desmagnetizar o no tiene que recaer en un procedimiento específico en el que se estipulen los motivos por los cuales sí o no se deba desmagnetizar. O en caso de que haya un magnetismo residual permisible que se estipule.

Existen distintos métodos de desmagnetización, pero el método específico dependerá normalmente del tamaño de la pieza.

El proceso de desmagnetización se puede explicar mediante la curva de histéresis. Lo que se debe hacer es realizar ciclos de la curva con corriente alterna en donde gradualmente se va disminuyendo la intensidad, lo que poco a poco generara una magnetización próxima a cero. Este proceso se puede observar en la siguiente figura.



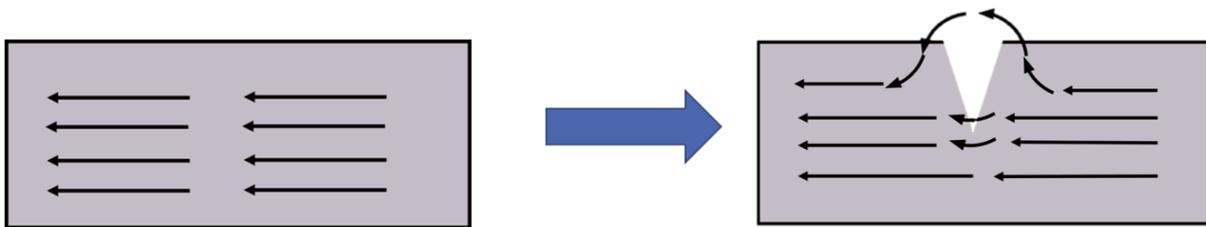
Como se aprecia en la figura anterior la curva de histéresis poco a poco va disminuyendo en tamaño significando que la magnetización de la pieza va disminuyendo, pero claramente vemos que no llega al valor de cero. Es prácticamente imposible desmagnetizar totalmente un componente mediante una desmagnetización “tradicional”.

La única forma de desmagnetizar totalmente un componente es mediante un aumento de temperatura por encima de la temperatura de Curie que para los aceros es aproximadamente 770°C. De manera breve, podemos decir que la temperatura de Curie es la temperatura a partir de la cual los componentes ferromagnéticos pierden su magnetismo y tienen un comportamiento paramagnético.

Capítulo 3: Magnetización e interacción con las discontinuidades

En este capítulo estudiaremos como podemos sacarle provecho al campo magnético para poder detectar discontinuidades en los componentes evaluados mediante el método de partículas magnéticas.

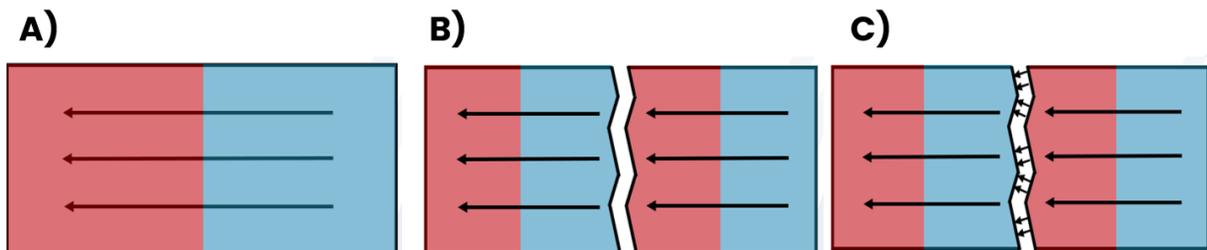
Lo primero que nos interesa entender es como mediante el campo magnético podemos detectar discontinuidades y para ello la mejor manera de entender este fenómeno es de manera visual. En la siguiente figura podemos ver dicho fenómeno.



Aquí podemos observar cómo las líneas de flujo magnético en un componente sin discontinuidades tienen un recorrido lineal a lo largo de dicho bloque y al comparar las mismas líneas de flujo con un bloque con una discontinuidad vemos como estas líneas escapan a la superficie.

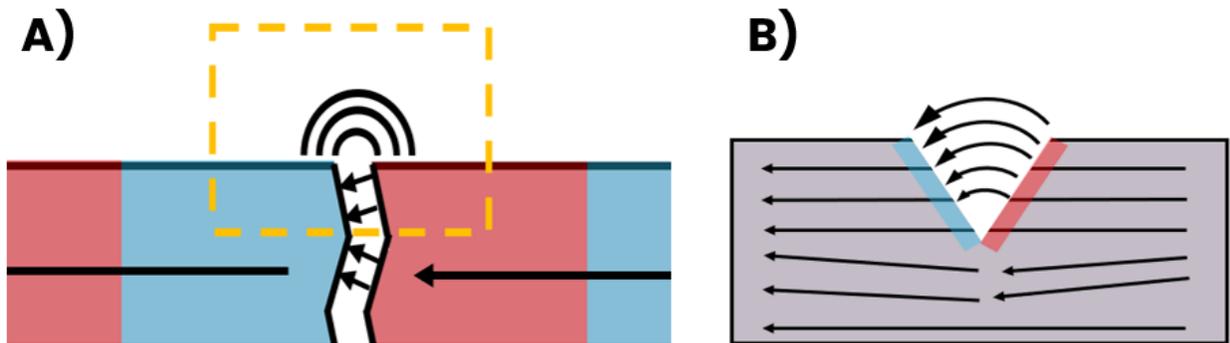
Ahora bien, ¿que motiva a las líneas de flujo a escapar de esta manera? En la siguiente figura podemos observar el fenómeno paso a paso.

Pensemos en un imán, este tiene sus polos norte y sur. Ahora que sucede si este imán se fractura completamente. Se generarán dos imanes, tal y como se aprecia en la siguiente figura.



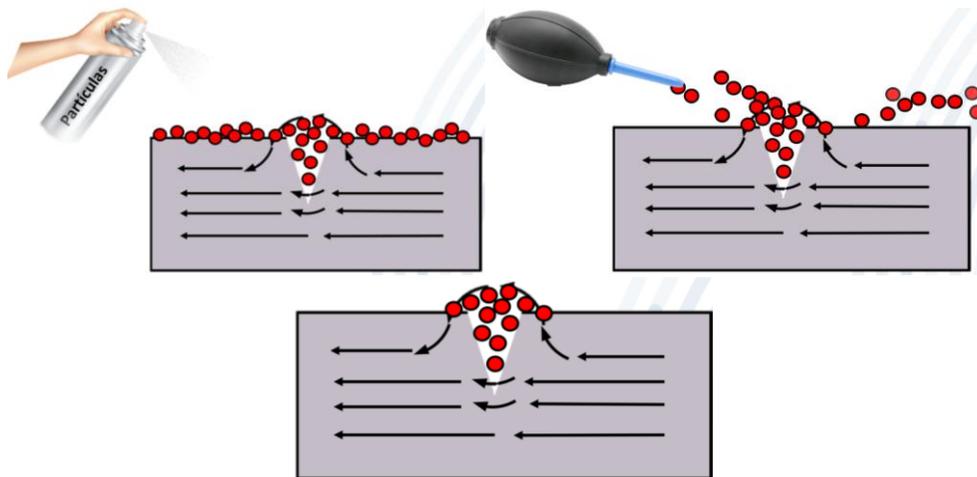
Tal y como se aprecia en la figura anterior en la parte A observamos una imagen en perfectas condiciones. En la parte B apreciamos un imán fracturado que genera dos imanes independientes, cada uno con sus polos magnéticos. Por último, tenemos la imagen C que señala como las líneas de flujo provenientes del polo norte de uno de los imanes terminan en el polo sur del otro imán.

Ahora bien, si en vez de fracturar el imán en su totalidad consideramos solamente una grieta presente en la superficie. Para ello observemos la siguiente figura.



Si observamos la figura anterior, la imagen A hace un acercamiento al extremo de los dos imanes independientes. Si esto lo pensamos de una manera macro podemos asumir que es una grieta. De una manera más grafica se ilustra en la imagen B como el flujo magnético se escapa del componente debido a la presencia de la discontinuidad.

Sabiendo que el flujo escapa debido a la presencia de una discontinuidad podemos implementar alguna herramienta para detectar estas líneas de flujo que escapan del bloque por transitividad estaríamos detectando la discontinuidad en el bloque. Y aquí se puede utilizar el método no destructivo de partículas magnéticas como mecanismo para detectar las líneas de flujo. En la siguiente figura podemos apreciar de manera general este método:



Se observa cómo se aplican las partículas sobre la superficie del material magnetizado. Luego se remueve el exceso de partículas y en caso de que haya líneas de flujo que escapen la superficie del material evaluado solamente se irán aquellas que no estén bajo la influencia de este campo. Esto revelaría la ubicación de la discontinuidad que genera el escape del flujo magnético.

1. Interacción entre discontinuidades y campo magnético

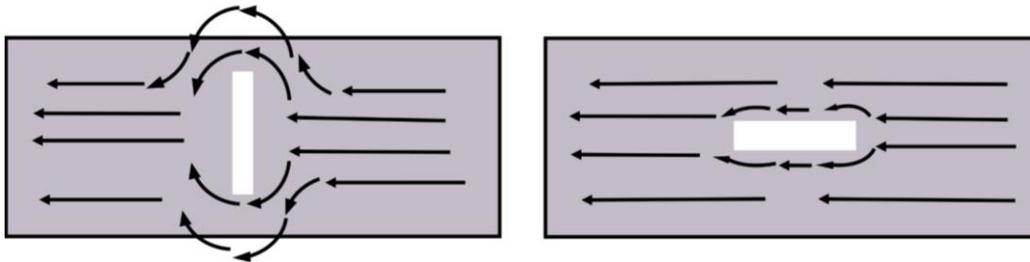
Podemos distinguir dos tipos de discontinuidades las cuales pueden ser detectadas por el método de partículas magnéticas siempre y cuando las condiciones de interacción entre estas y el campo magnético lo permitan. Estas son:

- ✓ Discontinuidades Superficiales.
- ✓ Discontinuidades Subsuperficiales.

La forma e intensidad de la indicación generada dependerá de algunos factores además del tipo de discontinuidad. Algunos de estos factores son la proximidad de la discontinuidad con la superficie, el tamaño, la orientación, la intensidad y distribución del flujo magnético.

Cada una de las variables mencionadas anteriormente debe ser tomada en cuenta. Un ejemplo claro sería si la discontinuidad es muy profunda y la magnetización del componente no llega hasta dicha profundidad entonces dicha discontinuidad pasará desapercibida.

La interacción entre la discontinuidad y las líneas de flujo magnético es crucial para tener buenos resultados en la inspección mediante partículas magnéticas. La mejor manera de entender esto es con un ejemplo visual, para ello evaluemos la siguiente figura:



En ambos bloques tenemos la misma magnetización con una discontinuidad del mismo tamaño, pero la única diferencia es la orientación de la discontinuidad en función de las líneas de flujo.

En el primer caso la discontinuidad se encuentra perpendicular a las líneas de flujo y esto genera que las líneas de flujo escapen del cuerpo del componente evaluado y sean fácilmente detectables por el método de partículas magnéticas.

En el segundo caso la discontinuidad se encuentra paralela a las líneas de flujo y se observa que la discontinuidad prácticamente no ejerce ninguna incidencia sobre el recorrido de las líneas de flujo y en consecuencia genera que la discontinuidad sea imperceptible por parte del método de partículas magnéticas.

De estos dos ejemplos se puede deducir que la dirección del flujo magnético en función de la orientación de la discontinuidad siendo evaluada es sumamente importante. Esto definirá el éxito o el fracaso de este método de inspección.

Por lo tanto, como inspectores tenemos que entender la gran influencia que tiene la correcta magnetización del componente para que el resultado de nuestra inspección sea deseable.

Como regla general siempre tenemos que buscar que las líneas de flujo y las discontinuidades sean perpendiculares para maximizar la interacción u la detectabilidad por parte del método.

1.1 Discontinuidades Superficiales

Las discontinuidades superficiales son aquellas que son abiertas a la superficie, tal como una grieta.

Este tipo de discontinuidades forman indicaciones angostas y bien definidas.

La orientación entre la discontinuidad y el flujo del campo magnético afecta la intensidad de la fuga y por lo tanto de la magnetización de las partículas magnéticas. Debido a que las discontinuidades no tienen una forma definida, para esto podemos pensar en una grieta, es recomendable magnetizar el componente en distintas direcciones para garantizar la correcta detección de la discontinuidad.

1.2 Discontinuidades Subsuperficiales

Las grietas subsuperficiales se encuentran dentro del volumen de la pieza inspeccionada y no son abiertas a la superficie.

Al igual que las discontinuidades superficiales las subsuperficiales generan un desplazamiento de las líneas de flujo. En el caso de las subsuperficiales existen algunas consideraciones a tomar en cuenta para garantizar que las partículas en la superficie serán capaces de detectar ese efecto.

Las indicaciones generadas por discontinuidades subsuperficiales normalmente son anchas y difusas a diferencia de las generadas por discontinuidades superficiales.

1.3 Fuga de flujo y la generación de la indicación

Si pensamos propiamente en que genera la indicación nos daremos cuenta que no es la indicación sino la fuga del campo magnético (que en parte es producto de la discontinuidad).

La indicación solamente se genera por las partículas magnéticas que son atraídas por esta fuga de flujo. Si esta fuga tiene mucha fuerza de atracción la cantidad de partículas que podrá atraer será mayor y viceversa.

Por lo tanto, es importante pensar en que factores afectan para que la intensidad de esa fuga sea la mayor posible para que tengamos la mejor capacidad de detección. Algunos de estos factores son:

- La densidad de flujo de la fuga.
- La condición de la superficie.
- La fuerza del flujo magnético generado.

Si evaluamos específicamente las variables que afectan la densidad del flujo de la fuga podemos ver las siguientes:

- La longitud de la discontinuidad.
- La profundidad de la discontinuidad.
- La forma de la discontinuidad.
- La orientación con respecto al flujo magnético.

1.4 Formación de la indicación

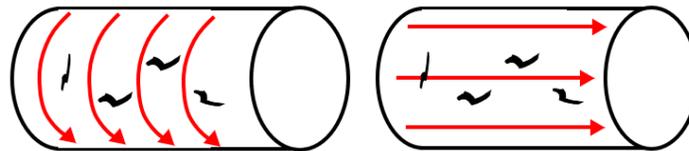
Como ya hemos observado sabemos que la presencia de una discontinuidad genera un escape de flujo y si aplicamos partículas magnéticas sobre dicha superficie la magnetización atraerá dichas partículas debido a la interacción de los polos magnéticos, concentrando un cúmulo de partículas que serán visible para el ojo humano y subsecuentemente podremos catalogar como indicación y evaluarla correspondientemente.

2. Tipos de Magnetización

Como hemos observado la dirección de la magnetización es sumamente importante ya que esto es algo que podemos controlar a diferencia de la orientación de la discontinuidad.

Por lo tanto, podemos hablar de dos tipos de campos magnéticos que pueden ser generados en el componente a evaluar, estos son:

- ✓ Magnetización Circular
- ✓ Magnetización Lineal



Para generar estos tipos de magnetización se deben implementar técnicas de magnetización para inducir el campo magnético en el componente evaluado. Podemos mencionar tres maneras en las cuales podemos generar el campo magnético en el componente:

1. Implementando un imán permanente o un electroimán que entre en contacto con el componente.
2. Pasando un flujo eléctrico a través del componente evaluado.
3. Pasando un flujo eléctrico a través de una bobina o un cable enrollado alrededor de la pieza evaluada.

Ahora bien, estas tres maneras de magnetizar el componente las podemos agrupar en dos grupos:

- ✓ Inducción Directa

✓ Inducción Indirecta

1.1 Inducción Directa

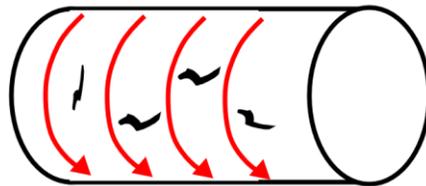
La inducción directa es aquella que genera el campo magnético a raíz del flujo eléctrico que fluye a través del componente y en consecuencia genera la magnetización del mismo.

1.2 Inducción Indirecta

La inducción indirecta es aquella que genera el campo magnético sin introducir una corriente eléctrica en el componente evaluado, sino que se genera debido a la interacción con un componente externo. Es decir, el componente evaluado se aproxima a un campo magnético fuerte y este induce una magnetización en el componente.

1.3 Magnetización Circular

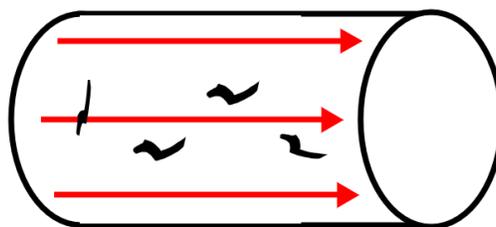
Cuando se aplica una magnetización circular sobre un componente esto quiere decir que el campo magnético generado, en el componente evaluado, sigue un recorrido circular. Tal y como se aprecia en la siguiente figura.



En este caso se aprecia como el campo magnético tiene un recorrido “circular” sobre el componente. Con este tipo de magnetización la técnica de partículas magnéticas será capaz de detectar discontinuidades perpendiculares, en el caso de la figura anterior, aquellas discontinuidades paralelas al eje del componente.

1.4 Magnetización Lineal

Cuando se aplica una magnetización lineal sobre un componente esto quiere decir que el campo magnético generado, en el componente evaluado, sigue un recorrido lineal. Tal y como se aprecia en la siguiente figura.



En este caso se aprecia como el campo magnético tiene un recorrido lineal sobre el componente. Con este tipo de magnetización la técnica de partículas magnéticas será capaz

de detectar discontinuidades que sean perpendiculares al campo, en el caso de la figura anterior, aquellas discontinuidades perpendiculares al eje del componente.

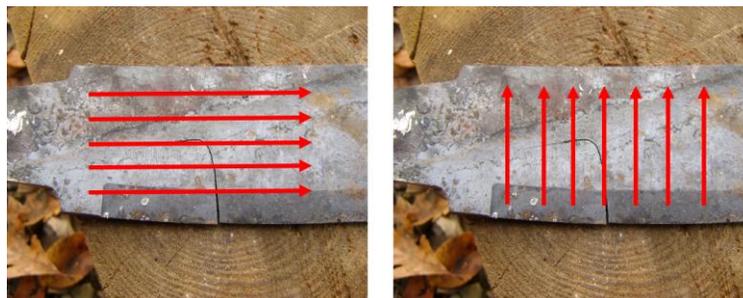
2.3 Magnetización Multidireccional

Como ya hemos observado la perpendicularidad entre la discontinuidad y la dirección del campo magnético brinda la mayor interacción y por lo tanto detectabilidad.

Si pensamos en la geometría real de una discontinuidad no podemos pensar que a lo largo de toda su extensión tendrá una sola orientación, en la siguiente figura podemos observar una grieta en un caso real.



