



*Ensayos no destructivos
por líquidos penetrantes
y artículos agnéticos*

ALFONSO FERNÁNDEZ HATRE
FRANCISCO MARTÍNEZ GONZÁLEZ
HELI ARGÜESO CAMPO
MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ GONZÁLEZ



Alfonso Fernández Hatre
Francisco Martínez González
Heli Argüeso Campo
Miguel Ángel Martínez González

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR LÍQUIDOS PENETRANTES Y PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

ÍNDICE

PRIMERA PARTE. LÍQUIDOS PENETRANTES

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

Antecedentes	9
Fundamentos del método	10
Secuencia de operaciones	12

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LÍQUIDOS PENETRANTES

Limpieza de la pieza o zona a inspeccionar	15
Aplicación del penetrante	16
Diversos tipos de penetrantes	17
Eliminación del penetrante que ha quedado en la superficie	18
Aplicación del revelador	20
Interpretación y evaluación de resultados	22

CAPÍTULO 3. DEFECTOS DETECTADOS CON EL ENSAYO

Indicaciones falsas	25
Defectos característicos	25
Comparador para ensayo	26

SEGUNDA PARTE. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

CAPÍTULO 4. FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA

Magnetismo	31
Creación de un campo magnético	33
Magnetismo remanente	35
Fundamentos de la técnica de partículas magnéticas	36
Posibilidad de detección de defectos	38
Tipos de defectos detectables	38

@ Centro para la Calidad en Asturias
Edita: Instituto de Fomento Regional
Parque Tecnológico de LLANERA

Tfno: (98) 526 00 68. Fax: (98) 526 44 55

D.L.: AS-3233/1996

ISBN: 84-89594-03-1

Gráficas Rigel. AVILÉS

CAPÍTULO 5. CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	
Dirección de la magnetización	41
Profundidad de la detección	41
Valor de la corriente de magnetización	42
Las partículas magnéticas	42
Desmagnetización	43
Desmagnetización	44
CAPÍTULO 6. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	47
Características generales de los equipos	47
Equipos fijos	47
Equipos móviles	48
Equipos portátiles	50
Equipos portátiles	51
CAPÍTULO 7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	55
Reproducción de las indicaciones	55
Interpretación y evaluación	55
Defectos característicos	56

PARTE PRIMERA

LÍQUIDOS PENETRANTES

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

Antecedentes

La detección de grietas no visibles en materiales metálicos data de la década de los años treinta, al extenderse la práctica llamada de «petróleo y cal» practicada en algunos talleres y que consistía en mojar la superficie de la pieza que se quería inspeccionar con una mezcla de aceite mineral y petróleo. Después de un cierto tiempo para dar lugar a la completa impregnación de la pieza, ésta se secaba y se cubría su superficie con una lechada de cal o con polvos de tiza.

Este material absorbente chupaba los restos de aceite que se habían introducido en las posibles grietas de material y al cabo de poco tiempo surgían unas manchas en la lechada, que reproducían la forma de los defectos superficiales del material.

Desde entonces han ido mejorándose los materiales utilizados para realizar este tipo de inspección mediante la incorporación de productos con un elevado grado de penetración y el uso de reveladores con alto poder de absorción. La mejora de pigmentos para la coloración de los penetrantes y la aplicación de materiales fluorescentes detectables con luz negra, han aportado al método una mayor sensibilidad en la detección de defectos más pequeños.

El desarrollo acelerado de este método de inspección podemos atribuirlo a:

- La enorme extensión de los métodos de unión por soldadura.
- El mayor grado de compromiso de las uniones soldadas.

- La creciente aplicación de aleaciones ligeras.
- La actual preocupación por el estudio de la fatiga de los metales.

Y su extraordinaria popularidad se fundamenta en las ventajas que aporta a los procesos de inspección, centradas fundamentalmente en:

- Sencillez y economía del equipo, el cual puede estar formado únicamente por los consumibles que se van a utilizar.
- La facilidad de interpretación de los defectos.
- Su versatilidad para ser utilizado en cualquier lugar o posición.
- Su posibilidad de aplicación a todos los metales, con independencia de su permeabilidad magnética.

Fundamentos del método

La penetración por capilaridad es una propiedad que tienen algunos fluidos y que modifica los efectos de algunos principios fundamentales de la Física, como pueden ser la ley de la gravedad y los vasos comunicantes.

Ello se debe a la propiedad denominada tensión superficial, la cual origina una cohesión entre las moléculas superficiales de los líquidos que hace como si éstos estuviesen recubiertos con una ligera película de plástico, capaz de resistir una determinada tensión.

La existencia de la tensión superficial se demuestra en la práctica, por la formación de gotas de agua sobre una superficie lisa no absorbente. El agua que compone la gota no se desparra, sino que se contrae por efecto de la tensión superficial que tiende a que la cantidad de agua contenida se concentre en un volumen de superficie mínima como es una esfera. Esto es más claro en el caso del mercurio que tiene una mayor tensión superficial y sus gotas forman bolitas casi perfectas, o en el caso del alcohol, que con una tensión superficial inferior, forma gotas mucho más aplanadas.

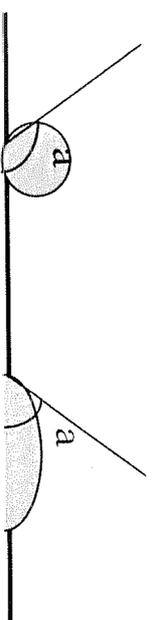


FIGURA 1. ÁNGULOS DE LÍQUIDOS CON DISTINTA TENSIÓN SUPERFICIAL.

	Tensión superficial «S» en dinas/cm
Mercurio	465
Agua	73
Aceite	32
Alcohol	22

Se dice por tanto que hay líquidos que «mojan» más que otros y esto tiene un reflejo más acusado en el interior de tubos de muy pequeño diámetro interior llamados capilares (como un pelo), en los cuales los líquidos cuyo ángulo de mojado «a» es superior a 90° ascenderán menos de lo que les corresponde y los que tienen un ángulo de mojado menor de 90° ascenderán por encima de la superficie del líquido circundante.