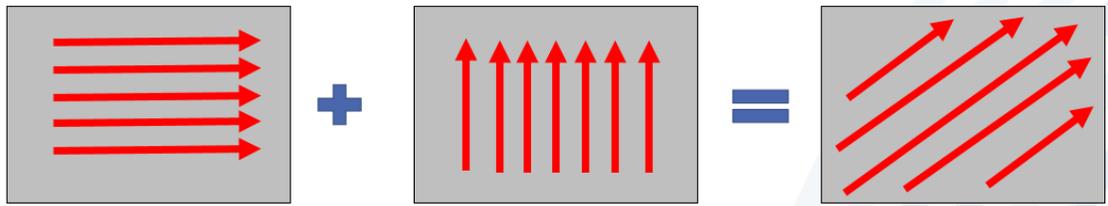
Tal y como se observa en la figura anterior el componente tiene una grieta que no tiene una sola dirección. Por lo tanto, para poder detectar toda la extensión de esta grieta se debería magnetizar en dos sentidos, esto se puede apreciar en la siguiente figura.



Cada magnetización permitirá observar aquella región de la grieta que no es posible de observar con la otra magnetización.

Ahora bien, ¿qué sucede si solapamos dos tipos de corriente al mismo tiempo en una pieza?

En una primera instancia debemos decir que dos campos distintos en un solo componente interactuarán para generar un único campo magnético resultante. Algo parecido a lo que podemos observar en la siguiente figura.

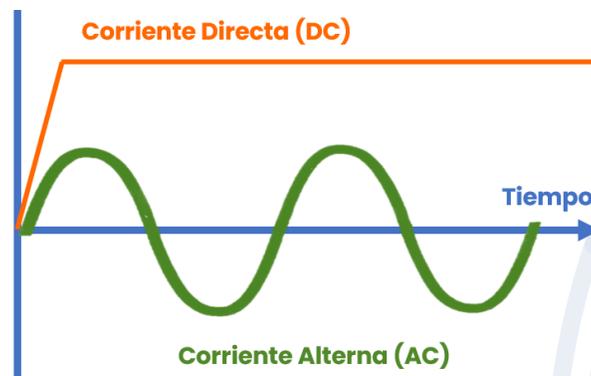


Lo que se puede apreciar en la figura es la sumatoria de dos campos magnéticos generados por corriente directa resultan en un campo magnético equivalente a la suma vectorial de la dirección del campo.

Es importante acotar el hecho de que en este ejemplo se implementó corriente directa. Más adelante se estudiara que la corriente directa mantiene una única dirección a un voltaje constante, lo cual no altera en ningún sentido la sumatoria de ambos campos magnéticos.

Aplicar este tipo de campo en la inspección mediante partículas magnéticas no resulta en ningún beneficio, sino que además el campo resultante será difícil de predecir especialmente en componentes con geometrías complejas.

También se podría solapar un campo generado por corriente directa y un campo generado por corriente alterna. La corriente alterna por su parte tiene un comportamiento que varía en función del tiempo, su comportamiento se asemeja mucho al comportamiento de la función seno. A continuación, vemos la gráfica de estos comportamientos.



Al solapar estos dos tipos de magnetización en una sola pieza podemos pensar en una magnetización que ira variando de dirección en función del tiempo a lo largo de un eje específico.

Desde un punto de vista comercial existen sistemas que logran incorporar dos campos magnéticos y alternarlos rápidamente, el beneficio brinda es que la orientación de las discontinuidades no será un impedimento para la detectabilidad. Aunque la dirección óptima para detectar una discontinuidad en particular será momentánea ya que el campo varía en función del tiempo.

No todas las piezas son aptas para ser evaluadas mediante un campo magnético multidireccional es por ello que es importante indagar en los requerimientos para esta técnica además de tener el equipamiento adecuado.

2. Importancia de la dirección del campo magnético

La importancia que acarrea la dirección del campo magnético se sintetiza en que las discontinuidades requieren que las líneas de flujo tengan una orientación con respecto de la discontinuidad de entre 45° y 90° , siendo 90° mucho más deseable ya que obtendrá la máxima respuesta del campo magnético.

Ya que normalmente se desconoce la orientación de la posible discontinuidad en el componente cada componente se suele magnetizar dos veces, siendo estas dos magnetizaciones perpendiculares entre sí.

Es por ello que es sumamente importante entender las diversas técnicas de magnetización y sacarles el mayor provecho para garantizar una buena detectabilidad en la inspección mediante partículas magnéticas.

Capítulo 4: Tipos de Corriente

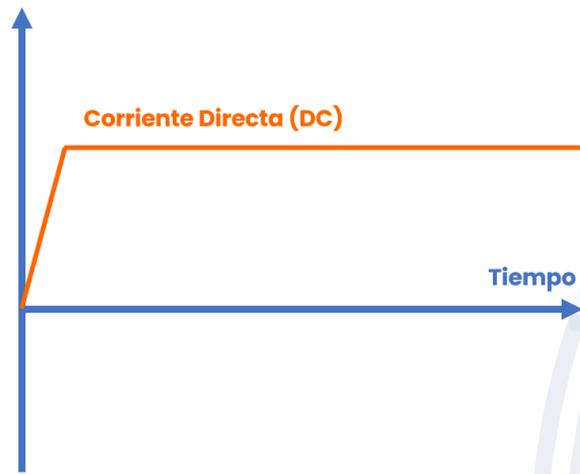
Existen diversos tipos de corriente que podemos implementar para magnetizar el componente evaluado. Los diversos tipos de corriente brindaran un poder de magnetización diverso que impactara en la fuerza del campo magnético resultante en el componente y por lo tanto en los resultados de la inspección.

A continuación, listamos los tipos de corrientes que se pueden implementar en partículas magnéticas:

- ✓ Corriente Directa – Conocida como DC.
- ✓ Corriente Alterna – Conocida como AC.
- ✓ Corriente Alterna Rectificada.
 - Corriente Alterna Rectificada de Media Onda – HWAC
 - Corriente Alterna Rectificada de Onda Completa de una fase – FWAC
 - Corriente Alterna Rectificada de Onda Completa de tres fases – FWAC

1. Corriente Directa

La corriente directa es un tipo de corriente que fluye constantemente en una dirección a un voltaje constante. El ejemplo más común sería una batería. En la siguiente figura podemos apreciar lo comentado.



Tal y como se aprecia en la figura anterior podemos observar como la corriente directa mantiene una sola polaridad y se mantiene constante. La corriente directa es sumamente útil ya que brinda un poder de penetración mayor que otros tipos de corriente. Por lo tanto, permite una inspección de las discontinuidades subsuperficiales.

1.1 Ventajas de Corriente Directa

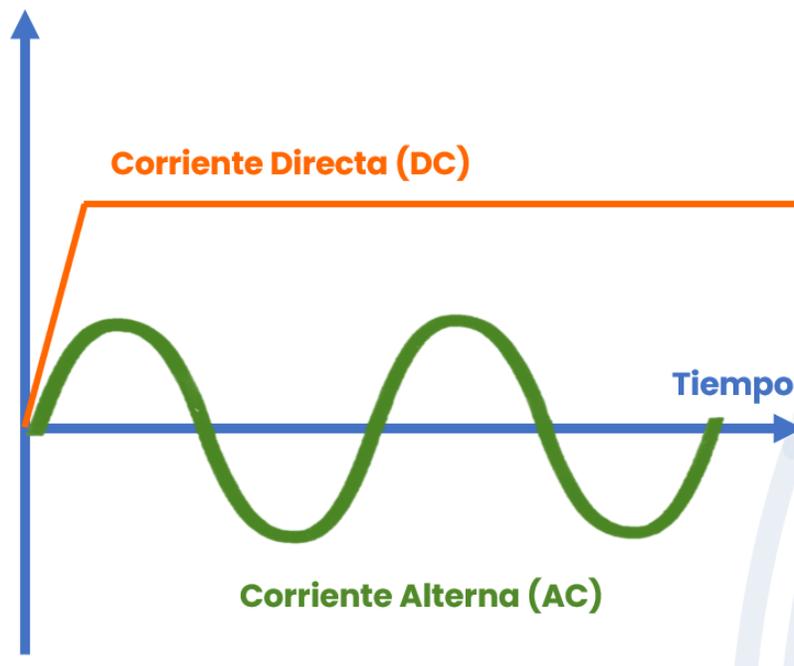
- ✓ La polaridad es constante.
- ✓ El voltaje se mantiene constante.
- ✓ Tiene un buen poder de penetración que permite la inspección de discontinuidades subsuperficiales.

1.2 Desventajas de Corriente Directa

- ✓ Los generadores de corriente directa usualmente proveen la corriente a voltajes más altos por lo tanto existe riesgo de generar “arcing”.

2. Corriente Alterna

La corriente alterna es una que fluctúa entre una carga positiva y negativa, sigue el comportamiento de la función seno tal y como se aprecia en la siguiente figura.



En la figura anterior podemos apreciar como la corriente alterna fluctúa entre valores positivos y negativos. Al compararla con la corriente directa presente en la gráfica podemos apreciar como la corriente directa mantiene un valor constante a lo largo del tiempo.

Ahora bien, la gráfica nos muestra como la polaridad de la corriente se reversa en función del tiempo, pasando de positivo a negativo y luego de negativo a positivo. Esa fluctuación ocurre con una frecuencia normalmente de entre 50 y 60 ciclos por segundo, es decir 50-60 Hz.

La corriente alterna es el tipo de corriente más implementado para el método de partículas magnéticas ya que su disponibilidad la hace muy conveniente por su presencia en los circuitos eléctricos de casas, instalaciones industriales y muchos otros. El voltaje que se suministra comercialmente varía dependiendo de la región, pero de manera general podemos decir que se encuentra entre 100 y 240 voltios. Ahora bien, la facilidad de implementar este tipo de corriente es que se requiere de un transformador sencillo que convierta el voltaje en uno bajo con una corriente de alto amperaje.

La fluctuación de la corriente brinda un gran beneficio a la inspección debido a que esto permite una agitación de las partículas magnéticas colocadas en la superficie de la pieza evaluada lo cual mejora su movilidad y en consecuencia tendrán una mejor respuesta a las fugas de campo magnético.

Este tipo de corriente ofrece la mejor capacidad de detección para discontinuidades superficiales. Pero para el caso de discontinuidades subsuperficiales no es adecuada y esto se debe a que tiene poco poder de penetración dentro del componente.

La falta de poder penetración de este tipo de corriente se debe a un fenómeno llamado “Skin Effect”, este fenómeno se debe al cambio de polaridad de la corriente alterna. Debido a esto el campo magnético generado por este tipo de corriente es fácilmente removible debido a esa penetración superficial

Por lo tanto, este tipo de corriente se ve limitado para la inspección de discontinuidades subsuperficiales.

2.1 Ventajas de Corriente Alterna

- ✓ La polaridad fluctúa constantemente entre positiva y negativa.
- ✓ Excelente sensibilidad para las discontinuidades superficiales.
- ✓ Brinda una excelente movilidad a las partículas magnéticas.

2.2 Desventajas de Corriente Alterna

- ✓ No tiene capacidad de detectar discontinuidades subsuperficiales.
- ✓ No se recomienda implementar la corriente alterna con el método residual de inspección.

2.3 Efecto de superficie – “Skin Effect”

El efecto de superficie es sumamente importante a tomar en cuenta en el caso de corriente alterna ya que limita la profundidad de la inspección.

La limitación se puede explicar con la ley de Lenz. Esta ley, en términos sencillos, lo que establece es que cuando se induce un campo magnético este tendrá el sentido opuesto al campo magnético que lo indujo.

Sabemos que la corriente alterna induce un campo magnético en la pieza evaluada que será contraria a la de la corriente alterna y acarrea que se tendrá una profundidad de penetración limitado.

La profundidad de penetración estándar es aquella en la que la corriente inducida tiene un 37% de la densidad de la corriente en la superficie, más allá de esto no es viable para inspección.

Como podemos observar al inspeccionar con corriente alterna nos vemos limitados a la superficie del componente y es por ello que este fenómeno se llama efecto de superficie o “Skin Effect”.

Si queremos ir paso más allá podemos asociar que la penetración en este caso la podemos asociar con la frecuencia de la corriente inducida. En el caso de técnicas electromagnéticas como Corrientes Inducidas la correcta selección de la frecuencia es fundamental para obtener buenos resultados.

3. Corriente Alterna Rectificada

La corriente alterna puede ser pasada por un rectificador para generar otros tipos de corriente y esto alivia muchísimo al método de partículas magnéticas ya que la facilidad del uso de corriente alterna la vuelve prácticamente necesaria y como sabemos la corriente alterna no funciona para la detección de discontinuidades subsuperficiales.

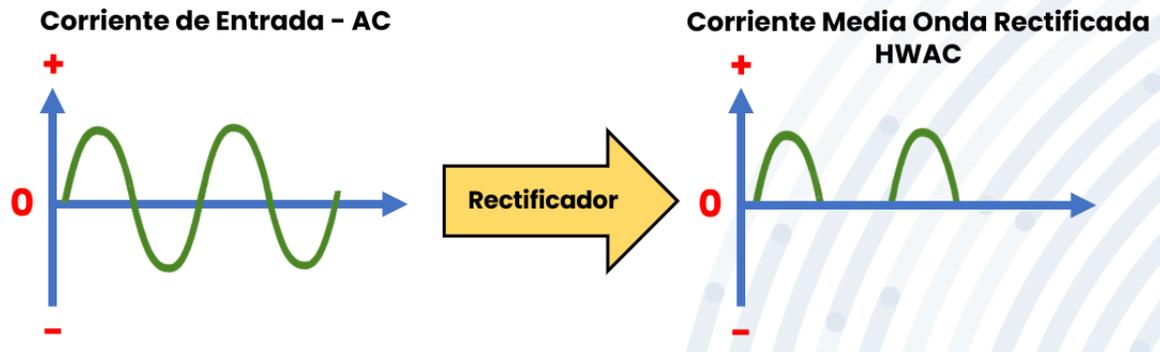
A continuación, presentamos los tipos de corriente rectificada implementada en el método de partículas magnéticas:

- ✓ Corriente Alterna Rectificada a media onda – HWAC
- ✓ Corriente Alterna Onda Completa de Una Fase – FWAC
- ✓ Corriente Alterna Onda Completa de Tres Fases – FWAC

Estos tipos de corriente también se conocen como corriente directa rectificada de media onda y de onda completa.

3.1 HWAC – Corriente Alterna de Media Onda

La corriente alterna de media onda se genera al pasar la corriente alterna a través de un rectificador. Este fenómeno se observa en la siguiente figura.



Tal y como se aprecia en la figura anterior el resultado de pasar corriente alterna por un rectificador hará que la corriente solamente fluya en un sentido. Esto se aprecia en que en la onda rectificada solamente se aprecia el máximo positivo mientras que el recorrido negativo podemos decir que se elimina. En la figura se aprecia como el valor máximo es el mismo que el de la corriente alterna.

Podemos decir que la HWAC es un tipo de corriente pulsante en la cual solamente se tiene una polaridad y hay intervalos en los que no hay flujo de corriente.

Esta corriente pulsante beneficia la movilidad de las partículas magnéticas, especialmente en el caso de partículas secas, y por lo tanto aumenta la sensibilidad de la inspección.

Otro beneficio que brinda este tipo de corriente es que los campos magnéticos generados en la pieza penetran a lo largo del mismo, no se limitan a la superficie como la corriente alterna.

Por lo tanto, la HWAC tiene la capacidad de detectar discontinuidades subsuperficiales. En el caso de las superficiales también las podrá detectar, pero no tendrá tanta eficacia como la corriente alterna.

3.1.1 Ventajas de HWAC

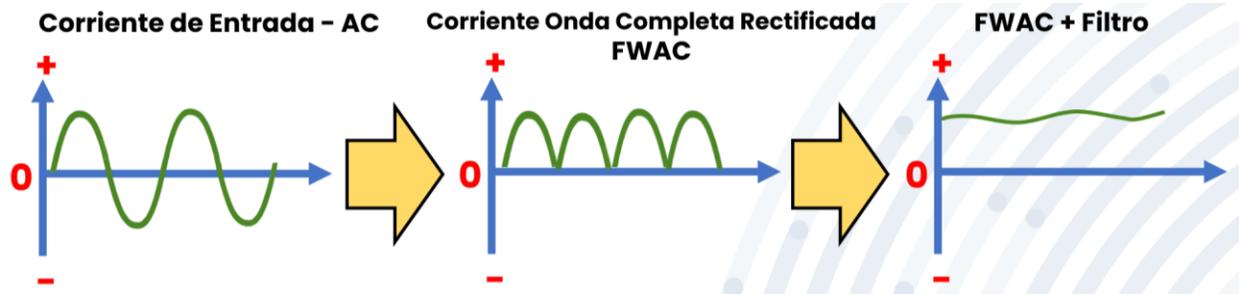
- ✓ Puede detectar discontinuidades subsuperficiales.
- ✓ Debe ser implementada con el método de inspección continua.

3.1.2 Desventajas de HWAC

- ✓ Tiene menos sensibilidad que la corriente alterna para las discontinuidades próximas a la superficie.

3.2 FWAC – Corriente Alterna de Onda Completa de una fase

La corriente alterna de media onda completa de una fase se genera al pasar la corriente alterna a través de un rectificador. Este fenómeno se observa en la siguiente figura.



Tal y como se aprecia en la figura anterior el resultado de pasar corriente alterna por un rectificador hará que la corriente solamente fluya en un sentido. Pero a diferencia del HWAC en este caso no se elimina la fase negativa, sino que se invierte la polaridad.

Esto produce una corriente directa pulsante sin intervalos entre los pulsos. De manera adicional, y como se ve en la figura se puede pasar la FWAC a través de un filtro para suavizar los picos bruscos del cambio de polaridad.

Este tipo de corriente no brinda una movilidad tan buena como HWAC debido a la reducción de la pulsación. Pero esto si mejora la profundidad de inspección.

Si se compara con la onda completa de tres fases podemos decir que tienen el mismo poder de penetración.

3.2.1 Ventajas de FWAC de una Fase

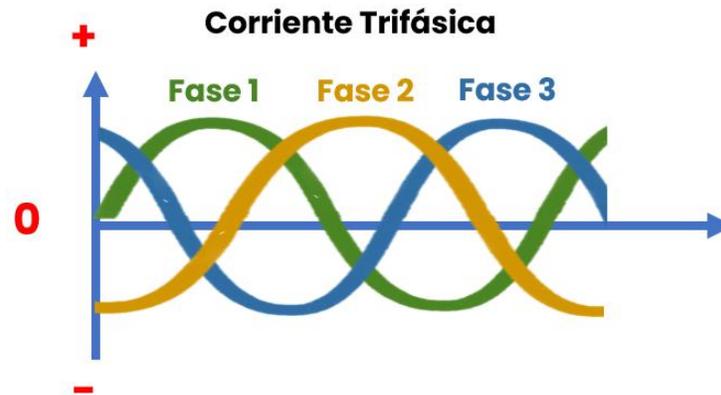
- ✓ Puede detectar discontinuidades subsuperficiales. La profundidad de inspección es mayor que la HWAC.
- ✓ Brinda poca movilidad a las partículas.