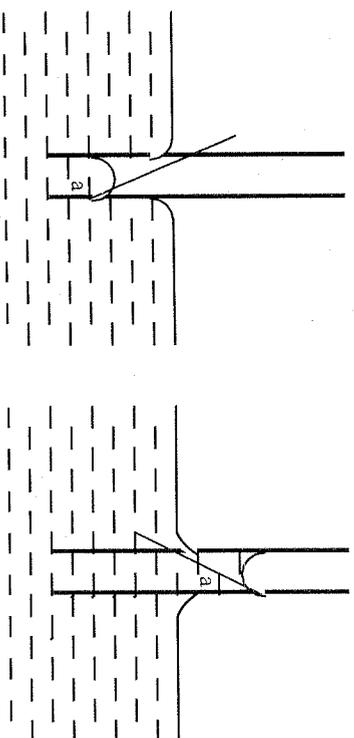


FIGURA 2. DISTINTA PENETRACIÓN DE LOS LÍQUIDOS EN TUBOS CAPILARES

Este fenómeno de capilaridad, cuyos efectos son diferentes a los que se producirían en tubos de mayor diámetro, se reproducen también si en vez de un tubo se colocan dos láminas paralelas muy próximas. Los líquidos que «mojan» penetrarán en el espacio entre las láminas, por encima de su propia superficie, a causa de una fuerza que es proporcional a su tensión superficial y al coseno del ángulo de mojado.

$$F = k \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Las pequeñas grietas superficiales que se pueden encontrar en la superficie de materiales metálicos y otros elementos como plásticos, caucho y elementos cerámicos, actúan también como capilares y favorecen la penetración en las mismas de fluidos que tengan reducida tensión superficial, independientemente de su situación en el espacio.

Esto significa que las microconcavidades del material ejercen una fuerza de atracción sobre los líquidos de reducida tensión, independientemente de su orientación. No es la gravedad la que hace introducirse al líquido sino otra fuerza independiente que no tiene que ver con que la grieta se encuentre horizontal o en posición boca abajo. Este fenómeno es aprovechado en la técnica de líquidos penetrantes cuya descripción genérica es como sigue:

Sobre una superficie limpia se esparce un líquido de color llamativo y muy baja tensión superficial, el cual penetrará en las grietas o poros que eventualmente contenga el material y que se encuentren en contacto con el aire. Posteriormente y mediante lavado, se elimina este líquido de la superficie del material, de forma que quede solamente el que ha penetrado en su interior. Una vez seca la superficie se echa sobre ella un material revelador capaz de absorber al penetrante. Las huellas de éste delatarán los lugares en donde se había producido acumulación y por lo tanto nos darán una indicación de la magnitud y forma de los defectos.

Secuencia de operaciones

De acuerdo con la descripción referida, puede enumerarse la secuencia de operaciones del método de detección de defectos por líquidos penetrantes, no sin antes advertir que la variedad de situaciones en lo que se refiere al tipo de material a investigar y a los productos y técnicas utilizados en el

ensayo, no permiten definir un método uniforme, por lo que en cada empresa, taller o tipo de trabajo se estudiará previamente las condiciones de ensayo más adecuadas y posteriormente se reflejarán en un procedimiento que habrá de respetarse rigurosamente por parte de los operadores, anotando cualquier circunstancia que pueda suponer una mejora en el procedimiento.

Como antes indicamos, la técnica es sencilla, pero con el fin de obtener unos resultados fiables, es preciso definir las condiciones operacionales que han de ser cuidadosamente desarrolladas y los productos más adecuados para el proceso elegido.

La secuencia general de operaciones es la siguiente:

- a) limpieza de la pieza o de la zona a inspeccionar.
- b) aplicación del penetrante.
- c) eliminación del penetrante que ha quedado en la superficie.
- d) aplicación del revelador.
- e) interpretación y evaluación de resultados.

En el siguiente capítulo se expondrán detalladamente los métodos de ejecución para la correcta aplicación de esta secuencia de operaciones.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA DE LÍQUIDOS PENETRANTES

Limpieza de la pieza o de la zona a inspeccionar

La preparación de la superficie del material a inspeccionar debe estar orientada a evitar cualquier obstáculo que pueda tapar o eliminar el acceso a las discontinuidades del material.

Dichos obstáculos pueden estar ocasionados por suciedad, escoria, pintura, óxidos e incluso acumulación de material, virutas o rebarras procedentes de procesos de conformado mecanizado o manual.

Se evitarán, por lo tanto, procesos de limpieza tales como el cepillado, lijado o chorro, que puedan aportar nuevas partículas que cieguen la entrada de las grietas o poros, acudiendo a procesos de limpieza química, como puede ser el decapado con desoxidantes ácidos o alcalinos, el lavado con soluciones detergentes o el desengrasado con vapor o disolventes.

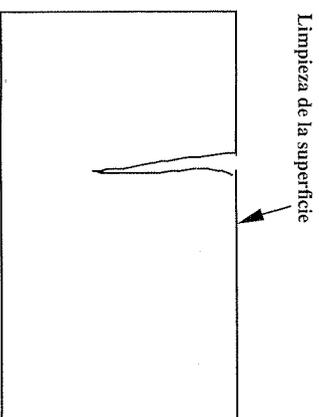


FIGURA 3. LIMPIEZA TOTAL Y CUIDADOSA DE LA SUPERFICIE

Igualmente los restos de pintura que se pretendan eliminar se extraerán con métodos que impidan su incrustación en las oquedades y el taponado de los accesos a las discontinuidades existentes.

Los productos detergentes utilizados se elegirán teniendo en cuenta los posibles ataques químicos que se le puedan ocasionar al material.

Aplicación del penetrante

Conociendo el mecanismo mediante el cual el líquido penetrante va a ser atraído por las cavidades del material se deduce que puede ser aplicado en cualquier forma como pueden ser: rociado, impregnación, sumergiendo en él la pieza o por medio de un spray. Dependerá, sobre todo, de la forma y tamaño de la pieza y de la repetibilidad del ensayo, ya que si se trata de inspecciones en serie de piezas de pequeño tamaño puede ser utilizado el método de inmersión, introduciendo la pieza en un recipiente con penetrante y extrayéndola después de unos segundos, con un adecuado recudido de la misma. El método de inmersión para grandes series puede ser perfectamente automatizado, mediante la instalación de una cadena transportadora que vaya pasando por los sucesivos recipientes en donde se realizan la totalidad de operaciones de la técnica.