3.2.2 Desventajas de FWAC de una Fase

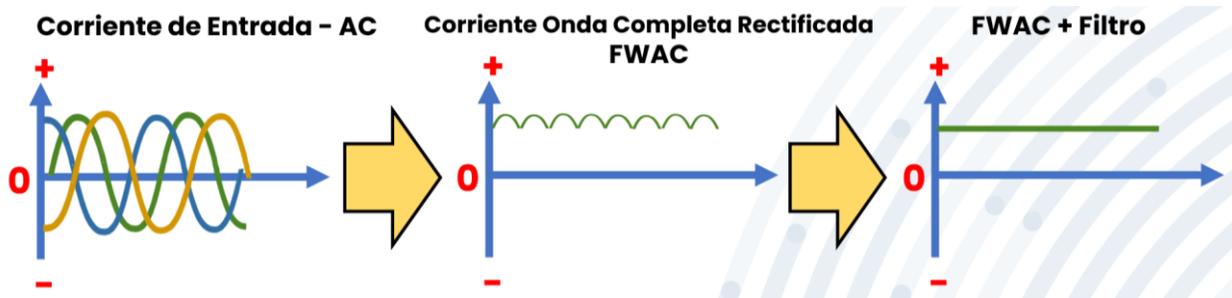
- ✓ No tiene una ventaja sustancial sobre HWAC.
- ✓ La movilidad de las partículas se ve disminuida en comparación a HWAC.
- ✓ Consume más corriente de la línea de AC en comparación a HWAC.

3.3 FWAC – Corriente Alterna de Onda Completa de tres fases

Un tipo de corriente con diversas aplicaciones es la corriente trifásica, esta consta de tres corrientes alternas monofásicas que poseen la misma frecuencia pero que tienen una diferencia con respecto a su fase. En la siguiente figura se observa la gráfica de una corriente trifásica.



Este tipo de corriente brinda ciertas ventajas desde un punto de vista de ingeniería eléctrica, pero con respecto al método de partículas magnéticas podemos decir que este tipo de corriente se puede pasar a través de un rectificador para generar una FWAC de tres fases. Este fenómeno se observa en la siguiente figura.



Como podemos observar en la figura anterior al pasar la corriente trifásica por el rectificador resulta una corriente con un voltaje casi constante, teniendo una pulsación muy pequeña. Posteriormente dicha corriente se puede pasar por un filtro y se genera una corriente con un voltaje constante muy similar a lo que sería la corriente directa.

La corriente trifásica es sumamente útil ya que como podemos observar se puede generar una corriente muy similar a la DC. El detalle de este tipo de corriente es que se tiene que tener el equipamiento adecuado para poder trabajarla.

La corriente trifásica es el tipo de corriente más utilizado para la inspección de partículas magnéticas que requieren de alto amperaje. Podemos pensar en valores de 10.000A o 20.000A. El costo inicial de estos equipos es mucho mayor en comparación a las otras técnicas.

Los sistemas estacionarios de partículas magnéticas suelen estar conectados con corriente alterna de tres fases siendo un gran beneficio para la inspección ya que fácilmente se puede trabajar con AC y DC en la pieza inspeccionada.

3.3.1 Ventajas de FWAC de tres Fases

- ✓ Puede detectar discontinuidades superficiales.
- ✓ Genera un tipo de corriente muy similar a la DC.

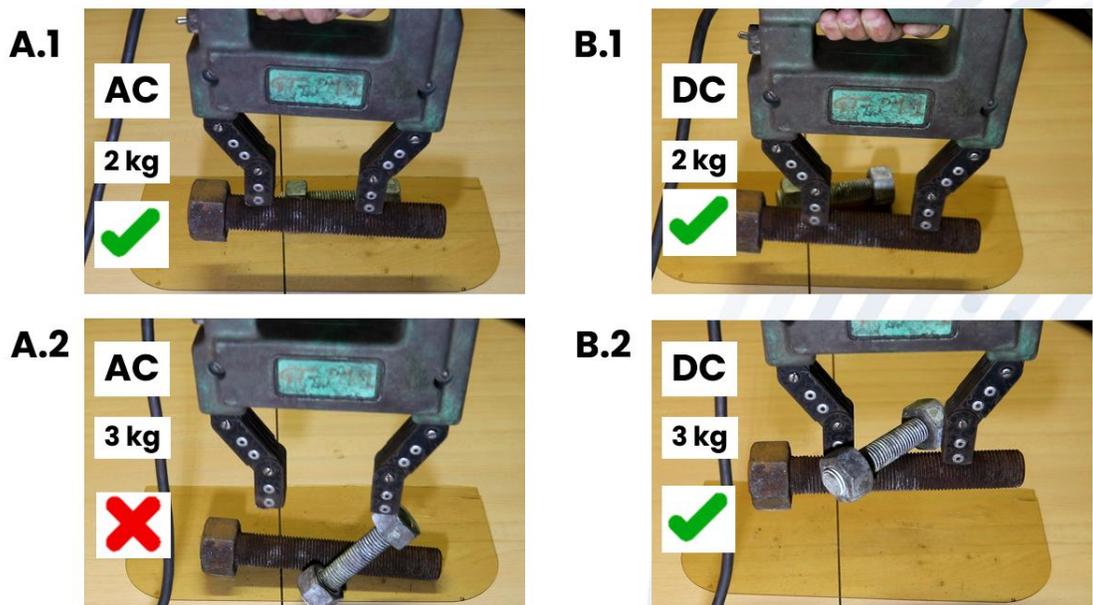
3.3.2 Desventajas de FWAC de tres Fases

- ✓ El equipo implementado para trabajar con corriente trifásica no es portátil.

4. Comparación del Poder de Penetración

Como ya se ha mencionado la corriente alterna, producto del efecto de superficie, no tiene un buen poder de penetración resultando en la incapacidad de detectar discontinuidades subsuperficiales.

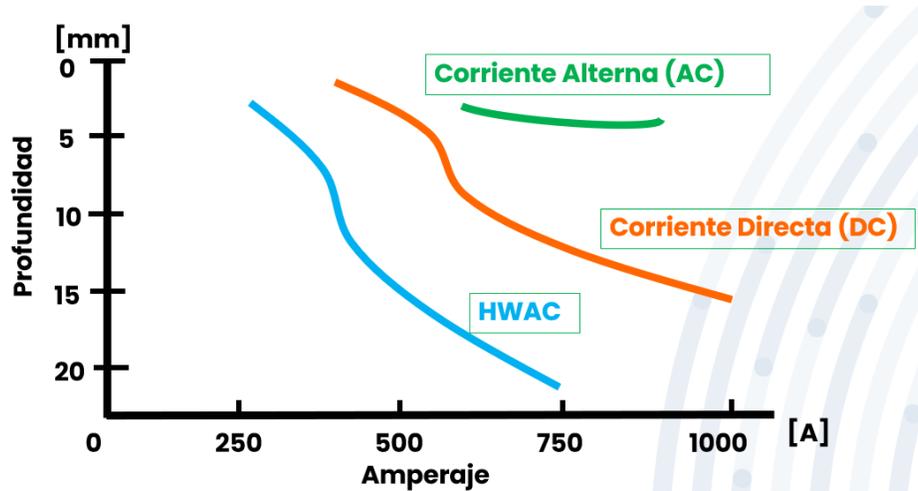
Una manera sencilla de plasmar la diferencia en el poder de penetración es mediante una prueba de levantamiento de peso. Esto debido a que mientras mayor profundidad tenga la magnetización el peso que podrá levantar será mayor. En la siguiente figura podemos ver la comparación.



En la figura A.1 se observa un yugo electromagnético con corriente alterna levantado un peso de 2kg, sin ningún problema. En el caso A.2 la magnetización generada por la corriente alterna no es suficiente para levantar 3kg.

Repitiendo el ejercicio, pero con corriente directa observamos en las imágenes B.1 y B.2 como el yugo logra levantar los pesos sin dificultad.

Con esto se refleja claramente como la corriente directa tiene un poder de penetración mayor que la corriente alterna.



5. Distribución de la magnetización en el componente

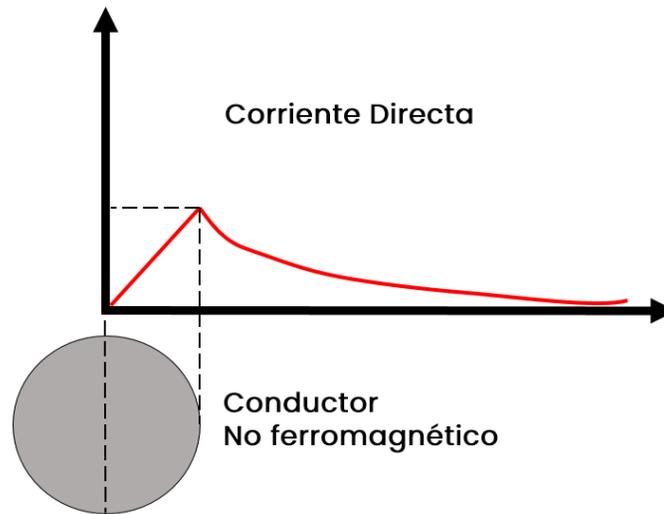
Como ya hemos observado la magnetización del componente varía dependiendo del tipo de corriente implementada.

Ahora bien, la distribución del campo a lo largo del volumen de dicha pieza es muy importante comprenderlo para saber que alcance tendrá nuestra inspección mediante partículas magnéticas.

5.1 Evaluación de la distribución en un cilindro

Caso I: Corriente Directa en material conductor no ferromagnético

En la siguiente figura podemos apreciar la gráfica de la distribución en un cilindro que es de un material conductor no ferromagnético. Dicha magnetización se logra al pasar corriente directa a través del componente.

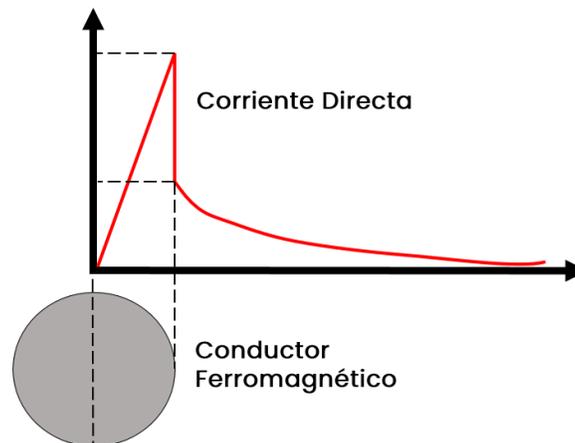


En la figura anterior podemos observar el comportamiento de la distribución magnética. De dicha imagen podemos sacar diversas conclusiones:

- ✓ La distribución magnética en el centro del componente es igual a cero.
- ✓ La distribución magnética en el borde del componente llega a su punto máximo.
- ✓ El campo externo generado por la magnetización disminuye a medida que se distancia del componente.

Caso II: Corriente Directa en material ferromagnético

En la siguiente figura podemos apreciar la gráfica de la distribución en un cilindro que es de un material ferromagnético. Dicha magnetización se logra al pasar corriente directa a través del componente.



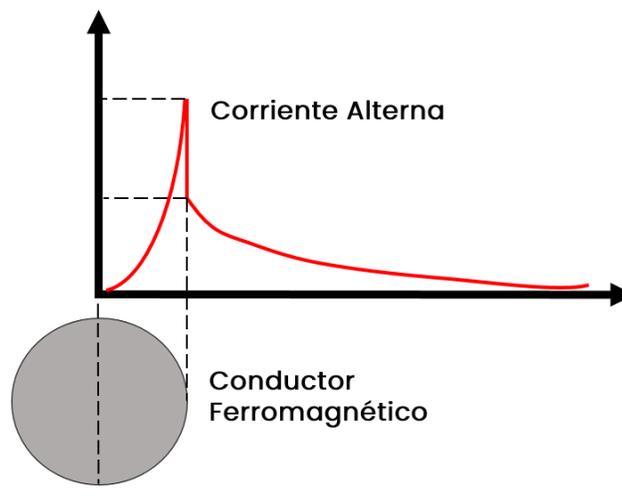
En la figura anterior podemos observar el comportamiento de la distribución magnética. De dicha imagen podemos sacar diversas conclusiones:

- ✓ La distribución magnética en el centro del componente es igual a cero.
- ✓ La distribución magnética en el borde del componente llega a su punto máximo.

- ✓ El poder de magnetización es mayor que en el componente no ferromagnético y esto se debe a la permeabilidad magnética que brinda la pieza.
- ✓ El campo externo generado por la magnetización disminuye a medida que se distancia del componente.
- ✓ El campo externo es igual que el generado en el material no ferromagnético, siempre y cuando la corriente y radio de la pieza evaluada sean iguales.

Caso III: Corriente Alterna en material ferromagnético

En la siguiente figura podemos apreciar la gráfica de la distribución en un cilindro que es de un material ferromagnético. Dicha magnetización se logra al pasar corriente alterna a través del componente.



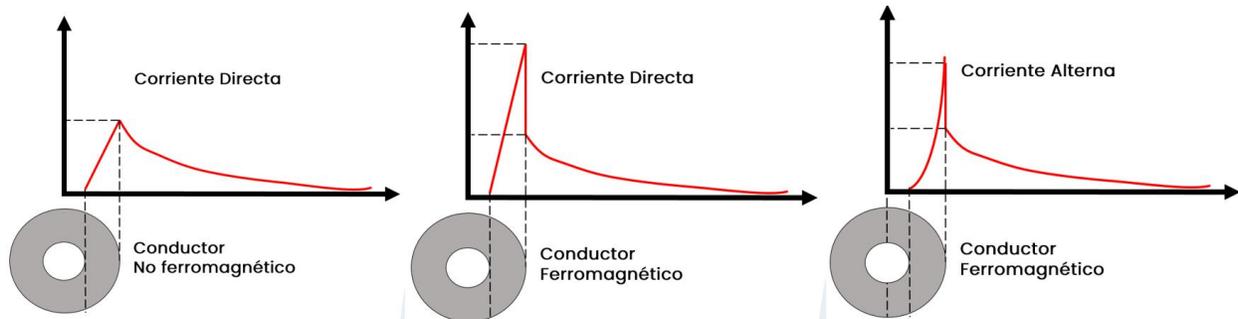
En la figura anterior podemos observar el comportamiento de la distribución magnética. De dicha imagen podemos sacar diversas conclusiones:

- ✓ La distribución magnética en el centro del componente es igual a cero.
- ✓ La distribución magnética en el borde del componente llega a su punto máximo.
- ✓ La mayor cantidad de distribución magnética se acumula próximo al borde del componente. Esto se debe al efecto de superficie (Skin effect).
- ✓ El campo externo generado por la magnetización disminuye a medida que se distancia del componente.

5.2 Evaluación de la distribución en un cilindro hueco

A manera de abarcar la gran mayoría de casos que podemos encontrar en la industria evaluemos los mismos tres casos presentados en el punto anterior pero haciendo la salvedad de que el componente en vez de ser un cilindro sólido es un cilindro hueco.

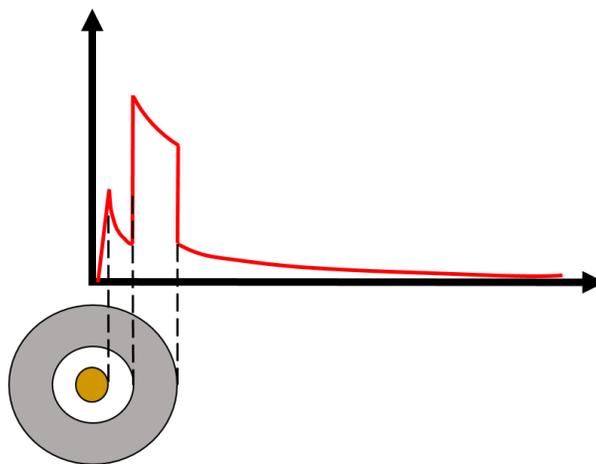
En la siguiente figura podemos observar el resultado de los tres casos.



Tal y como se observa en la figura anterior podemos deducir que el comportamiento de los tres casos es prácticamente el mismo que para un cilindro sólido. La diferencia es que la distribución magnética en vez de llegar al cero en el centro hipotético del cilindro, alcanza el cero en la superficie interna del cilindro hueco.

Si pensamos en la inspección de este tipo de componente se puede sugerir una alternativa gracias al vacío que tiene. Se puede generar una magnetización mediante un conductor central, esto se verá en detalle más adelante.

Pero para entender superficialmente este tipo de magnetización básicamente significa en colocar un material conductor a lo largo de ese espacio vacío y pasar una corriente eléctrica a través del mismo. Esto generara una magnetización por inducción en la pieza evaluada. El resultado de la distribución de esta magnetización lo podemos evaluar en la siguiente figura.



En la figura anterior podemos observar el comportamiento de la distribución magnética. De dicha imagen podemos sacar diversas conclusiones:



- ✓ Esta técnica de magnetización es más beneficiosa para la inspección de la superficie interna y externa ya que se aprecia como la distribución de la magnetización es más alta mediante esta técnica.
- ✓ La distribución magnética en el borde interno del componente llega a su punto máximo y disminuye a medida que se acerca al borde externo.

Capítulo 5: Partículas Magnéticas

Las partículas magnéticas son el componente que le permitirá al inspector detectar las discontinuidades ya que sin la presencia de las partículas no se podrá visualizar la presencia de la fuga de flujo y en consecuencia la presencia de discontinuidades.

Las partículas se pueden aplicar de dos maneras al componente, de manera seca o húmeda. Cada una de estas tendrá sus ventajas y limitaciones.

De manera muy simplificada podemos decir que las partículas secas se aplican en forma de polvo sobre la superficie del componente y las partículas húmedas se mezclan con un medio líquido que posteriormente es aplicado a la superficie del material.

Por otra parte también tenemos que pensar que las partículas magnéticas pueden ser visibles bajo iluminación normal o bajo iluminación fluorescente, siendo entonces partículas fluorescentes o partículas visibles.

1. Propiedades generales de las partículas magnéticas

Para obtener los mejores resultados del método las características propias de la partícula magnética serán un factor determinante ya que la correcta selección de las partículas es crucial para la confiabilidad de la generación de las discontinuidades.

Si las partículas implementadas no tienen las propiedades correctas se pueden caer en errores en los resultados debido a una pobre generación de las discontinuidades o simplemente incapacidad de poder generarlas.

Dentro del método de partículas magnéticas existen dos tipos de partículas que pueden ser implementadas: partículas secas y partículas húmedas.

Las partículas secas son aquellas que se aplican directamente sobre el componente sin la necesidad de tener un medio líquido (las partículas en suspensión).

Las partículas húmedas son aquellas que se encuentran en suspensión en un medio líquido, el cual puede ser base agua o base oleosa.

Otro punto importante a mencionar con respecto a las partículas implementadas en el método, es que estas pueden ser visibles bajo condiciones de iluminación natural o fluorescente bajo condiciones de iluminación de luz ultravioleta. Esta característica correspondiente a la visibilidad gira en torno a un pigmento que se le coloca a las partículas como recubrimiento.

Ahora bien, de manera general y sin realizar ningún tipo de discriminación con respecto al tipo de partícula podemos mencionar algunas características deseables:

Alta permeabilidad: Se busca la mayor permeabilidad posible ya que esto le permitirá a la partícula magnetizarse fácilmente y por lo tanto detectar rápidamente las fugas de flujo. Ahora bien, alta permeabilidad no significa alta sensibilidad ya que hay otros factores a tomar en cuenta como geometría, si la partícula es húmeda o seca, entre otras propiedades.

Baja retentividad: Se debe buscar una baja retentividad ya que esto le permitirá a las partículas que sean removidas de la superficie de la pieza fácilmente. Si la retentividad fuera alta significaría que además de magnetizarse fácilmente por la alta permeabilidad mantendrían dicha magnetización, lo cual genera un problema de visibilidad de las indicaciones reales por la gran cantidad de partículas (se disminuye el contraste y enmascara las discontinuidades reales).

Tamaño de la partícula: El tamaño es variable y afectara los resultados pero dependerá del tipo de partícula: seca o húmeda.

Geometría de la partícula: La geometría que posea la partícula magnética afectara directamente la movilidad y el poder de atracción que esta tenga. De manera general podemos hablar de dos geometrías.

- ✓ Partículas esféricas: Este tipo de partículas brindara una excelente movilidad pero tendrán bajo poder de atracción.
- ✓ Partículas alargadas: Este tipo de partículas brindara un excelente poder de atracción pero tendrán una baja movilidad.

Movilidad: La movilidad en la superficie de la pieza es un factor importante para maximizar la detección ya que baja movilidad significa una reducción en la detectabilidad.

Pigmentación: Las partículas magnéticas tienen un pigmento en su capa para brindarle contraste en la aplicación y por lo tanto detectabilidad. Dicho pigmento puede o no ser fluorescente.

Material: Es un poco evidente pero igual lo mencionamos, el material de las partículas magnéticas debe ser un material magnético, con alta permeabilidad y baja retentividad.

2. Partículas Magnéticas Secas

Las partículas magnéticas secas son aquellas que su no implementan un medio líquido para su aplicación. Se aplican en forma de nube de polvo o esparciéndolas sobre la superficie de la pieza evaluada.

Este tipo de partículas lo podemos encontrar en distintas presentaciones y colores. Los colores típicos serian: rojo, gris, amarillo y negro. Pero el factor determinante en la selección adecuada del color será el contraste que genere con la pieza a inspeccionar. En la siguiente figura podemos apreciar algunos ejemplos.



Tal y como se observa en la figura anterior las partículas como tal son suministradas en forma de polvo dentro de recipientes.

Un punto importante a mencionar es que las partículas secas son no fluorescentes a diferencia de las partículas húmedas que pueden ser no fluorescentes y fluorescentes.

2.1 Efecto del tamaño en las partículas secas

Para entender el impacto que tiene la correcta selección del tamaño de las partículas pensemos en el efecto que tiene partículas finas y gruesas.

Partículas Finas: En las partículas secas se consideran partículas pequeñas aquellas que tienen un tamaño de 50mm. Estas partículas serán mucho más livianas que las partículas grandes y por lo tanto tendrán una mayor sensibilidad para la detección de discontinuidades pequeñas producto de su movilidad. Las partículas finas acarrear un problema por su naturaleza de polvillo: se esparcen fácilmente con la brisa, se adhieren fácilmente a contaminación en la superficie y quedan atrapadas.

Partículas Gruesas: La presencia de partículas gruesas es necesaria en la formulación de las partículas debido a que las partículas gruesas controlan la naturaleza de polvo que tienen las partículas finas, es decir facilitara su manipulación. Además de que en el caso de discontinuidades grandes la presencia de partículas gruesas jugara un rol fundamental para fungir como una especie de puente que permita mantenerse en la superficie en vez de caer dentro de la discontinuidad.

Tamaño de las partículas magnéticas secas: Al evaluar el efecto que tienen las partículas finas y gruesas podemos decir que una correcta formulación referente al tamaño es una mezcla entre partículas finas y gruesas. Ciertamente será el fabricante quien se encarga de esta formulación pero es importante que los inspectores tengan este conocimiento.

2.2 Efecto de la geometría en las partículas secas

La geometría de la pieza, al igual que el tamaño también tiene influencia en los resultados del ensayo, especialmente en el efecto que tiene la geometría en la correcta aplicación de las partículas secas.

Recordemos que este tipo de partículas se aplica mediante una nube de polvo o esparcimiento a lo largo de la superficie, esto quiere decir que las partículas flotarán en el aire y posteriormente caerán sobre la superficie. Para entender el impacto que tiene la geometría en este fenómeno evaluemos la siguiente geometría.

Partículas alargadas: Este tipo de partículas tiene la capacidad de alinearse muy bien a las líneas del campo magnético, por lo tanto son deseables para la sensibilidad. Ahora bien, esta geometría acarrea un problema la cual es que las partículas se aglutinarán entre sí y traerán problemas a la hora de la aplicación.

Partículas esféricas: La presencia de partículas esféricas en la formulación de las partículas secas resultará en partículas con buenas características de aplicación.

Geometría de las partículas magnéticas secas: Al evaluar el efecto que tienen las partículas alargadas y esféricas podemos decir que una correcta formulación referente a la geometría es una mezcla entre ambas. Ciertamente será el fabricante quien se encarga de esta formulación pero es importante que los inspectores tengan este conocimiento. Ahora bien, de manera general podemos mencionar que se suele tener una relación entre 1:1 y 2:1.

2.3 Movilidad de las partículas secas y aplicación

Cuando apliquemos las partículas secas se busca aplicarlas desde una distancia adecuada que permita que las partículas caigan lentamente sobre la superficie. Esto debido a que si las partículas se lanzan bruscamente sobre la superficie se puede tapar indicaciones débiles. En la siguiente figura se aprecia una bomba para la aplicación de las partículas secas.



Un punto importante tiene que ver con la geometría de la pieza que se va a inspeccionar. En el caso de que la superficie de “recepción” de las partículas sea horizontal facilita el hecho

de como las partículas se asientan directamente y no tendrán movilidad una vez caigan en la superficie. Ahora bien, se les puede brindar una leve movilidad al vibrar el componente o con la implementación de corriente alterna.

2.4 Comentarios generales

Las partículas magnéticas secas no pueden ser reutilizadas debido a que se disminuirá la sensibilidad en su aplicación ya que las partículas finas tienen una alta probabilidad de “perdersé” y no ser recolectadas para una nueva aplicación. Es por ello que esta práctica, además de ser poco práctica, no es viable.

Cuando se utilicen partículas magnéticas secas es sumamente importante garantizar que no tienen una magnetización residual dentro de la botella, esto debido a que puede causar que se acumulen y resulta difícil su aplicación.

Una manera fácil de desmagnetizar las partículas secas es con un yugo electromagnético con AC. Colocarlos alrededor de las partículas y poco a poco alejar el yugo, esto disminuirá sustancialmente la magnetización residual.

3. Partículas Magnéticas Húmedas

Las partículas magnéticas húmedas a diferencia de las partículas secas se encuentran en suspensión en un medio líquido, ya sea base agua o base oleosa.

Desde un punto visto técnico la ventaja que brinda que el penetrante sea húmedo es que hay un aumento sustancial de la sensibilidad ya que la movilidad de las partículas aumenta y permite que las partículas finas sean utilizadas en mayor porcentaje en comparación a las partículas secas. Esto producto a las pérdidas por adherencia y esparcimiento asociadas a las partículas secas.

Otra gran ventaja que brinda el método húmedo es que la aplicación de las partículas es uniforme a lo largo de la superficie de la pieza evaluada lo cual beneficia los resultados de la prueba.

Otro gran diferenciador que tienen las partículas húmedas es la posibilidad de implementar partículas fluorescentes y no fluorescentes. El factor que determina la fluorescencia es el pigmento que se implementa para recubrir la partícula. En la siguiente figura podemos apreciar un caso de partículas visibles y partículas fluorescentes.



Tal y como se aprecia en la figura anterior ambos casos logran detectar con claridad la discontinuidad pero la técnica fluorescente brinda una ventaja evidente con respecto a la sensibilidad. La fluorescencia le facilita al técnico inspector realizar una inspección visual mucho más efectiva además de brindar mayor sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas.

Ahora bien, la implementación de la técnica fluorescente requiere de instrumentación adicional para activar la fluorescencia en las partículas, la cual se logra mediante la aplicación de luz ultravioleta.

2.1 Medio líquido de la suspensión

Existen dos tipos de medios implementados para ser implementados como vehículos para las partículas magnéticas, estos son:

- ✓ Agua.
- ✓ Aceite.

A continuación presentamos una tabla con algunas de las diferencias entre estos medios.

Agua	Aceite
------	--------



Requiere inhibidores de corrosión	No genera corrosión en el material inspeccionado.
Puede ser un riesgo para conexiones eléctricas.	
Susceptible a generar corrosión intergranular en algunos componentes.	No tiene este efecto.
Tiene bajo costos en comparación a las partículas base aceite.	Son más costosos.
No presenta riesgos de incendio	Presenta riesgos de incendio
Poca limpieza posterior a la inspección	Requiere de mayor limpieza posterior a la inspección.
Requieren de agentes para mejorar la mojabilidad.	No requiere de agentes para mejorar la mojabilidad. Ya que tienen muy buena mojabilidad.
La presencia de los agentes para la mojabilidad genera un problema de generación de espuma. La espuma se acumula en la parte superior de la mezcla y en la aplicación puede borrar las indicaciones. Es por ello que se necesita agregar agentes que hagan que la espuma sea inestable para que desaparezca rápidamente.	No hay generación de espuma.
Las partículas húmedas base agua tienen la limitante con respecto a temperaturas bajo cero ya que el medio se congelara impidiendo el desarrollo de la prueba. Ahora bien, el congelamiento no es instantáneo y por lo tanto la prueba si se podría desempeñar bajo ciertas condiciones. En el caso de temperaturas muy bajas se deberá utilizar anticongelante aunque esto disminuye la sensibilidad.	Las partículas húmedas base oleosa con respecto a temperaturas bajas tendrán la limitante de la viscosidad del medio. Dependiendo del tipo de medio implementado la viscosidad puede variar.
El mantenimiento de este baño de partículas magnéticas es sumamente importante para garantizar buenos resultados. Esto debido a la presencia de contaminantes, variación de la concentración y cualquier otra eventualidad.	El mantenimiento de este baño de partículas magnéticas es mucho menor en comparación a uno base agua. La concentración de partículas se mantiene mucho más constante.

2.2 Efecto del tamaño de las partículas húmedas

El tamaño típico de estas partículas es de alrededor de 10mm y menos. En el caso de partículas sintéticas de óxido de hierro podemos estar hablando de tamaño de diámetro de alrededor de 0,1mm.

El motivo por el cual estas partículas son más pequeñas que las implementadas para la técnica seca se debe a dos razones. La primera sería debido a mientras más pequeña la partícula más sensibilidad. En segundo lugar y el motivo práctico es que si las partículas son muy grandes es difícil mantenerlas en suspensión en su medio.

2.3 Efecto de la geometría en las partículas húmedas

El impacto que tiene la geometría de las partículas no es tan importante como en el caso de las partículas secas.

Esto se debe a que debido a que las partículas se encuentran suspendidas en un medio y dicho líquido dictara el movimiento y flujo de las partículas. Ahora bien, debido a que el medio líquido es mucho más denso que el aire el movimiento como tal será mucho más lento y por lo tanto tendrán mucha más capacidad de acumularse de una manera más confiable en las discontinuidades.

Por lo tanto, no es necesario tener geometrías específicas para favorecer o no la implementación de las partículas.

2.4 Movilidad de las partículas húmedas

Por el hecho de que las partículas se encuentran en un medio líquido podemos decir que la movilidad en comparación al método seco es mucho mayor.

Si pensamos en la movilidad al aplicar las partículas sobre una superficie estas podrán moverse en un plano bidimensional en la superficie. En el caso de la aplicación mediante inmersión las partículas tendrán un campo de movilidad tridimensional.

Es sumamente importante que las partículas puedan moverse adecuadamente y abarcar toda la superficie del componente para asentarse correctamente y poder generar resultados adecuados.

2.5 Aplicación de partículas húmedas

Las partículas húmedas son aplicadas de distintas maneras, pero para entender esto debemos pensar en las distintas presentaciones comerciales en las que las podemos conseguir. Algunas de estas se presentan en la siguiente figura.



Tal y como se observa en la figura anterior las partículas húmedas las podemos encontrar en latas tipo aerosol, bidones y recipientes.

Con respecto a cómo podemos aplicar las partículas magnéticas es prudente dividir su aplicación en dos grupos.

- ✓ Aplicaciones con sistemas portátiles
- ✓ Aplicaciones en equipo estacionario

2.5.1 Aplicación de partículas húmedas en sistemas portátiles

En el caso de aplicaciones en sitio la manera típica para implementar las partículas húmedas es mediante rociado.

Ahora bien, dicho rociado se puede conseguir a través de diversas técnicas. Algunas de estas son:

Lata de aerosol: La vía más común para aplicar las partículas magnéticas en campo. En este caso la formulación de las partículas en el medio viene directamente del fabricante y no se debe elaborar ninguna consideración a excepción de la fecha de vencimiento.

Pistolas presurizadas: La implementación de sistemas de rociado para la aplicación de partículas magnéticas también es viable. Siendo esta técnica menos portátil ya que requiere que la pistola se encuentre conectada a una fuente de partículas húmedas. Dichas partículas deben ser preparadas previamente.

2.5.2 Aplicación de partículas húmedas en sistemas estacionarios

Más adelante se cubrirán los sistemas de inspección estacionarios pero para fines de este apartado debemos mencionar que estos sistemas son equipos que permiten la magnetización

e inspección de componentes de una manera rápida y eficiente. Teniendo como principal desventaja la movilidad y las dimensiones de las piezas que puede inspeccionar.

En la siguiente figura se aprecia un banco de partículas magnéticas.



La figura anterior muestra un banco horizontal. Para este tipo de sistemas se debe tener un reservorio de la formulación de las partículas húmedas, el cual debe ser cuidadosamente preparado y mantenido, esto se verá más adelante.

Si pensamos en como aplicamos las partículas húmedas en estos sistemas tenemos dos alternativas, las cuales son:

Inmersión: Esta técnica se aplica en componentes con alta retentividad ya que es necesario que la técnica sea de magnetización residual. Esto debido a que en primer lugar se magnetiza la pieza y luego se introduce en el baño de partículas magnéticas las cuales son agitadas gentilmente para garantizar homogeneidad de las partículas y minimizar los errores de los resultados por movimiento de las partículas producto de la agitación. El tiempo de inmersión es proporcional significa más tiempo de exposición a las partículas y por lo tanto una mejora en los resultados, lo cual es una ventaja sobre la técnica residual por manguera.

Aplicación por manguera: En esta técnica se aplican las partículas mediante una manguera que genera un flujo de las partículas húmedas sobre la superficie de la pieza evaluada. En este caso la técnica de magnetización es continua. Por lo tanto, cuando las partículas ya se encuentran en la superficie del componente el suministro de la manguera se apaga y se inicia la magnetización del componente y posteriormente se procede a la evaluación de las indicaciones.

2.6 Formulación, concentración y contaminantes en el baño de partículas húmedas

Las partículas magnéticas húmedas pueden ser preparadas previamente por el fabricante o pueden ser elaboradas mediante la adquisición de las partículas en condición seca para luego ser mezcladas con el medio líquido.

A excepción del caso de las partículas húmedas que vienen en presentación de lata de aerosol es sumamente importante el mantenimiento ya que la confiabilidad que brindaran en la inspección estará ligada a su correcta formulación, concentración y carencia de agentes contaminantes.

2.6.1 Formulación de las partículas húmedas

La formulación del concentrado de las partículas magnéticas se debe realizar en función de las recomendaciones del fabricante para poder obtener los mejores resultados bajo el diseño del sistema. En la siguiente figura podemos apreciar un concentrado de partículas magnéticas para ser mezcladas con agua.



En la figura anterior se aprecia un producto de partículas magnéticas diseñado para ser mezclado con agua para generar el baño de partículas magnéticas. En este caso este producto, por recomendación del fabricante se deberá mezclar según las recomendaciones del fabricante que se encuentran en la hoja de especificaciones del componente, en este caso particular se aprecia en la siguiente figura.

Water	14A Redi-Bath
1 gallon	80 mL
1 liter	21 mL

Como podemos apreciar se implementan apenas 21 mL del concentrado en un Litro de agua para obtener la formulación adecuada según el fabricante.

Por otra parte podemos evaluar otro producto que se proporciona en forma seca para ser mezclado posteriormente, este se presenta a continuación.



En este caso este producto se encuentra en condición de polvo, y se puede mezclar tanto con agua como con una base de aceite.

En el caso de agua se deben seguir las recomendaciones del fabricante, las cuales incluyen: añadir agentes para mejorar la mojabilidad, añadir agentes para disminuir la formación de espuma, añadir las partículas secas, revolver por tiempos determinados. Evidentemente el correcto cumplimiento de los pasos para la formulación del componente determinara su eficacia.

Por otro lado este mismo polvo se puede mezclar con una base oleosa e igualmente se deberá seguir las recomendaciones del fabricante para generar la formulación. En este caso, simplemente se deberá mezclar las partículas secas con la cantidad necesaria del medio según el fabricante. A continuación se presenta una figura con algunas presentaciones comerciales de la base oleosa.



Tal y como se aprecia en la figura anterior las presentaciones de la base oleosa satisfacen diversos requerimientos.

2.6.1.1 Preparación de la mezcla

Los sistemas estacionarios o recipientes para producir la mezcla pueden ser sistemas que tengan un sistema de recirculación del producto o no.

En el caso de que el reservorio tenga un sistema de recirculación el trabajo de generar la mezcla será mucho más fácil, en caso contrario el trabajo deberá ser manual y puede ser susceptible a una distribución desigual a lo largo de su medio.

Para los sistemas que tienen recirculación el sistema tiene una bomba que permite que el fluido este en constante agitación, garantizando el mezclado y homogeneidad.

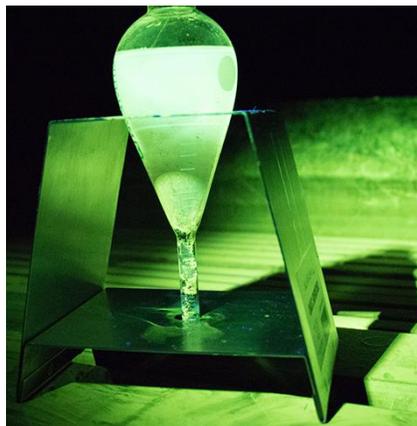
2.6.2 Concentración de las partículas húmedas

Es evidente que las partículas magnéticas se encuentran en un medio ya sea de base agua o aceite. Pero es muy importante tomar en cuenta la cantidad de partículas magnéticas que habrá en un determinado volumen del vehículo, es decir una concentración.