Si por el contrario, se trata de aplicar el sistema a las soldaduras realizadas en un taller de construcción de grandes estructuras, lo más conveniente será la utilización de rociado mediante sprays, que es la forma de presentación más habitual en el mercado.

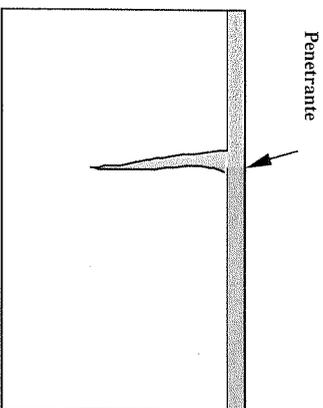


FIGURA 4. APLICACIÓN DEL PENETRANTE A LA SUPERFICIE DEL MATERIAL

Con piezas de tamaños intermedios se puede recurrir a la distribución mediante brocha, con trapos o con cepillos adecuados, pero cuidando que dicho sistema no nos lleve a un desperdicio excesivo del penetrante.

La perfecta impregnación del material y la introducción del penetrante en todos sus posibles huecos requiere un tiempo determinado que depende del tipo de material, de la clase de penetrante y de la forma de las cavidades esperadas. Es difícil establecer una norma fija, pero puede adelantarse que el tiempo de espera será del orden de 10 minutos y en todo caso viene señalado por los fabricantes.

El tiempo de penetración señalado en el procedimiento o en las instrucciones del fabricante debe ser respetado rigurosamente, ya que si no es así nos arriesgamos a que el líquido no penetre lo suficiente en las grietas y se elimine en la fase posterior, mientras que si nos excedemos en el tiempo de penetración el penetrante puede llegar a ressecarse en el interior de la grieta y no ser absorbido por el revelador.

Diversos tipos de penetrantes

Atendiendo a sus características visibles los penetrantes pueden ser:

- Coloreados.
- Fluorescentes.
- Coloreados-fluorescentes.

Los penetrantes coloreados son de color rojo intenso, de forma que ofrecen una visibilidad acusada con una iluminación con luz natural o artificial de intensidad mínima 2.000 lux/m².

Los penetrantes fluorescentes están compuestos por pigmentos que emiten radiaciones del espectro visible, con tonalidad amarillo-verdosa, cuando son iluminados por luz negra de 3.650 Å de longitud de onda, procedente de una lámpara dotada del adecuado filtro.

Este tipo de penetrantes se utilizará cuando se prevea encontrar grietas muy finas ya que no es adecuado para discontinuidades de poca profundidad. Al inconveniente de tener que disponer de una cámara oscura y una lámpara de luz negra, lo que restringe la utilización de los penetrantes

Fluorescentes al interior del taller, se oponen las ventajitas de su mayor sensibilidad para discontinuidades pequeñas y la mejor apreciación de sus indicaciones. Debe evitarse su utilización en superficies anodizadas o cromadas, ya que puede verse afectada su sensibilidad.

Es necesario cuidar el buen estado de funcionamiento de la fuente de luz negra ya que pequeñas desviaciones del voltaje de alimentación, exceso de horas de funcionamiento o acumulación de suciedad en el filtro o en el bulbo, pueden afectar a la fiabilidad de la indicación de defectos.

La intensidad luminosa de la lámpara de luz negra debe tener un valor mínimo de 800 microwatios/cm², medidos a 38 cm de distancia y la luz blanca residual de la cámara de inspección no debe superar los 10 lux/m².

Los penetrantes coloreados-fluorescentes están compuestos por mezcla de ambos pigmentos y se hacen visibles, tanto a la luz negra como a la luz natural.

En atención al sistema de eliminación del sobrante después de su aplicación, los penetrantes pueden clasificarse en los siguientes tipos, que son los más utilizados:

- lavables con agua.
- lavables con disolvente.
- lavables con agente emulsionante.

Las distintas operaciones de eliminación de los penetrantes serán explicadas en el siguiente párrafo.

Además de los penetrantes indicados existen otros especiales como pueden ser los llamados tixotrópicos, utilizables para superficies verticales o invertidas debido a su elevada viscosidad, los penetrantes utilizados para inspección de piezas a elevada temperatura y aquellos que cuentan como disolvente con un producto inocuo que les permita inspeccionar plásticos y cauchos sin que se produzca el ataque del material.

Eliminación del penetrante que ha quedado en la superficie

La operación de lavado de la superficie a inspeccionar con el fin de eliminar el penetrante superficial, sin extraer el que se haya podido introducir

Limpieza del penetrante

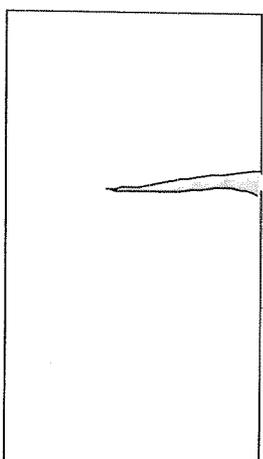


FIGURA 5. LIMPIEZA SUPERFICIAL DEL PENETRANTE SIN AFECTAR AL INTRODUCIDO EN LAS GRIETAS

en las discontinuidades, ha de realizarse con el máximo cuidado, ya que de ello dependerá lógicamente la exactitud de las indicaciones.

Los penetrantes lavables con agua se eliminarán con un rociado de este líquido lo más pulverizado que sea posible, a la presión y temperaturas normales de salida por un grifo. El lavado será completo de toda la superficie impregnada con penetrante y el tiempo de duración de esta operación no superará los tres minutos.

Salvo en el caso de que se vaya a utilizar un revelador en disolución acuosa, la superficie lavada deberá dejarse bien seca, para lo que se utilizarán trapos, papel absorbente o un chorro de aire frío o templado, procurando que la operación no se prolongue excesivamente, en especial en el caso de fluorescentes, a fin de que no se reseque el penetrante en el fondo de las discontinuidades. El lavado con agua es un método especialmente indicado para superficies rugosas.

En los penetrantes lavables con disolvente, se realizará primero una limpieza de los mismos con trapos o papeles secos y al final de la operación se utilizan trapos ligeramente impregnados de un disolvente determinado para cada tipo o marca de penetrante. La aplicación directa del disolvente sobre la superficie o la utilización de trapos muy empapados en el mismo, reduce mucho la sensibilidad del ensayo.