La concentración es sumamente importante ya que la correcta cantidad de partículas determinara los resultados de la inspección, la falta de partículas disminuirá la sensibilidad y el exceso producirá enmascaramiento de discontinuidades.

Para determinar la concentración de partículas visibles se implementan las pruebas AMS3042 y AMS3043. Para la concentración de partículas fluorescente se implementan las pruebas AMS3044 y AMS3045. Si pensamos en la prueba ASTM aplicable seria la ASMT E-1444.

Para efectuar esta prueba se implementa un tubo de vidrio en forma de pera, tal y como se aprecia en la siguiente figura.



Se recomienda leer la norma ASTM E1444, específicamente el punto 7.2.1.1. A grosso modo establecemos algunos pasos para el caso de partículas fluorescentes:

1. Agitar la suspensión por lo menos 30 minutos para garantizar la distribución uniforme de las partículas en el medio.
2. Colocar 100mL de la muestra en el tubo designado para la evaluación. En donde tenga incrementos de 0,05mL para partículas fluorescente y 0,1mL para visible.
3. Desmagnetizar la muestra y colocar en reposo por 60 minutos.



4. Leer el volumen de partículas presente en la muestra.
5. Evaluar en función de las tolerancias permisibles dentro del procedimiento. En caso de ser partículas fluorescentes se deberán evaluar bajo luz ultravioleta.
6. Si las partículas no se ven solidas sino como una especie de aglomerado de partículas se deberá repetir la prueba. En caso de que la segunda prueba obtenga el mismo resultado se deberá cambiar toda la suspensión.

3. Selección del tipo de partícula. Húmeda o Seca.

Para el caso de la selección de partículas húmedas o secas podemos mencionar algunas directrices generales en función de los siguientes puntos:

- ✓ **Tipo de Discontinuidad:** Para discontinuidades subsuperficiales las partículas secas suelen ser más sensibles. Esto se debe a la alta permeabilidad y el hecho de ser partículas alongadas. Al implementar partículas secas con corriente alterna brinda buenos resultados para discontinuidades superficiales pero cuando el requerimiento incluye grietas superficiales finas el método húmedo es mucho mejor independientemente de la corriente de magnetización.
- ✓ **Tamaño de la Discontinuidad:** Las partículas húmedas suelen brindar mejores resultados para discontinuidades poco profundas que sean finas o anchas.
- ✓ **Conveniencia:** La aplicabilidad de las partículas húmedas o secas también dependerá del factor de portabilidad que ofrezca el método. Especialmente de la herramienta de magnetización y si esto lo asociamos a el beneficio que brindara el tipo de corriente al tipo de partícula se termina extendiendo al tipo de partícula.

En el caso de la selección de partículas fluorescentes o visibles radica sobretodo en la conveniencia de aplicación y la disponibilidad de los equipos necesario. De manera general podemos decir que el método húmedo visible y el método húmedo fluorescente tienen prácticamente la misma sensibilidad. Aunque si es importante recalcar que bajo de ciertas condiciones de iluminación el fluorescente es más fácil de detectar.

Capítulo 6: Equipos, técnicas y requerimientos de magnetización

Los equipos implementados para la magnetización en el método de partículas magnéticas básicamente los podemos dividir en dos grupos: portátiles y estacionarios.

Es fácil de entender que la aplicación dictaminara el tipo de equipo que debemos o estaríamos limitados a utilizar. Suponiendo que debemos hacer una inspección en campo travesía de un cordón de soldadura deberíamos asumir que el equipo adecuado para la aplicación sería uno portátil ya que un equipo estacionario no solamente sería difícil de llevar, sino que además la fuente de corriente no estaría disponible.

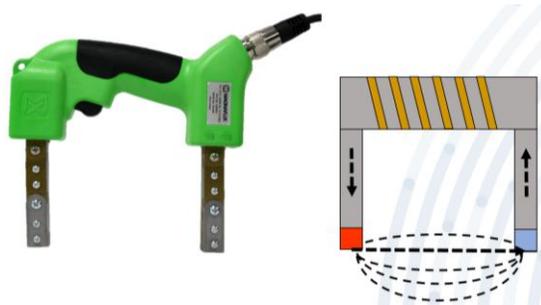
Por otra parte, si lo que estamos buscando es productividad de trabajo para piezas que pueden ser manipuladas fácilmente probablemente un sistema estacionario puede resultar sumamente beneficioso.

1. Sistemas Portátiles

1.1 Yugo Electromagnético – Inducción Indirecta – Campo Longitudinal

La magnetización con Yugo Electromagnético es una de las más implementadas en situaciones en donde predomina la movilidad por parte del sistema de inspección y las condiciones del componente permiten la evaluación mediante el yugo.

En la siguiente imagen podemos apreciar un yugo electromagnético.



En la imagen presentada se aprecia un yugo electromagnético, se observa que consta de dos patas metálicas que entran en contacto con la superficie evaluada. Por otra parte cuenta con un cuerpo en el cual se tiene una bobina tal y como se aprecia en el croquis de la figura.

La magnetización mediante el yugo es del tipo indirecta ya que la corriente fluye es a través de la bobina que generara el campo magnético que será inducido en la pieza. De manera adicional el campo inducido en la pieza será del tipo longitudinal.

1.2 Yugo de Imán Permanente – Inducción Indirecta

Los yugos de imán permanente como bien lo dice su nombre logran la magnetización del componente debido a la presencia de un imán permanente. El yugo de imán permanente se observa en la siguiente figura.



En la figura anterior podemos observar dos yugos electromagnéticos, simplemente observando la imagen podemos apreciar el gran beneficio que brinda trabajar con un imán permanente, siendo este la carencia de una fuente eléctrica. Esto permite que el yugo de imán permanente tenga una portabilidad superior a las otras técnicas.

La magnetización que brinda este tipo de yugo es longitudinal.

1.3 Bobinas portátiles – Inducción Indirecta

Otro sistema portátil seria la implementación de bobinas diseñadas con la portabilidad en mente. En la siguiente figura podemos apreciar una bobina.



En la figura anterior podemos apreciar una bobina, se observa como la bobina tiene un punto de conexión que permite implementarla con una fuente de corriente comercial por lo tanto no requiere de una fuente semiportatil o estacionaria.

Las bobinas pueden variar en diámetro para la magnetización de diversos tipos de piezas.

La magnetización que genera la bobina es del tipo indirecta y longitudinal.

2. Equipos semiportátiles

Este tipo de equipos son básicamente fuentes de generación que a pesar de ser relativamente grandes y robustas tienen la capacidad de movilizarse a los componentes que requieran inspección. En la siguiente imagen podemos observar algunos sistemas semiportátiles de partículas magnéticas.



Como podemos observar en la imagen anterior estos equipos son sustancialmente más grandes que un yugo electromagnético pero siguen teniendo la capacidad de ser transportado al sitio de implementación.

Estos equipos móviles tienen la capacidad de generar altos valores de corriente que facilitan la inspección de componentes grandes.

El voltaje con el que estos tipos de equipo operan varía dependiendo de la marca y modelo pero usualmente trabajan con un voltaje de 220V.

Con respecto a la corriente que pueden generar también varía dependiendo de la marca y modelo pero podemos agrupar a grosso modo en dos rangos de corriente generada. Equipos móviles de bajo rango generan una corriente entre 500A y 1500A. También existen equipos móviles con un mayor poder de generación, aquí estaríamos hablando de una corriente entre 3000A y 6000A.

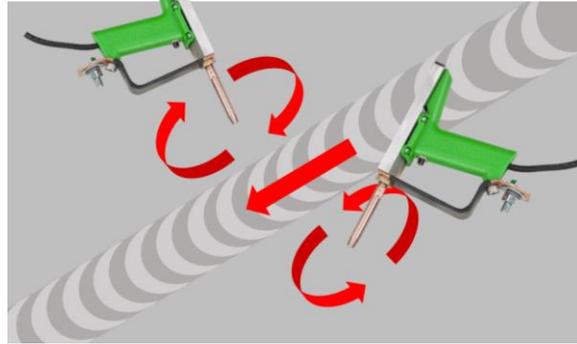
Estos tipos de equipos normalmente generan dos tipos de corriente: Corriente Alterna y HWAC.

Ahora bien, los equipos que se observaron en la imagen anterior solamente funcionan como el generador de la corriente para la magnetización pero necesitan una herramienta para transmitir la corriente al componente ya sea de manera directa o indirecta. Podemos hablar de dos tipos de aplicaciones:

- ✓ Magnetización con Electrodo.
- ✓ Magnetización con Cables.

2.1 Electrodo – Inducción Directa – Campo Circular

Los electrodos son una herramienta que permiten introducir una corriente eléctrica en un componente, usualmente son de cobre debido a su alta conductividad. En la siguiente figura podemos apreciar una magnetización con el uso de electrodos.



Tal y como se aprecia en la figura anterior la corriente fluye a través de los electrodos, sabiendo que la corriente fluye a lo largo del electrodo y sabiendo que el campo magnético es perpendicular a dicho recorrido obtendremos un campo magnético circular en función de los electrodos.

La magnetización con los electrodos resulta sumamente útil cuando el tamaño del componente limita la aplicación de otras técnicas y se desea obtener una magnetización circular.

Normalmente se implementa DC o HWAC, en ambos casos el amperaje requerido para la magnetización será el mismo. Sin embargo, el tipo de corriente HWAC consume mucho menos voltaje y por lo tanto los efectos de temperatura producida en los puntos de contacto del electrodo se ven disminuidos. De manera adicional el HWAC también produce una mayor movilidad de las partículas que la corriente DC.

2.2 Cables

Los cables son sumamente útiles para ciertas aplicaciones ya que brindan el beneficio de la flexibilidad en su uso.

Se pueden implementar para hacer pasar el flujo de corriente a través del componente o también se pueden enrollar alrededor del componente para inducir indirectamente el campo magnético.

A continuación se muestra una imagen de un equipo con cables para la magnetización.



La longitud de los cables varía en función de la aplicación pero se puede hablar de un rango de 4m a 30m. Es importante recordar que a medida que el cable es más largo la fuerza de la magnetización disminuye, es por ello que para algunas aplicaciones se recomiendan cables cortos.

3. Equipos Estacionarios

Los equipos estacionarios son equipos que no tienen la posibilidad de desplazarse debido a su tamaño y condiciones de operación.

Por lo tanto, los componentes a ser inspeccionados con este sistema de inspección deben poderse trasladar y además de cumplir unas dimensiones máximas de tamaño para poder ser inspeccionado mediante alguna de las técnicas que ofrece el sistema estacionario.

Estos equipos estacionarios tienen la capacidad de generar una magnetización lineal y circular en el componente mediante: bobinas, contacto directo o conductor central.

Este tipo de equipo suele ser un equipo estacionario que no es adaptable a trabajo en campo. Puede generar magnetización lineal y circular. En la siguiente figura podemos apreciar cómo se logran dichas magnetizaciones.

El sistema estacionario más común es el banco horizontal húmedo. En la siguiente figura se aprecia uno de estos equipos.



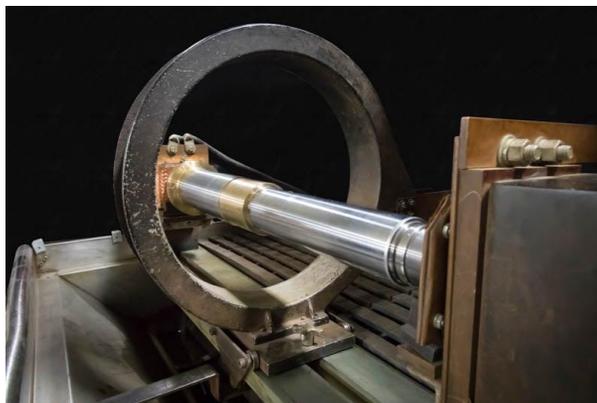
Tal y como se aprecia en la figura anterior, el banco horizontal posee una bobina movable y puntos de contacto movibles para adaptarse a la configuración del componente a evaluar.

Dependiendo de la marca y modelo del equipo los tipos de corriente varían al igual que los rangos de corriente que puede implementar. Pero de manera general podemos mencionar que pueden trabajar con AC, DC, HWDC y FWDC. Con respecto al amperaje de la corriente podríamos estar hablando de valores entre 2500A hasta los 10000A.

Un punto importante a mencionar es que para la aplicación de las partículas húmedas se debe desconectar la fuerza magnetización justo antes de empezar el flujo del líquido, esto para eliminar cualquier riesgo de chispas o arco eléctrico.

3.1 Magnetización mediante el uso de bobinas – Inducción Indirecta – Campo Longitudinal

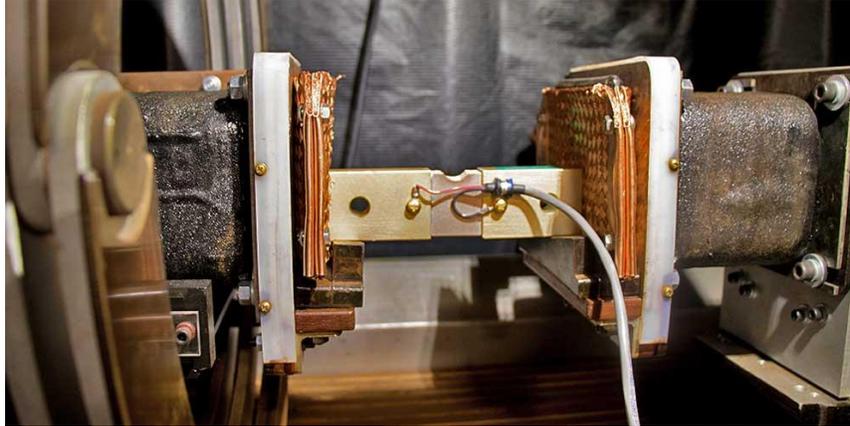
Sabemos que la implementación de una bobina generara un campo longitudinal en el componente mediante una inducción indirecta. En la siguiente figura se observa un ejemplo de un componente siendo magnetizado por una bobina en un equipo estacionario.



En la figura anterior observamos como la bobina alrededor de la pieza.

3.2 Magnetización mediante Head Shot – Inducción Directa – Campo Circular

El equipo estacionario también puede generar una magnetización circular en el componente mediante dos contactos con los cuales se sujeta la pieza, a través de dichos contactos se introduce un flujo de corriente en la pieza. Esta técnica de magnetización en el equipo estacionario se suele llamar en inglés como “Head Shot”. En la siguiente figura podemos apreciar esta técnica de magnetización.



Tal y como se observa en la figura anterior la pieza se encuentra sujeta por contactos de cobre que están conectados a la fuente de corriente del equipo estacionario. Estos contactores se pueden ajustar en función del tamaño de la pieza evaluada.

3.3 Magnetización mediante el uso de un conductor central – Inducción Indirecta – Campo Circular

Otra técnica que puede ser implementada con el equipo estacionario es la magnetización mediante el uso de un conductor central. Esta técnica se puede implementar cuando el componente a evaluar tiene una zona hueca que permite pasar un tubo de cobre a través de este orificio. Esto se puede apreciar en la siguiente figura.



Tal y como se observa en la imagen, se tiene un componente que está siendo magnetizado circularmente mediante una inducción indirecta.

4. Técnica Continua y Residual

Como ya se ha mencionado anteriormente la presencia de un campo magnético que genere la fuga de flujo por las discontinuidades es crucial para el método.

Tal y como se observó en la curva de histéresis sabemos que la retentividad del campo magnético varía dependiendo del tipo de material.

Si pensamos en la evaluación del componente podríamos realizarlo de dos formas.

4.1 Forma Continua

Esta técnica se basa en que la aplicación de las partículas magnéticas se realiza al mismo tiempo que la aplicación de la fuerza de magnetización.

La forma continua suele ser la técnica predilecta cuando se requiere obtener la máxima sensibilidad.

Esto es fácil de entender ya que al tener la fuerza de magnetización constante siempre se llegará a los picos de voltaje de cada uno de los tipos de corriente, independientemente del tiempo (Esto no aplica para corriente directa y FWAC).

Por otra parte la fuerza del campo magnético no sufrirá una disminución como puede ocurrir al remover la fuente de magnetización. Recordemos que al eliminar la fuente de magnetización la curva de histéresis llevará el comportamiento del material al punto de retentividad y dependiendo del material este puede que no brinde la sensibilidad mínima para

la prueba. Supongamos un material con alta permeabilidad, será difícil de magnetizar y además su retentividad será baja.

Otra ventaja que provee el método continuo es que dependiendo del tipo de corriente implementado brindara una movilidad adicional a las partículas magnéticas en la superficie del componente evaluado, esto aplica para el caso de corriente alterna o corriente pulsada.

4.2 Forma Residual

La forma residual quiere decir que antes de aplicar las partículas magnéticas se magnetiza el componente y se retira la fuente de magnetización y solamente se trabaja con el campo magnético residual que permita las propiedades magnéticas del componente.

No suele ser un método aplicado normalmente, pero si puede resultar sumamente efectivo para materiales con alta retentividad. En dicho caso esta técnica puede ahorrar mucho tiempo debido a la automaticidad que se le puede brindar

5. Requerimientos y cálculos para la magnetización

La cantidad de corriente que se debe implementar para magnetizar el componente para la prueba de partículas magnéticas variara dependiendo de múltiples factores como la geometría de la pieza, conductividad del material, tipo de corriente, técnica de magnetización, entre otras variables.

La correcta selección del nivel de la corriente es fundamental ya que tener la cantidad apropiada brinda los resultados adecuados. De esto podemos decir lo siguiente:

- ✓ Si se excede por encima la cantidad de corriente necesaria puede resultar en una acumulación excesiva de partículas magnéticas y se pueden enmascarar indicaciones.
- ✓ Otro fenómeno que puede ocurrir al excederse de la cantidad necesaria de corriente es que la pieza evaluada puede sufrir una quemadura puntual.
- ✓ Si el nivel de la corriente es inferior al necesario puede que no se genere suficiente fuga de flujo magnético y en consecuencia no se atraerán las partículas para denotar las indicaciones.

Ahora bien, ¿Cuál es el amperaje que tenemos que implementar?

La manera más fácil de responder esta pregunta es simplemente diciendo: Siguiendo lo establecido en el procedimiento.

Entonces para ello nos vamos a basar en la norma ASTM E1444/E1444M – 12, titulada: Práctica estándar para prueba con partículas magnéticas.

5.1 Amperaje para la magnetización circular directa

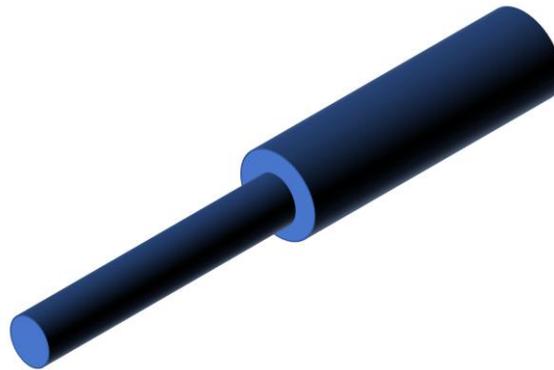
Si leemos el punto X3.3 de la ASTM E1444 podremos ver las especificaciones para este tipo de magnetización.

A manera de repaso recordemos que magnetización directa significa que la corriente pasa a través del componente evaluado y magnetización circular quiere decir que se tendrá un campo con recorrido circular en la pieza evaluada.

La norma establece que se deberá implementar un rango de corriente entre **300A y 800A** por pulgada de diámetro del componente. Ahora bien, el diámetro lo definimos como la distancia más grande entre dos puntos en la circunferencia externa del componente-

Si pensamos en una barra que tiene un diámetro de tres pulgadas podríamos establecer de manera general que el amperaje debería ser entre 900A y 2400A.

En el caso de componentes con geometrías relativamente complejas hay que definir correctamente el procedimiento de inspección. Un ejemplo puede ser la siguiente pieza:



Tal y como se aprecia el componente tiene dos secciones cada una con un diámetro diferente, esto quiere decir que el cálculo del amperaje será diferente para cada sección.

Por lo tanto, para realizar la inspección mediante partículas magnéticas correctamente tenemos que pensar en realizar la inspección por etapas.

Suponiendo que la sección delgada tiene 1" de diámetro y la sección gruesa tiene 2" de diámetro tendremos que los rangos de amperaje serán: 300A y 800A para la sección delgada y 600A y 1600A para la sección gruesa.

Una recomendación para la magnetización de componentes con múltiples secciones es siempre inspeccionar las zonas con menor amperaje primero ya que si se magnetiza con el mayor amperaje se deberá desmagnetizar para luego magnetizar, este paso se elimina si se realiza en un orden ascendente.

5.2 Amperaje para la magnetización circular indirecta mediante conductor central

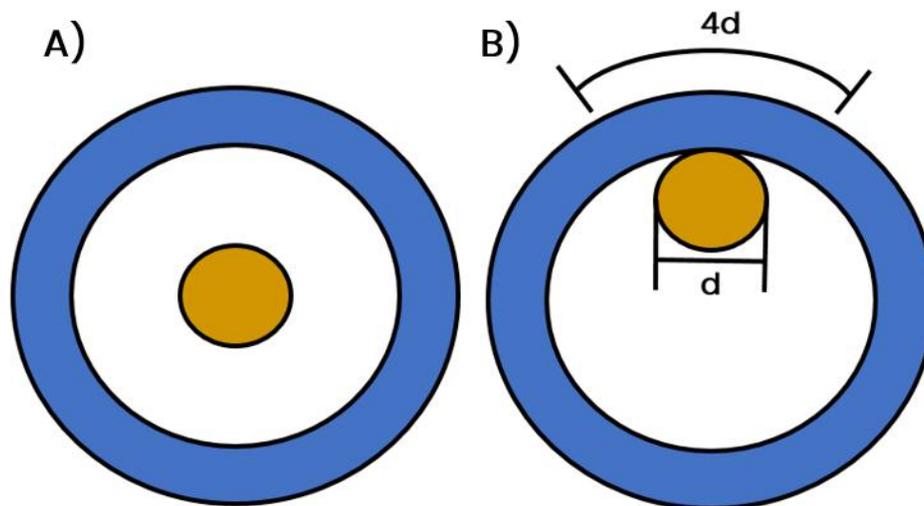
Si leemos el punto X3.4 de la ASTM E1444 podremos ver las especificaciones para este tipo de magnetización.

En este caso sabemos que se pasa una corriente a través de una barra central que se coloca dentro del componente a evaluar.

El cálculo de la corriente es muy similar al presentado en el punto 6.1 pero hay que hacer dos acotaciones. La primera sería la correcta interpretación del diámetro de la pieza y en segundo lugar, la ubicación del conductor central en referencia al componente.

En el caso de que la inspección solamente quiera tomar en cuenta la superficie interna de la pieza el diámetro a considerar será: la distancia más grande entre dos puntos internos que se encuentren a 180° entre sí. Por el contrario, si se desea inspeccionar el componente en su totalidad el diámetro se obtiene como se mencionó en 6.1.

Otra variable a mencionar es la ubicación del conductor central en referencia a la pieza evaluada. Y realmente deberíamos pensar en dos casos, tal y como se aprecia en la siguiente figura.



En la figura anterior observamos dos casos de magnetización con conductor central.

A) Magnetización con el conductor central en el eje central

En este caso la magnetización el conductor central se ubica en lo que sería el eje central de la pieza evaluada. La corriente se calcula igual que en el caso 6.1, es decir: un rango entre **300A y 800A** por pulgada de diámetro del componente.

B) Magnetización con el conductor central en contacto con superficie interna

En este caso la magnetización el conductor central se ubica contacto con la superficie interna. Tal y como se aprecia en la figura el radio de acción de la magnetización se ve disminuida ya que la fuerza de magnetización no parte desde el centro geométrico. Dicho de radio de acción es equivalente a un radio de cuatro veces el diámetro del conductor central, aproximadamente. Para poder inspeccionar la totalidad del componente hay que rotar la pieza.

Con respecto a la corriente que se debe aplicar para este caso también equivale al presentado en 6.1, es decir: un rango entre **300A y 800A** por pulgada de diámetro del componente.

Pero, la consideración del diámetro varía en este caso. El diámetro en este caso es igual al diámetro del conductor central más el doble del espesor de la pieza inspeccionada.

5.3 Amperaje para la magnetización lineal mediante el uso de bobinas

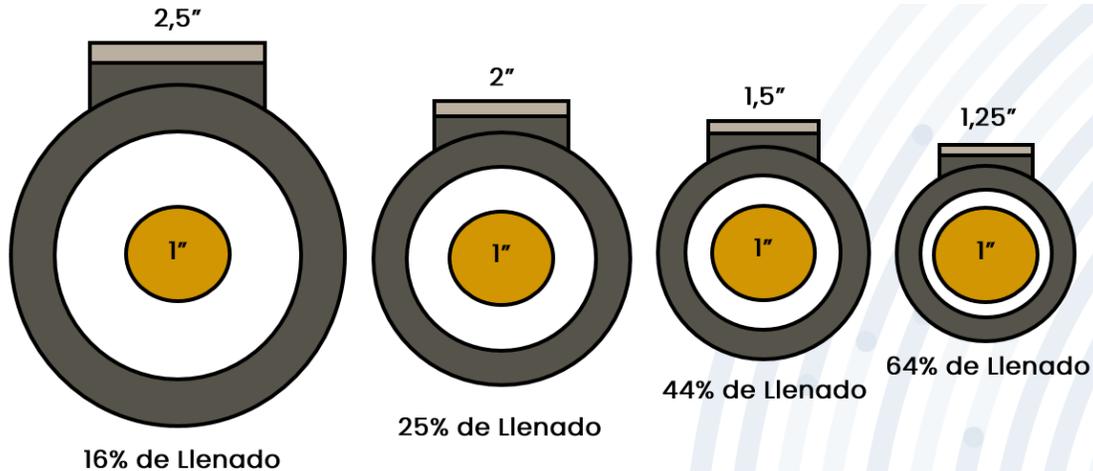
Al implementar una bobina para la generación de magnetización lineal en el componente hay que tener una consideración muy importante incluso antes de seleccionar el amperaje de la corriente.

La primera consideración es seleccionar que tamaño de bobina se va a implementar. En la siguiente figura podemos observar algunos tipos de bobinas.



Tal y como se aprecia en la figura anterior podemos implementar varios tamaños y esto repercute en cómo se da la magnetización en el componente. Pero al igual que el tamaño de la bobina puede cambiar también puede cambiar el tamaño del componente evaluado.

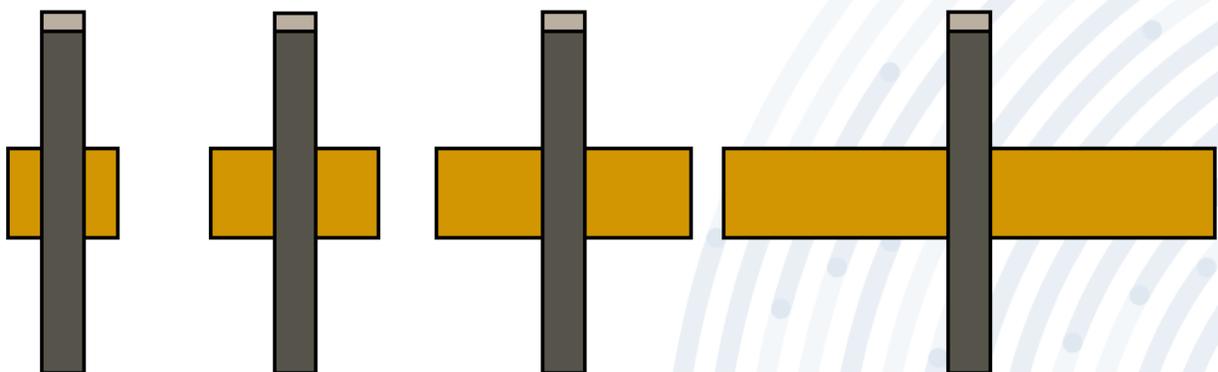
Por lo tanto, aquí más bien deberíamos de hablar de un factor de llenado de la pieza evaluada en función del área transversal de la bobina. En la siguiente figura apreciamos el cambio con respecto al factor de llenado.



Tal y como se aprecia en la figura anterior tenemos cuatro bobinas que van desde los 2,5" hasta los 1,25" y en cada caso se evalúa el factor de llenado con respecto a una pieza que tiene 1" de diámetro.

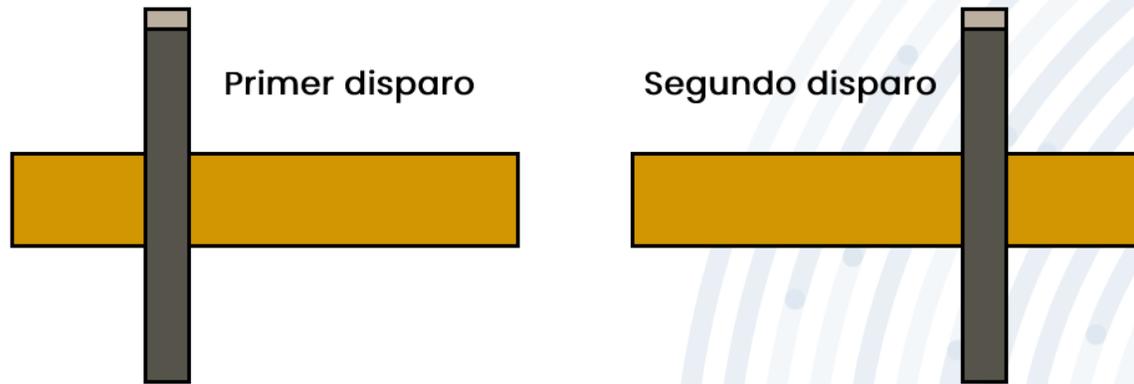
Ahora bien, en cada caso el factor de llenado varía y esto tiene un impacto directo en cómo se debe calcular la cantidad de corriente a suministrarle a la bobina para generar la magnetización.

Otro factor sumamente importante es referente a la longitud del componente a evaluar, en la siguiente figura observamos la diferencia.



Tal y como se aprecia en la figura anterior observamos como de izquierda a derecha aumenta el tamaño del componente a evaluar. Según la ASTM E1444 la distancia efectiva de magnetización de la bobina se extiende en ambas direcciones de la bobina por una distancia de aproximadamente del radio de la bobina. Ahora bien, es importante utilizar los medidores de gauss para garantizar la magnetización.

Si la longitud del componente no permite que la inspección se pueda realizar en un solo disparo se deberá realizar lo permitido para abarcar toda la longitud, un ejemplo se aprecia en la siguiente figura.



Tal y como se aprecia en la figura anterior para inspeccionar este componente se realizan dos disparos. Es importante en el proceso de posicionar el objeto que se deje un traslape de al menos 10% de la longitud del componente para garantizar que la inspección de todo el componente.

Ahora bien, luego de todas estas consideraciones que se han mencionado con respecto a las bobinas podemos introducir los cálculos asociados a la determinación de la corriente a implementar. Pero estos cálculos se segmentan en función del factor de llenado en cuatro grupos:

- ✓ Bobinas con bajo factor de llenado.
- ✓ Bobinas con factor de llenado intermedio.
- ✓ Bobinas con alto factor de llenado o mediante cables.
- ✓ Magnetización con bobinas en piezas huecas.

Antes de ver cada uno de estos grupos es válido mencionar que el resultado de estos cálculos brindará un valor de corriente que debe ser utilizado como referencia, posteriormente se deberán utilizar las herramientas de verificación para garantizar buenos resultados.

Por otra parte, es sumamente importante tomar en cuenta que las fórmulas que se presentarán en los próximos puntos solamente serán válidas si se cumplen las siguientes condiciones:

- ✓ La relación entre la longitud y diámetro de la pieza evaluada, es decir L/D , es mayor que 2 y menor que 15.
- ✓ En caso de que L/D sea menor que 2 se deberán añadir piezas ferromagnéticas del mismo diámetro del componente evaluado en ambos extremos de la pieza para compensar la longitud.

5.3.1 Bobinas con bajo factor de llenado

Un bajo factor de llenado significa que el área transversal de la bobina es igual a 10 veces o más el área transversal de la pieza evaluada.

En el caso de que la pieza no se ubique en el centro sino en contacto con la superficie interna de la bobina se implementa la fórmula a continuación.

$$NI = \frac{K}{L} (\pm 10\%)$$

En donde,

N= El número de vueltas de la bobina.

I= El amperaje aplicado a la bobina.

K= Constante de permeabilidad, igual a 45000.

L= Longitud de la pieza evaluada.

D= Diámetro de la pieza evaluada.

En caso de que la pieza evaluada se ubique en el centro de la bobina se implementa la siguiente fórmula:

$$NI = \frac{KR}{\left(\frac{6L}{D}\right) - 5} (\pm 10\%)$$

En donde,

N= El número de vueltas de la bobina.

I= El amperaje aplicado a la bobina.

K= Constante de permeabilidad, igual a 43000A.

R= Radio de la bobina en pulgadas.

L= Longitud de la pieza evaluada.

D= Diámetro de la pieza evaluada.

5.3.2 Bobinas con factor de llenado intermedio

Un factor de llenado intermedio significa que el área transversal de la bobina es entre 2 y 10 veces el área transversal de la pieza evaluada. En este caso se implementa la siguiente fórmula.

$$NI = (NI)_h \left[\frac{10 - \tau}{8} \right] + (NI)_l \left[\frac{\tau - 2}{8} \right]$$

En donde,

N= El número de vueltas de la bobina.

I= El amperaje aplicado a la bobina.

$(NI)_h$ = El valor de NI calculado para bobinas de alto factor de llenado.

$(NI)_l$ = El valor de NI calculado para bobinas de bajo factor de llenado.

τ = La relación entre áreas transversales de la bobina y pieza evaluada. Es decir= $\frac{\pi r_{bobina}^2}{\pi r_{pieza}^2}$

5.3.3 Bobinas con alto factor de llenado o cables

Un factor de llenado alto significa que el área transversal de la bobina es menos de 2 veces el área transversal de la pieza evaluada. Para este caso también podemos asumir que la bobina puede ser realizada mediante cable embobinado alrededor de la pieza, debido a que este arreglo también generara un alto factor de llenado. En este caso se implementa la siguiente fórmula.

$$NI = \frac{K}{\left(\frac{L}{D} + 2\right)} (\pm 10\%)$$

En donde,

N= El número de vueltas de la bobina.

I= El amperaje aplicado a la bobina.

K= Constante de permeabilidad, igual a 43000A.

L= Longitud de la pieza evaluada.

D= Diámetro de la pieza evaluada.

5.3.4 Piezas huecas y su relación L/D

Componentes huecos o parcialmente huecos

En el caso de los componentes que son huecos o parcialmente huecos el valor del diámetro “D” se deberá reemplazar por un diámetro efectivo D_{eff} . El cálculo de este valor se realiza mediante la siguiente formula:

$$D_{eff} = 2\left(\frac{A_t - A_h}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde,

A_t = El área transversal total de la pieza evaluada.

A_h = El área transversal de la sección hueca.

Componentes cilíndricos huecos

En el caso de los componentes que son huecos o parcialmente huecos el valor del diámetro

$$D_{eff} = \left((OD)^2 - (ID)^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde,

OD= Diámetro externo del cilindro.

ID= Diámetro interno del cilindro.

5.4 Amperaje cuando se implementan electrodos

El amperaje implementando electrodos varía en función del espesor pero otro factor importante a tomar en cuenta es el distanciamiento entre los electrodos, para ello podemos ver la siguiente tabla.

Espesor del Material	Distanciamiento entre electrodos	Amperajes
$\frac{3}{4}$ in o menos	3.5 a 4.5 A/mm	90 a 115 A/in.
$\frac{3}{4}$ in o más	4.0 a 5.0 A/mm	100 a 125 A/in.

El espaciado entre los electrodos nunca debe ser menos a 2” o mayor a 8”.

La zona efectiva de magnetización es un cuarto del distanciamiento entre los electrodos, hacia cada lado de la línea recta que conecta a los electrodos.

Capítulo 7: Equipamiento Adicional en Partículas Magnéticas

1. Equipos para técnicas fluorescentes

Para la implementación de partículas magnéticas fluorescentes es necesario la implementación luz ultravioleta, la cual generara la fluorescencia de los pigmentos.

La luz ultravioleta al igual que la luz visible es parte del espectro electromagnético pero la diferencia es que la frecuencia es mayor. Su nombre se origina debido que su rango en el espectro se ubica desde los tamaños de onda más pequeñas que el ser humano es capaz de ver, y ese color es el color violeta y por eso se llaman Luz Ultravioleta. En la siguiente figura podemos observar la implementación de una lámpara de luz ultravioleta para visualizar la fluorescencia.



Dentro de la luz ultravioleta existen distintos tipos dependiendo de la longitud de onda, pero no hace falta evaluar todos los tipos sino solamente el implementado en partículas magnéticas. La luz ultravioleta implementada en este método es la Luz Ultravioleta “A”, que se puede abreviar como UVA.

Este tipo de luz ultravioleta se caracteriza por tener una longitud de onda entre 315 y 400 nanómetros.

Dentro de los equipos implementados para técnicas fluorescentes debemos hablar básicamente de dos: Lámpara de Luz Ultravioleta y Radiómetro.

1.1 Radiómetro

Al igual que la luz visible la luz ultravioleta también debe cumplir ciertos requerimientos mínimos para poder ejecutar el trabajo de inspección correctamente.

Para poder cuantificar la luz ultravioleta tenemos que conocer su unidad de medición. La unidad con la que se mide la intensidad de la luz ultravioleta es los miliwatts por centímetro cuadrado (mW/cm^2).