Este es el método de eliminación del penetrante más rápido, eficaz y utilizado, con la ventaja añadida de que al no necesitar agua, no daña las piezas por oxidación y elimina el tiempo de secado.

Los penetrantes lavables con emulsionante no es posible lavarlos con agua, por lo que se les añade en el lavado un agente que los emulsiona previamente. Para ello, una vez terminado el tiempo de penetración, se aplica sobre el penetrante el emulsionante, mediante pulverización o inmersión en un recipiente que lo contenga. Es necesario esperar un cierto tiempo fijo de emulsionado que vendrá señalado por el fabricante y expresado en el procedimiento, con fin de que se produzca la emulsión completa del penetrante de la superficie pero no se emulsione el penetrante que se haya podido internar en el material.

Los penetrantes de este tipo dan una gran sensibilidad a la detección de pequeñas discontinuidades y de escasa profundidad. Reducen el tiempo de penetración, aunque aumentan el de lavado a causa del tiempo necesario para la emulsión.

Los agentes emulsionantes están compuestos por elementos tensactivos con base en aceites (lipofílicos) o acuosa (hidrofílicos). Estos últimos emulsionan directamente, mientras que los primeros lo hacen en el momento en que se añade el agua de lavado, operación que se desarrolla de forma similar a la descrita para los penetrantes lavables con agua. Los emulsionantes con base en aceite son más difíciles de eliminar, mientras que los de agua se utilizan mucho por su facilidad y precio económico.

También se utilizan emulsionantes a base de disolventes, los cuales se aplican sin agua y pueden ser eliminados con trapos o papel absorbente. Aunque eliminan el secado, son más caros y pueden dar problemas de inhalación en lugares cerrados.

Aplicación del revelador

Previamente a la aplicación del revelador se realizará una inspección visual de la superficie a inspeccionar, al objeto de comprobar que ha sido eliminado totalmente el exceso de penetrante. Es obvio que para penetrantes fluorescentes esta inspección se hará bajo una iluminación de luz negra. En caso de que la limpieza no haya sido correcta podrán detectarse manchas de penetrante en la superficie, que pueden estar cubriendo indicaciones de discontinuidades y que harán necesaria una limpieza más a fondo.

La fase de aplicación del revelador tiene por objeto absorber, desde la superficie, el penetrante que ha quedado oculto en las discontinuidades del material, a fin de que su traza, coloreada o fluorescente, nos sirva de indicación del defecto superficial existente.

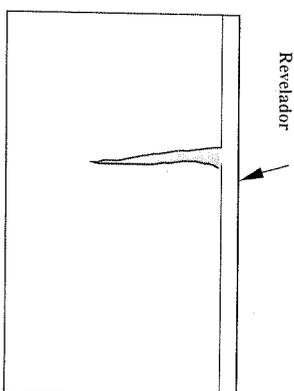


FIGURA 6. LA CAPA DE REVELADOR SE DEPOSITA SOBRE LA SUPERFICIE Y COMIENZA LA ABSORCIÓN

De nuevo funciona en esta fase el fenómeno de la capilaridad, ya que el revelador es un compuesto químico inerte formado por partículas de polvo, las cuales tienen en su interior una red de poros capilares que les permiten absorber el líquido penetrante, con un gran poder de atracción.

Al impregnar el penetrante la capa de revelador completamente blanca, señala de forma clara los puntos o zonas en donde se encuentra el penetrante oculto, quedando dibujada en la superficie la reproducción de la discontinuidad. Para ello, la capa de revelador debe ser lo suficientemente fina y uniforme, ya que si se producen zonas vacías o con exceso, puede quedar afectada la apreciación de defectos.

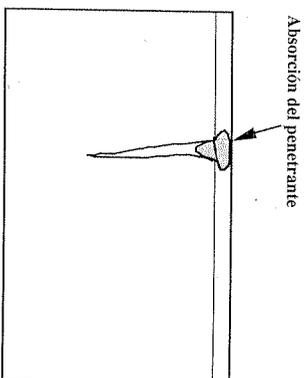


FIGURA 7. EL PENETRANTE SALE A LA SUPERFICIE Y COLOREA LA CAPA DE REVELADOR

Las diversas clases de revelador que existen, se clasifican según la base que los soporta y de esta forma habrá:

- Revelador seco sin más base que el aire.
- Revelador húmedo acuoso.
- Revelador húmedo no acuoso con base de disolvente.

El revelador seco se aplica mediante pulverización, con pera, pistola o similar. No son adecuados para superficies muy lisas ya que puede tener dificultades de fijación, ni para penetrantes coloreados de baja sensibilidad utilizados para discontinuidades anchas y poco profundas, ya que por la anchura de sus poros tiene poco poder de absorción.

Está especialmente indicado para penetrantes fluorescentes y superficies muy rugosas, roscas y aristas agudas, ya que puede depositar sobre ellas una fina capa que no enmascara las anomalías.

El revelador húmedo acuoso es una mezcla de partículas absorbentes, dispersas o suspendidas en agua. Se aplica con brocha, pulverizador o sumergiendo las piezas en un recipiente que lo contenga. Puede utilizarse para todo tipo de penetrantes y forma una delgada capa de polvo, de espesor uniforme, si ha sido bien agitada la suspensión antes de aplicarla.

El revelador húmedo no acuoso tiene como base un disolvente y al aplicarlo sobre la superficie del material, se evapora dejando una capa de polvo uniforme. Suele aplicarse mediante sprays preparados en tamaño comercial y, junto con los penetrantes coloreados en rojo, son de muy amplia utilización en todo tipo de trabajos en taller o en intemperie.

Los reveladores requieren un tiempo para absorber todo el penetrante de las posibles cavidades del material. Para los reveladores secos debe transcurrir un tiempo de 10 a 15 minutos, mientras que para los húmedos el código ASME señala un intervalo entre 7 y 30 minutos.

Interpretación y evaluación de resultados

Una vez transcurrido el tiempo de revelado se procederá a interpretar los resultados y a evaluarlos con respecto a los criterios de aceptación o rechazo que el procedimiento tenga establecidos.

Hay que indicar que la correcta interpretación de toda inspección por líquidos penetrantes está influida en gran medida por el cuidado con el que se haya desarrollado la secuencia de operaciones. Durante la descripción del proceso ha quedado bien clara la complementariedad de los distintos productos y los fundamentos de actuación de unos sobre otros. De ello puede deducirse, que la falta de limpieza inicial de las superficies, las manchas y contaminaciones de unos productos con otros y los falsos contactos con las manos, trapos u otros materiales impregnados con alguno de ellos, puede contribuir a la anulación del ensayo o a distorsionar gravemente los resultados del mismo.