Los valores precisos de cual tiene que ser la intensidad de la luz ultravioleta dependerá de la norma y procedimiento implementado, pero en líneas generales podemos hablar de una intensidad de $1000 \text{ mW}/\text{cm}^2$ a una distancia de 15 pulgadas.

Para garantizar la intensidad adecuada de la luz ultravioleta para la inspección es necesario utilizar una herramienta conocida como Radiómetro. En la siguiente figura se presenta la herramienta.



1.2 Lámpara de Luz Ultravioleta

La generación de la luz ultravioleta para aplicaciones industriales es a través del uso de lámparas especializadas para estos fines, la forma y tamaño dependerá de la aplicación, pero para uso en campo podemos pensar en una lámpara como la que podemos apreciar en la siguiente figura.



Ciertamente dependiendo de la aplicación podemos encontrar otro tipo de lámparas como lámparas de techo para aplicaciones en sistemas estacionarios o inclusive lámparas más portátiles.

Ahora bien, la forma en cómo se genera la luz ultravioleta puede ser de dos formas.

- ✓ **Fuente de Luz Ultravioleta Tradicional / Bombillos:** Este tipo de fuente se basa en la utilización de bombillos incandescentes. Estos bombillos tienen una pequeña cantidad de gas de mercurio que es sometido a una carga eléctrica y lo que le sucede al mercurio al “excitarse” es que desprende luz ultravioleta. Por muchos años este fue la única forma de generar luz ultravioleta para este tipo de ensayos. Para más información respecto a la normativa de la luz ultravioleta que se basa en bombillos se puede buscar la norma ASTM E2297.
- ✓ **Fuentes de Luz LED:** Con respecto a la luz ultravioleta generada por LED podemos pensar en que la luz ultravioleta se genera a través del uso de semiconductores que han sido diseñados para generar este tipo de luz. La gran ventaja que tienen es que el tamaño de la lámpara se ve reducida por la ausencia del bombillo incandescente y además elimina el uso de mercurio siendo una opción más ecológica.

Para más información respecto a la normativa de la luz ultravioleta que se basa en LED se puede buscar la norma ASTM E3022

1.3 Precaución a la Luz Ultravioleta

Tenemos que recordar que la luz ultravioleta a fin de cuenta es radiación que tiene una longitud de onda que es superior a la de luz visible y esto puede significar problemas desde el punto de vista de seguridad.

Hay que guardar las precauciones en el uso de las lámparas ultravioleta y en la exposición a la luz.

Con respecto al uso de la lámpara podemos mencionar los siguientes puntos:

- ✓ Algunos modelos de lámparas de luz ultravioleta de bombillo pueden calentarse y generar quemaduras a los usuarios.
- ✓ Altas temperaturas producto del calentamiento de la lámpara puede generar la ignición de vapores cercanos a la lámpara.

Ahora bien, los peligros más grandes con respecto al uso de luz ultravioleta giran en torno a la exposición de la luz UVA porque a fin de cuentas recordemos que esta luz es radiación. A continuación, mencionamos algunos puntos a tomar en cuenta:

- ✓ La luz ultravioleta puede generar efectos físicos, químicos y fisiológicos en el ser humano dependiendo del tiempo de exposición.



- ✓ Se ha demostrado que la radiación por luz ultravioleta en el rango utilizado para las inspecciones con líquidos penetrantes no genera danos permanentes en los seres humanos. Pero el peligro aquí es que necesariamente se tienen que utilizar lámparas calificadas para no tener estos problemas.

La lámpara tiene que tener los filtros recomendados para que la luz ultravioleta que se emite este en el rango adecuado. El rango de uso en líquidos penetrantes fluorescente es de 365 nanómetros.

- ✓ Si se tienen una lámpara de luz ultravioleta deficiente puede que se genere radiación ultravioleta con una longitud de onda de 310nm. Si esto llegase a ocurrir el filtro de la lámpara y el operador llega a exponerse a dicha luz se puede generar una condición llamada Fotoqueratitis que son ulceraciones en la córnea de los ojos. Esta enfermedad es reversible si se trata a tiempo y el daño no es tan grande.
- ✓ No comprar o utilizar lámparas de marcas dudosas ya que una buena lámpara con un buen filtrado es crucial desde el punto de vista de seguridad del operador. Y la longitud de onda no es algo que se pueda evaluar con un radiómetro.

2. Blanco Contraste

Para entender el funcionamiento y lo que aporta el blanco contraste a la inspección de partículas magnéticas tenemos que entender lo que significa contraste y el efecto directo que puede tener en los resultados de la inspección.

El contraste desde un punto de vista de la percepción visual es la diferencia de luminosidad o de colores que puede presentarse entre dos objetos, desde un punto de vista teórico lo podemos asociar con la diferencia de longitudes de onda y de saturación producto de la cantidad de onda. Ahora bien, en función de la inspección la capacidad de discernir visualmente es clave para detectar las discontinuidades, principalmente para los métodos de líquidos penetrantes, partículas magnéticas e inspección visual.

De un modo general podemos evaluar la siguiente figura que muestra distintos niveles de contraste en función de los colores.



BEST

Black on Yellow	Yellow on Black
Black on White	White on Black
Black on Orange	Orange on Black
Blue on White	White on Blue
Green on White	White on Green
Red on White	White on Red

FAIR

Red on Yellow	Yellow on Red
Red on Black	Black on Red
Red on Orange	Orange on Red

POOR

Red on Blue	Blue on Red
Red on Green	Green on Red

En la figura anterior observamos como de izquierda a derecha aumenta la dificultad de leer el texto. Y esta dificultad aumenta debido a la disminución del contraste entre las letras y el color del fondo.

¿Por qué esto es importante? Para entender el impacto que tiene esto es la inspección con las partículas magnéticas pensemos en los distintos colores de las partículas visibles.

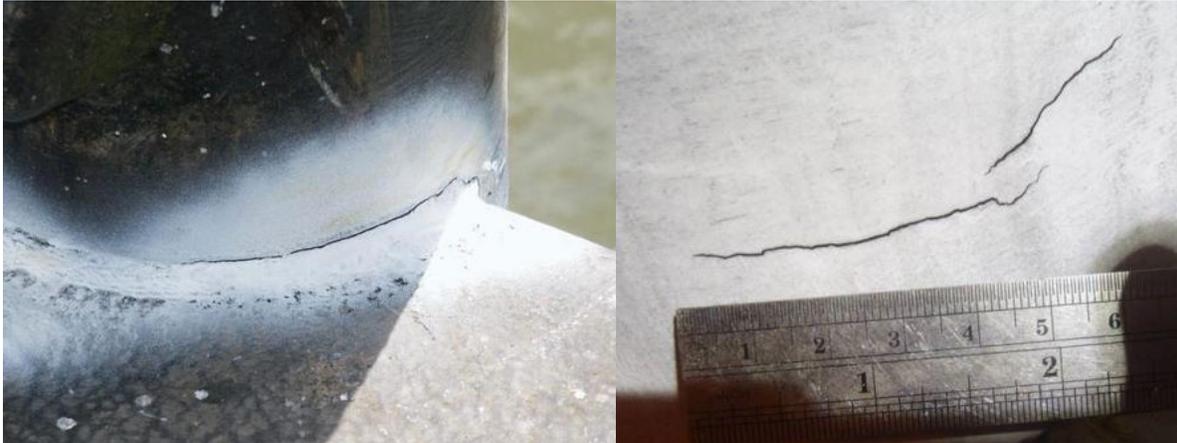


El color de las partículas no afecta en su magnetización y en su capacidad de detectar las discontinuidades pero si impactar en la capacidad el inspector de detectarlas en función del contraste que generen con el fondo. Suponiendo que una partícula roja se aplique sobre un componente de color rojo hará que sea difícil detectarlas para el inspector.

Es por ello que la implementación del blanco contraste en la inspección puede resultar sumamente beneficiosa.

Blanco Contraste: El blanco contraste genera un fondo de alto contraste, de color blanco, para mejorar la probabilidad de detección en el método de partículas magnéticas.

Un ejemplo de aplicación de blanco contraste se puede ver en las siguientes imágenes.



En las figuras anteriores se aprecia claramente el contraste que generan las partículas magnéticas sobre el fondo blanco generado por el blanco contraste.

3. Gaussímetros

El gaussímetro es una herramienta implementada por los inspectores para medir la intensidad de la fuerza de magnetización.

Estos componentes basan su funcionamiento en un sensor de efecto hall. Para entender cómo funcionan estos sensores expliquemos brevemente este efecto.

El efecto hall básicamente es la generación de un campo eléctrico perpendicular al campo magnético que se encuentra dentro de un componente.

Ahora bien, los gaussímetros implementan el sensor para detectar dicho campo eléctrico y este generara un voltaje. Este voltaje será proporcional a la intensidad del campo magnético y por lo tanto se podrá medir mediante el gaussímetro la intensidad del campo en el componente evaluado. Dicha intensidad se mide en la unidad de Gauss [G], el equivalente en el sistema SI es el Tesla [T].

Es sumamente importante que el gaussímetro se encuentre alineado a 90 grados del campo magnético para poder generar la medición correctamente. Otro punto fundamental es que para que el gaussímetro puede realizar una medición es necesario que exista fuga del flujo magnético.

Podemos mencionar que existen dos tipos de gaussímetros que se implementan en los ensayos no destructivos, estos son:

Gaussímetro Analógico: el gaussímetro analógico como bien lo dice su nombre genera los resultados de una manera analógica. En la siguiente figura podemos apreciar este equipo.



Es muy importante que la flecha en la parte inferior del componente se encuentre en dirección a la zona que se quiere evaluar.

Gaussímetro Digital: En el caso del gaussímetro digital estamos hablando de un equipo más moderno, en comparación al analógico. Este brindara un resultado que no dependerá de la capacidad de lectura del inspector además de brindar una precisión mayor (dependiendo del modelo). En la siguiente figura podemos apreciar un gaussímetro digital.



Tal y como se aprecia en la figura anterior el gaussímetro digital tiene una sonda. A diferencia del gaussímetro analógico este equipo toma la lectura mediante la colocación de la sonda en la zona de interés, brindando ciertas ventajas en referencia a la implementación.

La sonda puede ser tangencial o axial, dependiendo de ello la aplicación sobre la superficie varia.

4. Pie Gauge

El pie gauge sirve para garantizar dos condiciones, las cuales son:

1. Garantiza que tenemos suficiente fuerza de magnetización en la ubicación de la inspección.
2. Identifica la dirección del campo magnético.

En la siguiente figura podemos apreciar un pie gauge.



El componente que se aprecia en la figura anterior está elaborado por un material ferromagnético pero las líneas que se observan en el octágono son de un material diamagnético. Dichas líneas simulan discontinuidades que serán perpendiculares, paralelas y a 45° de la aplicación del campo magnético.

5. QQI

Los QQI son indicadores de calidad cuantitativos, se llaman QQI por sus siglas en inglés (Quantitative Quality Indicator).

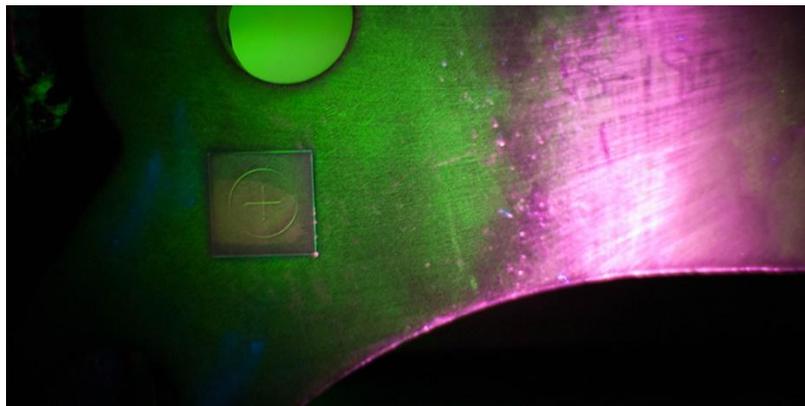
Estos componentes sirven para indicar con facilidad la dirección del campo magnético y verificar la intensidad durante la implementación de la técnica. Desde un punto de vista práctico son la herramienta más sencilla. En la siguiente figura podemos ver algunos QQI.



Tal y como se aprecia en la figura anterior podemos observar que existen distintos tipos de QCI. En su superficie tiene discontinuidades artificiales para generar una indicación en función del sentido de la magnetización.

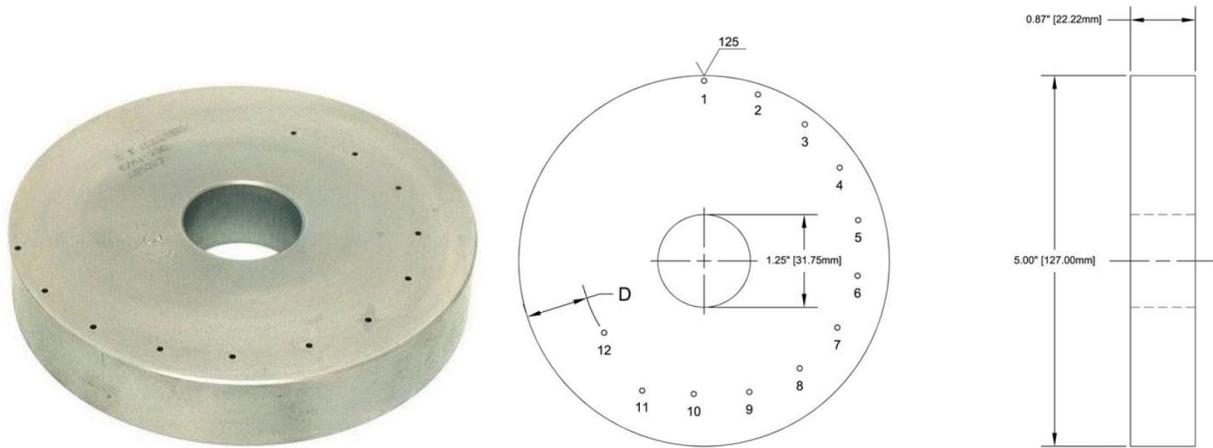
La aplicación de estos componentes requiere que estén en contacto directo con la superficie y es bueno recalcar que los QCI son flexibles por lo que se les permite adaptarse a distintos tipos de superficie.

Los QCI solamente se pueden implementar cuando se utiliza la técnica de magnetización continua y con el método de partículas húmedas.



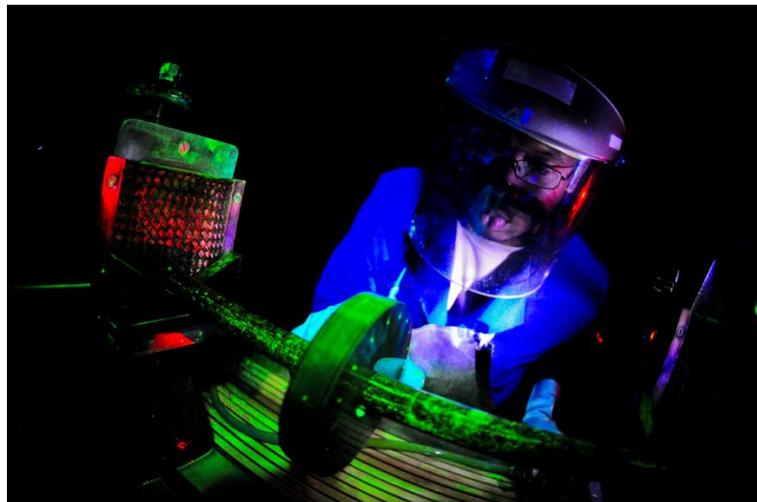
6. Anillo de Ketos

El anillo de Ketos es un patrón que permite verificar la capacidad de penetración de un sistema de partículas magnéticas en un material específico. En la siguiente figura se aprecia el anillo de Ketos y un croquis.



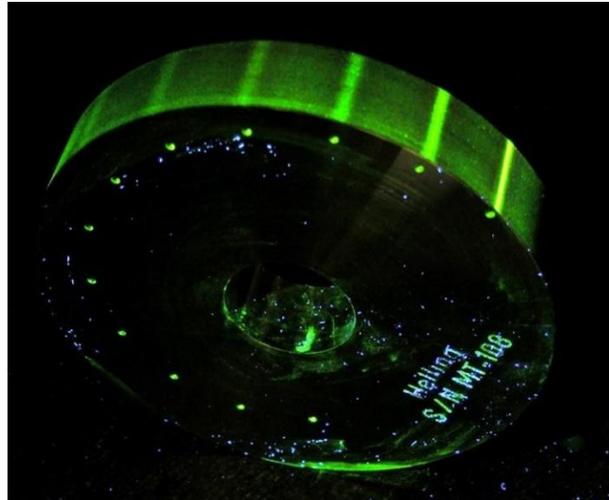
Tal y como se aprecia en la figura anterior el anillo de Ketos consta de 12 agujeros a distintas profundidades a lo largo del anillo. Este patron de verificacion cumple la norma ASTM E1444 – Práctica estandar para pruebas de particulas magneticas.

Este anillo se implementa con corriente circular. Y para ello la magnetizacion se realiza implementando un conductor central. Esto se puede apreciar en la siguiente figura.



En la figura se aprecia cómo se magnetiza el anillo de Ketos mediante un tubo de cobre que pasa a través del mismo. Esta técnica se llama magnetización por conductor central y será abarcada más adelante.

Para verificar el poder de penetración aplicamos la técnica de partículas magnéticas y en este caso en particular partículas fluorescentes, en la siguiente figura podemos observar el impacto de la profundidad.

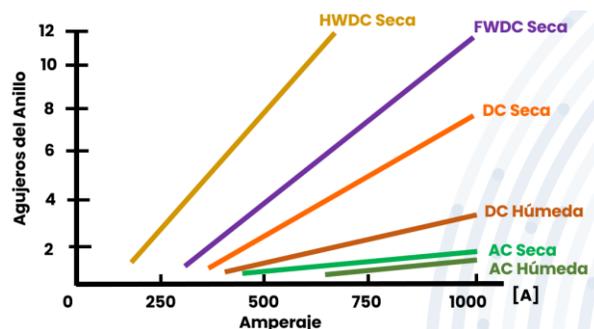


Tal y como se aprecia en la figura a medida que la profundidad de la discontinuidad aumenta la nitidez de la indicación disminuye significando una disminución de la sensibilidad producto de un menor campo magnético a dicha profundidad.

6.1 Comparación de Técnicas con el Anillo de Ketos

Como ya hemos observado a lo largo de este manual, existen múltiples factores que tendrán un impacto directo en el desempeño de la técnica de partículas magnéticas aplicadas. Ciertamente la selección de la técnica tiene múltiples matices y condicionales que deben ser tomadas en cuenta para desarrollar correctamente un procedimiento de inspección.

Ahora bien, de una manera general podemos visualizar una comparativa a través de los resultados que ofrecen las diversas técnicas sobre el anillo de Ketos. Para ello evaluemos la siguiente gráfica.