Si el ensayo se ha realizado con cuidado esmero y se han seguido las indicaciones del procedimiento aplicable, los resultados serán fáciles de interpretar y quedarán claramente diferenciadas las indicaciones debidas a defectos en el material y las que corresponden a otro tipo de indicaciones consecuencia de la peculiar geometría o características de construcción de las piezas.

Las condiciones ambientales en las que se debe realizar la interpretación, serán las descritas para el ensayo, en especial en lo que se refiere a la iluminación, tanto si se trata de penetrantes coloreados, como de fluorescentes.

Existen también equipos automatizados para inspecciones en serie, que separan de forma mecánica las piezas en las que se pueden detectar restos de penetrante, lo cual facilita la labor de interpretación, pero no elimina en absoluto la de evaluación.

La evaluación del resultado del análisis consiste en comparar las indicaciones obtenidas, con el criterio de aceptación o rechazo señalado en el procedimiento o la norma que se haya decidido aplicar y puede ser realizado por el propio operador del ensayo o por otra persona de mayor responsabilidad. En ambos casos, la fase de interpretación debe concluir con la redacción de un informe en el que se señalen las características del ensayo y los resultados del mismo, mediante su indicación clara sobre un croquis de la pieza, complementado con una explicación escrita, lo más completa posible, acerca de las particularidades de las discontinuidades detectadas.

En cualquier caso, el informe ha de ser conservado, a fin de mantener un registro histórico del ensayo, a los efectos de la justificación del rechazo.

de la garantía del material aceptado o de la trazabilidad de algún conjunto en cuya construcción intervienga.

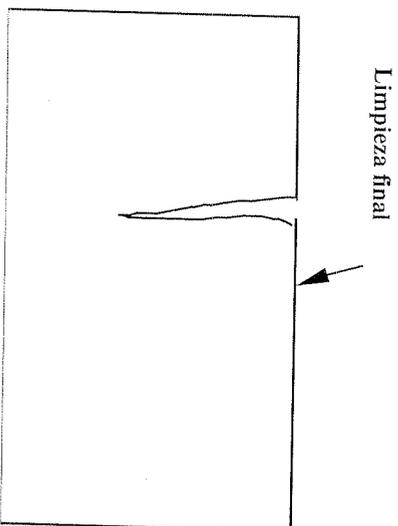


FIGURA 8. ELIMINAR LOS RESTOS DE PRODUCTOS UTILIZADOS EN EL ENSAYO.

Al finalizar el ensayo, la pieza debe quedar en la misma condición que antes de su comienzo, para lo cual se llevará a cabo una limpieza final, con agua a presión o disolvente, de acuerdo con el método desarrollado para la inspección y los productos utilizados en las distintas operaciones.

CAPÍTULO 3

DEFECTOS DETECTADOS CON EL ENSAYO

Indicaciones falsas

Al final del ensayo pueden aparecer falsas indicaciones que pueden llegar a ser confundidas con defectos reales. Esto puede ser debido, tal como se indicó anteriormente, a una incorrecta ejecución de alguna o varias fases, a la utilización de productos contaminados o a la geometría y construcción de la pieza.

En primer lugar, conviene realizar un estudio de la pieza o superficie a examinar, ya que puede ocurrir que exista una junta en la zona a ensayar, la cual, como es lógico, el ensayo detectará como una grieta.

En segundo lugar, se recalca la importancia de inspeccionar las piezas una vez terminado el lavado, a fin de detectar restos visibles de penetrante que habrá que eliminar en una segunda limpieza.

Por último, cuando se descubre de la falsedad de alguna indicación, no debe dudarse en repetir el ensayo desde el principio poniendo el máximo cuidado, ya que si la indicación vuelve a aparecer, con toda seguridad nos encontramos ante un defecto real.

Defectos característicos

Por la forma de la mancha del penetrante sobre el revelador se puede tener una primera aproximación de la índole del defecto, aunque conviene conocer el proceso de fabricación del elemento investigado o su situación

histórica, a fin de poder determinar con mayor conocimiento de causa el carácter de la discontinuidad.

Las líneas continuas suelen ser indicación típica de grietas o fisuras del material

Si el material ha sido utilizado y las líneas aparecen muy finas y quebradas, en la dirección de la tensión, pueden ser grietas de fatiga.

Líneas quebradas en direcciones variadas que progresan al llegar a los bordes, pueden deberse a tensiones durante el tratamiento térmico.

Líneas quebradas, longitudinales o transversales al cordón de soldadura, son debidas a efectos térmicos

Líneas anchas pueden originarse como rechupes superficiales en piezas fundidas.

Las líneas intermitentes son características de grietas o pliegues parcialmente soldados por presión.

Si las líneas son anchas, quebradas e intermitentes, pueden ser debidas a grietas de enfriamiento en forja o fundición.

Si son líneas rectas intermitentes y con fuerte absorción de penetrante pueden ser inclusiones superficiales aplanadas por laminación.

Redes de líneas que no progresan por los bordes, hay posibilidad de que se deban a sobrecalentamientos durante el rectificado de superficies.

Indicaciones redondeadas suelen corresponder a sopladuras en productos fundidos o a cráteres en la parte final de los cordones de soldadura.

Indicaciones punteadas que se agrandan y difuminan al cabo de un cierto tiempo se corresponden con poros internos con salida a la superficie. Los poros son detectados con este ensayo mejor que con otros métodos no destructivos.

Indicaciones difusas pueden ser debidas a microporosidad o microrechupes.

Comparador para ensayo

Sirve para contrastar diferentes técnicas y productos, así como cualificar procedimientos realizados a temperaturas más bajas o más altas de lo normal.

El comparador es una placa con dos cuerpos, fabricada en aluminio ASTM B209 y con las dimensiones señaladas en la figura.