Tal y como se puede apreciar la capacidad de detección de los agujeros del anillo de Ketos no solamente varían en función del tipo de corriente implementada, sino que además el tipo de partícula magnética también tiene un impacto en el desempeño.

Capítulo 8: Etapas de Partículas Magnéticas

1. Selección de la Técnica de Partículas Magnéticas

La selección del equipo en el método de partículas magnéticas debe considerar por lo menos los siguientes puntos:

- ✓ Tipo de partículas. ¿Húmedas o secas?
- ✓ ¿Cuáles son los requerimientos de la magnetización? Lineal/Circular. AC/DC.
- ✓ ¿Se requiere una inspección portátil o estacionaria?
- ✓ ¿Magnetización lineal o circular? ¿Continua o residual?
- ✓ ¿Se requiere desmagnetización? ¿Integrada al equipo o separada?
- ✓ ¿Cuáles son los requerimientos eléctricos?
- ✓ ¿Se requieren accesorios para el equipo?

Evidentemente muchas de estas preguntas se responden tomando en cuenta el componente a evaluar, las condiciones del trabajo y los sistemas de partículas magnéticas que se tengan disponibles.

Con respecto a las etapas del proceso de inspección varía dependiendo de la técnica implementada. Pero de manera general podemos establecer las siguientes etapas.

- ✓ Magnetización del componente
- ✓ Aplicación de las partículas magnéticas
- ✓ Interpretación de los resultados
- ✓ Desmagnetización

Ahora bien, aunque estas etapas ciertamente son fundamentales para el método de partículas magnéticas también tenemos que hablar de otras etapas cruciales para desempeñar correctamente el método. Algunas de estas son:

- ✓ Verificación de la sensibilidad y concentración correcta de partículas
- ✓ Iluminación de la Luz blanca o UV-A
- ✓ Selección adecuada de la técnica y/o norma

2. Consideraciones de seguridad para el método de partículas magnéticas

En esta sección hablaremos de consideraciones generales que es recomendable tomar en cuenta para la implementación segura del método de partículas magnéticas. Acotación importante: estas son recomendaciones, en ningún momento se plantea que estos sean procedimientos de seguridad.

Generación de Arco Eléctrico

La generación de un arco eléctrico es una situación de riesgo ya que la chispa que genera dicho arco puede generar daños en la pieza o podría generar el inicio de una llama y en consecuencia un incendio si no se toman las medidas adecuadas.

Un arco eléctrico en el método de partículas magnéticas se puede generar por un mal contacto o por un nivel de corriente excesivo. En la siguiente imagen se puede apreciar un ejemplo de arco eléctrico.



Polvo de las Partículas Magnéticas

La aplicación de las partículas magnéticas secas genera un polvillo que a pesar de no ser tóxico la inhalación debería mantenerse al mínimo. Se recomienda utilizar mascarilla durante la aplicación en largos periodos de tiempo.

Lámparas de Luz Ultravioleta

Las lámparas de luz ultravioleta deberán tener filtros adecuados para evitar cualquier daño a la piel del operador. De lo contrario se pueden generar daños permanentes.

Quemaduras

La aplicación de la corriente eléctrica genera un aumento de temperatura debido a la disipación de la energía eléctrica en forma de calor. Esto resulta en un riesgo al operador si no manipula de manera adecuada las herramientas o las piezas a inspeccionar.

3. Verificación de condiciones de iluminación

Las condiciones de iluminación para la correcta ejecución del método de partículas magnéticas es sumamente importante ya que la capacidad que tenga el inspector de poder visualizar los resultados de la prueba dictaminarán los resultados que serán interpretados, por lo tanto la agudeza visual no se puede ver comprometida por las condiciones de iluminación y para ello se deben tomar en cuenta consideraciones para la iluminación.

3.1 Condiciones de iluminación para partículas visibles

En el caso de la inspección con partículas visibles se requiere de unas condiciones mínimas de visibilidad para que el inspector sea capaz de evaluar efectivamente mediante su agudeza visual.

Como condición mínima se requiere que la superficie tenga al menos 1076 lux en la superficie que está siendo evaluada mediante partículas magnéticas. Para ello se debe implementar un luxómetro que garantice dicha intensidad de luz.

3.2 Condiciones de iluminación para partículas fluorescentes

En el caso de la inspección mediante partículas fluorescentes las condiciones de visibilidad varían con respecto a la inspección de partículas visibles. La distinción se debe a que las partículas fluorescentes deben tener unas condiciones de luz blanca mínimas, la superficie no puede tener una intensidad de luz blanca mayor a 22 lux en la zona evaluada. Esto se garantiza mediante la implementación de un luxómetro.

Por otra parte, se debe utilizar luz ultravioleta para generar la fluorescencia de las partículas. Para ello se implementa las ya mencionadas lámparas de luz ultravioleta.

Para irradiar con luz UV-A adecuadamente se requiere que la superficie evaluada tenga una intensidad de al menos $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Para garantizar esto se debe implementar un radiómetro que mida dicha intensidad.

4. Verificación de magnetización previa y técnicas de desmagnetización

Este paso es sumamente importante ya que la presencia de magnetismo residual puede afectar los resultados de la prueba.

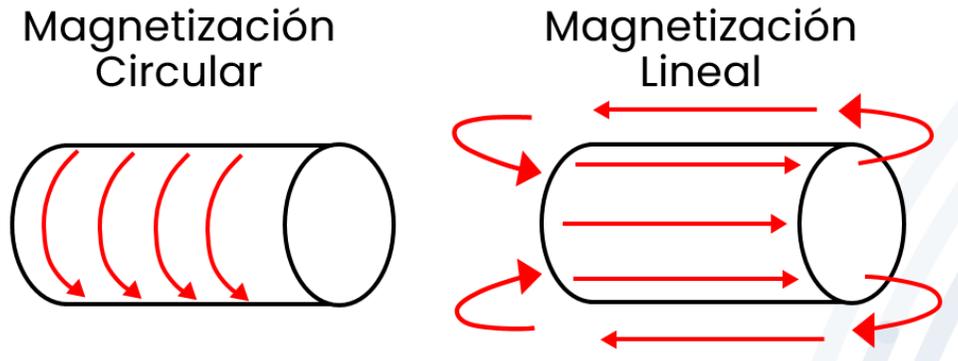
Si recordamos lo mencionado anteriormente en este manual el proceso de desmagnetización se puede explicar mediante la curva de histéresis. Lo que se debe hacer es realizar ciclos de la curva con corriente alterna en donde gradualmente se va disminuyendo la intensidad, lo que poco a poco generara una magnetización próxima a cero.

Realizar este proceso previo a la inspección es importante ya que cualquier magnetismo residual previo a la prueba debida a que si el campo magnético residual es más fuerte que el campo magnético inducido no se magnetizara correctamente a la pieza para la prueba ocasionando disminución de la detectabilidad.

3.1 Verificación de magnetización previa o de desmagnetización

Para verificar la presencia de campo magnético en el componente se debe implementar un gaussímetro analógico o digital.

Es importante entender que la verificación de la magnetización no significa que habrá flujo que se escape del componente ya que no necesariamente habrá defectos. Y esto genera un reto para la detección de dicho flujo. Para entender esto, evaluemos la siguiente figura.



En el caso de la magnetización circular se observa en la figura que las líneas del flujo magnético prácticamente no salen del componente, en el caso de la magnetización lineal el flujo sale por un extremo de la pieza e ingresan en el otro.

La presencia de esas líneas de flujo viajando por fuera del componente permite verificar si el componente se encuentra magnetizado o no.

Para facilitar la detección del flujo magnético se debe magnetizar el componente con una magnetización lineal y posteriormente implementar los gaussímetros para poder detectar la presencia de ese campo de una manera fácil.

Ahora bien, la implementación de los gaussímetros se debe a que muchas veces los estándares, normas o procedimientos tienen un magnetismo residual permisible y la utilización de dichas herramientas permite dar resultados cuantitativos en referencia a los Gauss que tenga dicho campo magnético. Aunque la función principal de esta herramienta es detección y no cuantificación.

Por facilidad se resumirá lo mencionado en los siguientes puntos:

- ✓ No hay un método satisfactorio para determinar la magnetización que se encuentra dentro del componente (sin fracturarlo). Es necesario que exista una fuga del flujo para poder determinarlo.
- ✓ Se recomienda magnetizar el componente de manera lineal para proceder a la medición.
- ✓ Los gaussímetros brindarán resultados cuantitativos para tener un valor del magnetismo residual. Aunque no

3.2 Técnicas de desmagnetización

Para lograr la desmagnetización del componente se pueden implementar distintas técnicas. Estas pueden ser:

- ✓ **Corriente Alterna:** La desmagnetización con corriente alterna es la más implementada ya que esta corriente cambia su polaridad y además se puede controlar fácilmente el nivel de la corriente.
- ✓ **Corriente Directa:** La implementación de corriente directa también es viable ya que se puede controlar el nivel de la corriente. La desventaja que tiene con respecto a la corriente alterna es que se deberá cambiar la dirección de la magnetización de manera manual.
- ✓ **Tratamiento térmico:** Mediante un tratamiento térmico que sobrepase la temperatura de Curie del material eliminara cualquier campo residual en el componente.

Ahora bien, independientemente de que tipo de corriente se implemente siempre se deberá reducir y cambiar la polaridad de esta para poder reducir el campo residual, esto se sustenta en la curva de histéresis del material.

De una manera general podemos establecer lo siguiente para cambiar la polaridad de la corriente:

- ✓ Cambiar la dirección del componente en el campo magnético.
- ✓ Cambiar la dirección de la corriente en una bobina.
- ✓ Girar la bobina 180 grados.

Por otra parte podemos mencionar lo siguiente para reducir el campo magnético:

- ✓ Reducir la corriente de magnetización.
- ✓ Alejar la pieza, poco a poco, de la fuente de magnetización.
- ✓ Alejar la bobina, poco a poco, de la pieza evaluada.

Cualquier técnica de desmagnetización, sin incluir tratamientos térmicos, implementara una combinación de los 6 puntos mencionados anteriormente.

3.2.1 Desmagnetización mediante bobina y corriente alterna

Se podría decir que esta es la técnica de desmagnetización mas implementado en la industria debido a su facilidad de implementación. La bobina es de fácil implementación y la corriente alterna facilita el trabajo debido a su cambio de polaridad intrínseco.

El cambio de polaridad cumple con el primer requisito para la desmagnetización. El segundo requisito es la disminución progresiva de la intensidad del campo, esto se puede lograr por dos vías:

7. Desplazamiento del componente evaluado a través de la bobina hasta alejarse de la misma, mediante un movimiento constante. Dicho movimiento disminuirá constantemente la cantidad de campo que recibirá la pieza.

8. Mantener el componente fijo dentro de la bobina y disminuir la corriente que circula por esto mediante un reóstato.

En la siguiente figura podemos apreciar una bobina de desmagnetización.



3.2.2 Desmagnetización mediante corriente directa

La desmagnetización con corriente directa tiene la diferencia de que no hay un cambio de polaridad natural y ya que esto es un requisito para la desmagnetización esto se debe realizar de manera mecánica.

El cambio de polaridad se puede lograr girando la pieza 180 grado o la fuente de magnetización.

La ventaja que tiene la corriente directa es que al tener un mayor poder penetración se suele preferir para componente grandes en los que la desmagnetización con corriente alterna no sea conveniente. Como desventaja podemos mencionar que requiere de un sistema mas complejo si la desmagnetización será automatizada ya que además del reóstato deberá tener un inversor para el cambio de polaridad.

Como recomendación general, la disminución del campo magnético se debe realizar previo a la inversión de la pieza/campo magnético.

3.2.3 Desmagnetización con el Yugo Electromagnético

Como bien sabemos un yugo electromagnético puede resultar una herramienta sumamente útil para aquellas aplicaciones en donde la portabilidad sea crucial.

Y tenemos que pensar que la portabilidad no es solo para la magnetización sino también para la desmagnetización. Es bueno recordar que el yugo puede suministrar corriente directa o alterna (dependiendo de la marca y modelo del yugo).

El yugo podrá ser aplicado en zonas puntuales para reducir el nivel de magnetización que pueda tener una pieza o para piezas muy pequeñas que sea viable desmagnetizar con el yugo.

La aplicación del yugo dependerá si se implementa corriente directa o alterna pero a grosso modo seguirá las directrices mencionadas anteriormente.

3.3 Efecto de la orientación de la desmagnetización

Como ya menciono en capítulos previos, la tierra tiene su propio campo magnético. Este campo magnético es muy importante tomar en cuenta para la desmagnetización si se quiere tener los mejores resultados posibles ya que la tierra dejara un magnetismo residual en el componente si la orientación no es la adecuada.

Cuando se desea una desmagnetización total del componente se debe alinear el mismo en una orientación Este – Oeste.

5. Preparación Superficial

La preparación superficial es sumamente importante para obtener buenos resultados en la inspección mediante partículas magnéticas.

Si la superficie tiene algún impedimento para el correcto desplazamiento de las partículas magnéticas esto resultara en una disminución de la sensibilidad de la inspección. Es por ello que la pieza debe ser limpiada correctamente previo a la implementación del método.

Algunos tipos de contaminantes presentes pueden ser: aceites, grasas, arenas, tierra, restos de óxido, partículas varias, entre otras.

Otro motivo que conlleva a una correcta preparación superficial es la posible presencia de partículas o virutas ferromagnéticas que interfieran con la inspección. Estas pueden generar discontinuidades falsas o afectar el resultado de la inspección.

6. Magnetización del Componentes

Como ya hemos observado la magnetización del componente es fundamental para obtener buenos resultados en la inspección. Ahora bien, sabemos que la magnetización varía en función de lo que estemos inspeccionando, para sintetizar las variables que impactan en esta selección podemos ver el siguiente listado.

- ✓ Forma del componente a evaluar.
- ✓ Tipo de corriente de magnetización.
- ✓ Dirección del campo magnético.
- ✓ Nivel de amperaje para la corriente.

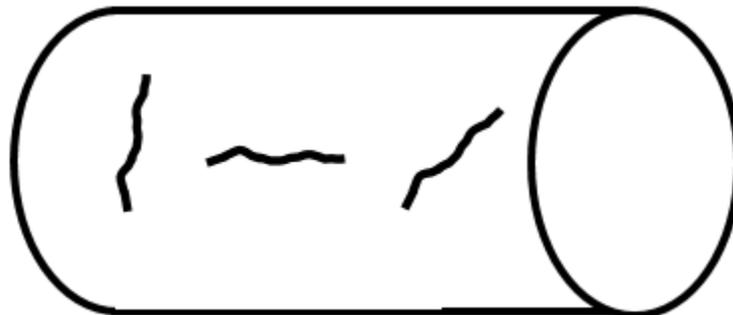
- ✓ Tipo de discontinuidades a detectar.
- ✓ Propiedades magnéticas del componente.

Una vez se hayan tomado en cuenta las variables presentadas en la lista anterior debemos tomar una decisión sobre la técnica de magnetización, y la selección de esta tiene que tomar en cuenta una decisión con respecto a cada uno de los puntos listados a continuación.

- ✓ Sistema portátil o semiportátil.
- ✓ Orientación de la discontinuidad. Magnetización lineal o circular.
- ✓ Magnetización continua o residual.
- ✓ Selección del tipo de corriente. Directa, Alterna, HWAC o FWAC.

Estas variables influyen en el cómo se procederá a generar la magnetización del componente.

Por otra parte, también debemos recordar que la magnetización del componente no se limita a una sola magnetización sino que podemos implementar distintas técnicas en un solo componente para poder evaluar la totalidad de la pieza evaluada. Un ejemplo lo podemos ver en la siguiente figura.



Si evaluamos el objeto en la figura anterior nos daremos cuenta que con una sola dirección de la magnetización no será suficiente para detectar todas las discontinuidades presentes en el mismo. Es por ello que es muy importante entender el impacto de la magnetización en la prueba de partículas magnéticas.

Cada componente debe ser analizado en profundidad para determinar todas las técnicas de magnetización que se deberían implementar para garantizar una inspección satisfactoria. Aquí es donde un procedimiento verificado y aprobado para la inspección resulta en un apoyo enorme para el inspector.

7. Bloques y estándares de Referencia para Partículas Magnéticas

Sabemos que los ensayos no destructivos requieren de una referencia artificial para evaluar una discontinuidad conocida con algo desconocido y en consecuencia poder dar resultados en función de un criterio de aceptación.

El método de partículas no escapa de la implementación de bloques de referencia. En este caso se implementan básicamente para cumplir dos objetivos.

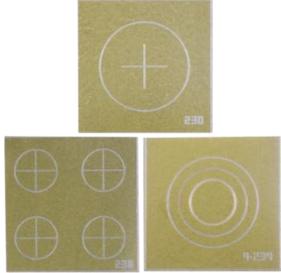
- ✓ Verificar la sensibilidad que posee el sistema de inspección implementado.
- ✓ Establecer una correlación entre la respuesta que ofrezca el sistema y la severidad de una discontinuidad.

Como ya hemos observado a lo largo de este manual, hay múltiples factores que tendrán un impacto directo en el resultado de la inspección y por lo tanto implementar bloques de referencia nos brindaran de una manera concreta conocer cómo se desempeña el sistema para unas condiciones conocidas y así interpolarlas a la pieza evaluada.

Por lo tanto, el objetivo de una referencia es monitorear el sistema de inspección para garantizar que posee la sensibilidad deseada y podrá brindar la detectabilidad correcta para el objeto evaluado.

Algunos de los bloques y estándares implementados para el método de partículas magnéticas los podemos ver en la siguiente tabla.

Nombre	Imagen	Descripción
MTU-3		El disco se utiliza para probar el rendimiento de los materiales de inspección de partículas magnéticas y el entorno de iluminación que se está utilizando. También para comprobar la sensibilidad de inspección.
Pie Gauge		Garantiza que tenemos suficiente fuerza de magnetización en la ubicación de la inspección. Identifica la dirección del campo magnético.

<p>Anillo de Ketos</p>		<p>El anillo de Ketos es un patrón que permite verificar la capacidad de penetración de un sistema de partículas magnéticas en un material específico. En la siguiente figura se aprecia el anillo de Ketos y un croquis.</p>
<p>QQI - Shims</p>		<p>Los shims se pueden utilizar para verificar la sensibilidad, visibilidad, dirección y fuerza del campo.</p>

8. Desmagnetización posterior al ensayo

La desmagnetización posterior a la prueba es importante debido a:

- ✓ La magnetización puede interferir con operaciones de maquinado en donde la viruta puede adherirse a los componentes de maquinado y estropear el proceso.
- ✓ La magnetización interfiere con la plasma ionizada en los procesos de soldadura.
- ✓ Interfiere con componentes dinámicos adhiriéndose a ellos y causando posibles problemas en operación.
- ✓ Piezas pequeñas que se encuentren magnetizadas se unirán entre sí.
- ✓ La eliminación total de las partículas magnéticas puede ser crucial para procesos de fabricación.