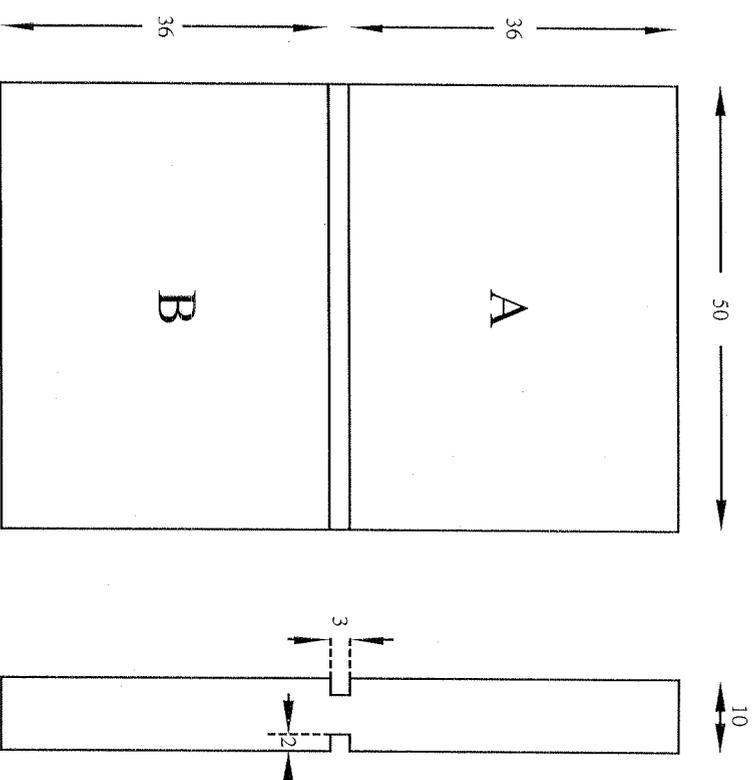


FIGURA 9. COMPROBADOR DE LÍQUIDOS PENETRANTES

Con objeto de producir en el comprobador daños detectables por el ensayo de líquidos penetrantes se calienta la placa ligeramente por encima de 500° C e inmediatamente se sumerge en agua fría, lo que dará lugar a la producción de grietas de temple en ambas caras.

Si queremos cualificar un procedimiento a baja temperatura, se enfría el bloque a -18° C y manteniendo la placa y los productos a emplear a esa temperatura, se aplica el ensayo por líquidos penetrantes según el procedimiento propuesto, a la cara «A». Posteriormente se deja que todo alcance la temperatura ambiente y se realiza el ensayo en la cara «B». Si los resultados de ambas caras son equivalentes, se cualifica el procedimiento.

Igualmente se pueden cualificar procedimientos a alta temperatura calentando a la temperatura designada y realizando un ensayo a esa temperatura en la cara «A» y otro a temperatura ambiente en la cara «B». En este caso no es necesario calentar los productos, ya que se supone que lo único que estará caliente será la pieza.

La comprobación de nuevos productos o procedimientos se puede realizar después de conseguir los resultados fiables de un ensayo estándar en la totalidad de la placa. Se puede incluso fotografiar la totalidad de indicaciones obtenidas en esas condiciones garantizadas. Los nuevos procedimientos a cualificar tendrán como prueba de contraste la fotografía obtenida, ya que si el resultado del nuevo procedimiento es similar al considerado como estándar, podrá darse como cualificado.

PARTE SEGUNDA

PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

CAPÍTULO 4

FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA

Magnetismo

El nombre de magnetismo proviene del hallazgo de trozos de mineral de hierro (magnetita) cerca de la antigua ciudad de Magnesia. Estos imanes naturales tienen la propiedad de atraer el hierro no imantado, y de imantarse a su vez, siendo el efecto más pronunciado en ciertas regiones del imán llamadas polos.

El descubrimiento por los chinos en los primeros siglos de nuestra era de la constante orientación geográfica de barritas de hierro imantadas y su aplicación a la navegación a finales de la Edad media fue la única aplicación científica destacable del magnetismo, si tenemos en cuenta que los efectos curativos del «magnetismo animal», preconizados por Mesmer, fueron declarados inoperantes por los médicos austriacos en 1778.

Hasta 1819 no se demostró la relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos, cuando el físico danés Ørsted observó que una aguja magnética se desviaba al encontrarse en la proximidad de un hilo conductor por el que pasaba una corriente eléctrica.

La posibilidad de que las propiedades magnéticas de la materia fuesen consecuencia de minúsculas corrientes atómicas fue sugerida por Ampère en 1820. Hoy día se supone que la rotación de los electrones de algunos átomos engendra una corriente que da lugar a un campo magnético atómico, el cual produce una serie de masas magnéticas desordenadas, cada una de las cuales está compuesta por dos polos opuestos.

La ordenación u orientación colectiva de todas estas masas magnéticas por medio de la proximidad de una corriente eléctrica o de otro imán, hace

que la sustancia consiga una imanación que da lugar a la formación de dos polos opuestos y de un campo magnético gobernado por ellos. Esto ocurre de forma intensa en los materiales llamados ferromagnéticos, tales como el hierro, el níquel y el cobalto, de forma mucho menor en los paramagnéticos, como el aluminio, litio y molibdeno y nada en los diamagnéticos, como el cobre, el oro y la plata.

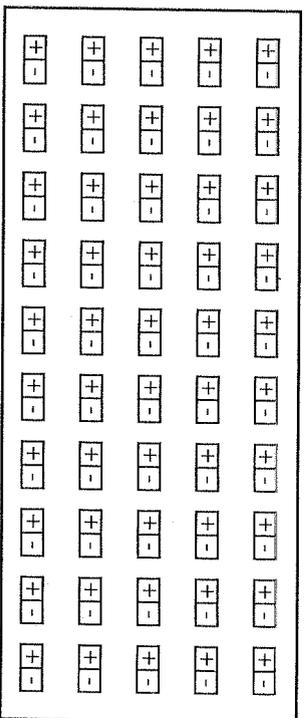
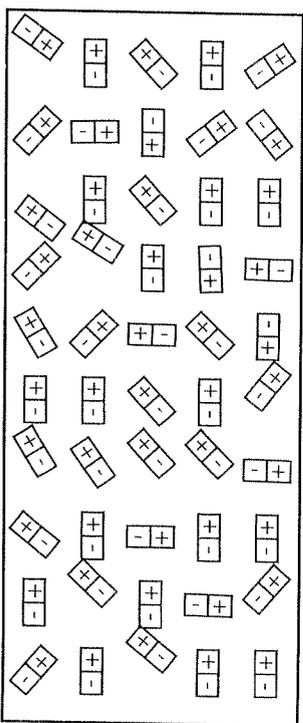


FIGURA 1. ORIENTACIÓN DE LAS MASAS MAGNÉTICAS

Los polos tienen las propiedades siguientes:

- Existe una fuerza que tiende a que uno de ellos se oriente hacia el polo norte magnético (cercano al geográfico) y el otro hacia el sur.
- Existen fuerzas repulsivas entre polos del mismo signo y atractivas entre polos de signo contrario.

- Un imán sometido a un campo magnético de otro imán o al producido por la inducción de una corriente, se orienta en el sentido que señala dicho campo.

Los campos magnéticos están formados por unas líneas imaginarias que unen ambos polos y que señalan la dirección de las fuerzas magnéticas que actúan en el interior del imán y en el espacio próximo. Dichas líneas son llamadas *líneas de inducción* y en caso de campos uniformes son rectas igualmente espaciadas, denominándose *flujo magnético* al número total de líneas de inducción que atraviesa la unidad de superficie.

La intensidad de un campo magnético se mide por la *inducción* o *densidad de flujo* el cual es proporcional a la *permeabilidad magnética* del material, la cual no es constante y cuya inversa es la *reluctancia*, concepto similar al de la resistencia eléctrica. salvo que en este caso, es la resistencia al paso de líneas de fuerza y por lo tanto al establecimiento de un campo magnético en el material.

Creación de un campo magnético

La inducción de los imanes naturales y la engendrada por ellos en otros materiales tienen un valor limitado. Por aplicación del descubrimiento de Oersted sabemos que una corriente eléctrica puede inducir un campo magnético sobre un material apropiado. En efecto, si hacemos pasar por un conductor cualquiera una corriente eléctrica se induce un campo magnético circular que rodea a dicho conductor y este procedimiento va a ser utilizado para alcanzar valores de inducción más importantes y controlables que los que podrían proporcionar los imanes naturales.

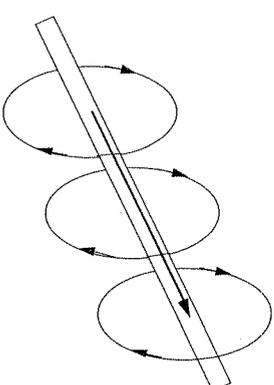


FIGURA 2. CAMPO MAGNÉTICO CIRCULAR INDUCIDO POR UNA CORRIENTE

Sin embargo, el caso más utilizado es el contrario, hacer pasar la corriente por una espira a fin de crear un campo magnético lineal en la pieza rodeada por dicha espira. En la práctica se utilizan varias espiras juntas y continuas formando una espiral, lo que en Física es conocido como un *solenoides*.

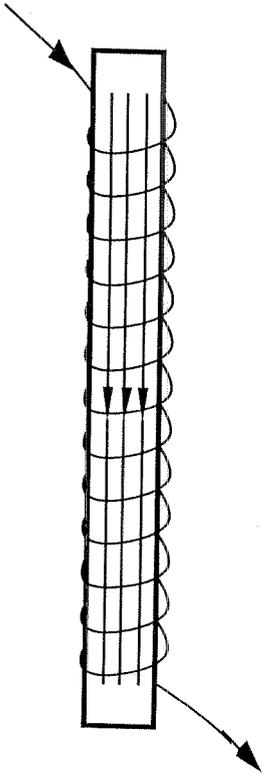


FIGURA 3. CAMPO MAGNÉTICO INDUCIDO POR UN SOLENOIDE

Las espiras del solenoide pueden estar arrolladas alrededor de una pieza de cualquier forma, siendo típico el arrollamiento sobre una pieza en forma de herradura imitando la clásica configuración de un imán o sobre un núcleo circular en el que se juntan los terminales de las espiras formando un toroide.

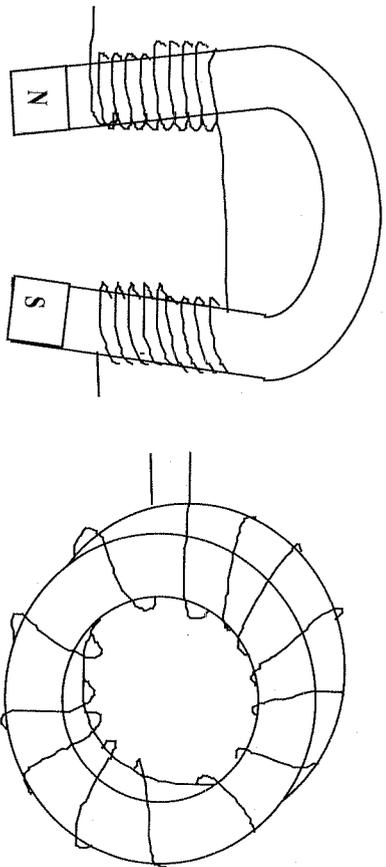


FIGURA 4. DIVERSAS CONFIGURACIONES DE LOS SOLENOIDES

Magnetismo remanente

Si en un material ferromagnético, inicialmente desimantado, se excita desde cero y de forma continua un campo, se crea en el mismo un flujo cuya densidad va aumentando de valor según una curva similar a la descrita en la figura 5:

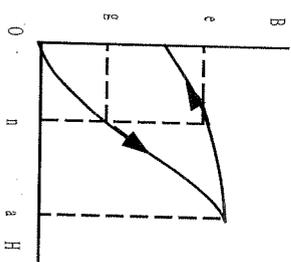


FIGURA 5. GRÁFICA QUE EXPLICA EL FENÓMENO DE HISTÉRESIS

Si a continuación se hace disminuir la excitación magnética, no seguirá el mismo camino, sino que la curva de desimantación sigue una ruta por encima de la de imantación. Para una excitación de valor «n» durante la imantación, se obtendrá una densidad de flujo «g» durante la imantación, mientras que durante la desimantación, para esa misma excitación la pieza permanece imantada con una densidad de flujo «e».

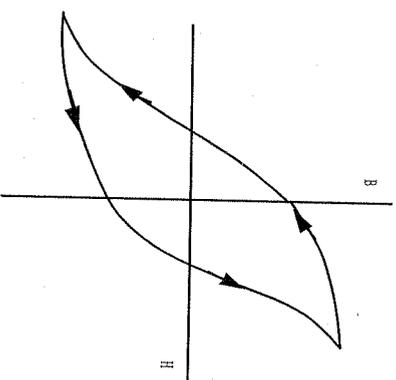


FIGURA 6. CICLO DE HISTÉRESIS

A este fenómeno se le denomina Histéresis, que significa «quedarse atrás» y su ciclo de imantación-desimantación es similar al de la figura 6. Se ve que la densidad de flujo de la muestra no depende únicamente de la excitación magnética, sino también de la historia magnética de la misma. Por decirlo así, el material tiene *memoria* magnética y *recuerda* que había sido imanitado anteriormente, aunque se haya suprimido después el campo magnetizante. Al suprimir totalmente la excitación magnética, se ha convertido en un imán permanente.

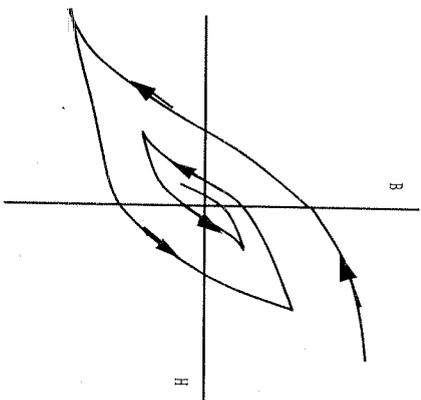


FIGURA 7. CICLOS SUCEсивOS DE HISTÉRESIS DURANTE EL PROCESO DE DESIMANTACIÓN DE UNA SUSTANCIA FERROMAGNÉTICA

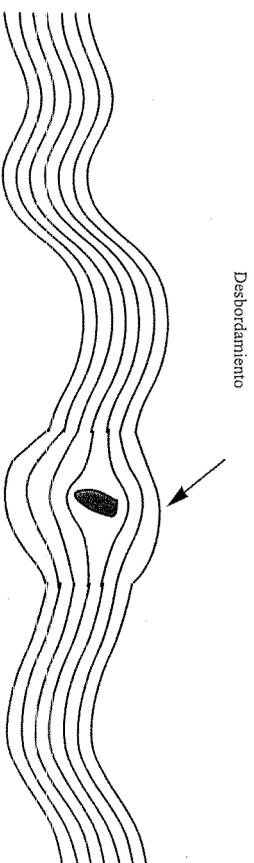
Un material puede ser desimanitado, como indica la figura 7, invirtiendo el campo magnetizante un cierto número de veces y disminuyendo su intensidad en cada inversión.

Fundamentos de la técnica de partículas magnéticas

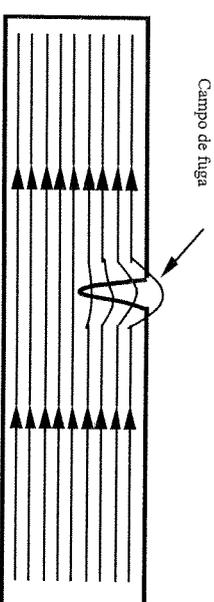
Cuando un material ferromagnético se magnetiza, aplicando a dos partes cualesquiera del mismo los polos de un imán, se convierte en otro imán con sus polos situados, antagonísticamente en los puntos de contacto de los polos del imán original. Sus partículas se orientan y se crean en su interior unas líneas de fuerza que van desde un polo del imán inductor al otro, pasando por una zona inerte que se denomina línea neutra.

Las líneas de fuerza forman un flujo magnético uniforme, si el material es homogéneo. Podemos imaginarnos la corriente de un río que fluye según líneas paralelas si el cauce es homogéneo. Cuando existe alguna alteración en el interior del material, las líneas de fuerza desbordan por los lados al igual que las aguas cuando se encuentran con un obstáculo en el cauce.

Puede observarse en la figura 8 la similitud de situaciones entre el flujo de la corriente de un río y el de líneas de fuerza de una pieza magnetizada. Al encontrarse el flujo magnético con el obstáculo de una grieta en el material, las líneas desbordan por el exterior del material creando un campo magnético por el exterior del mismo. Llamado «campo de fuga».



CORRIENTE DE UN RÍO ANTE UN OBSTÁCULO



FLUJO MAGNÉTICO ANTE UNA GRIETA DEL MATERIAL

FIGURA 8. COMPARACIÓN DE FLUJOS DE UNA CORRIENTE DE AGUA Y UN CAMPO MAGNÉTICO ANTE UN OBSTÁCULO

Posibilidad de detección de defectos

Cualquier porción de material ferromagnético que se encontrase en la superficie del material se vería atraída por dicho campo puntual y si en concreto se tratase de partículas de hierro, éstas se agruparían en la zona agrietada, hasta que el flujo de líneas quedase saturado.

El material aportado por las partículas sustituiría al que falta por efecto de la grieta, pero como las partículas tienen menos densidad que el material compacto, se necesitará algo más de volumen para saturar el flujo y las partículas, aun en el caso de que se introduzcan en la pieza, sobresaldrán por encima de su superficie, formando una señal visible que servirá para detectar el defecto, por muy pequeño que éste sea.

La técnica de detección de defectos por medio de las partículas magnéticas consiste, por lo tanto, en someter la pieza que se va a inspeccionar a una magnetización adecuada y espolvorear sobre la misma finas partículas de material ferromagnético. Estas se dispondrán sobre aquellas zonas en donde exista una variación del material capaz de producir una alteración del flujo magnético uniforme, reproduciendo sobre la superficie de la pieza imantada el trazado de las posibles alteraciones del material.

La mayor sensibilidad del método se obtendrá trabajando en la zona de mayor pendiente de la curva de permeabilidad figura 5, evitando llegar hasta el punto de saturación del material, dado que entonces se reduce la diferencia entre la inducción del material y la del aire.

Tipos de defectos detectables

La alteración del flujo magnético puede ser debida a una grieta superficial del material, pero también pueden alterar dicho flujo fallos internos de material producidos por poros o rechupes e inclusiones de materias que tengan menor permeabilidad magnética que el material inspeccionado.

La experiencia demuestra que, con el método de las partículas magnéticas, las grietas superficiales se determinan de forma nítida, mientras que los defectos internos como porosidad, inclusiones, segregaciones o rechupes internos se detectan de forma menos concreta y dejan de dar indicia-

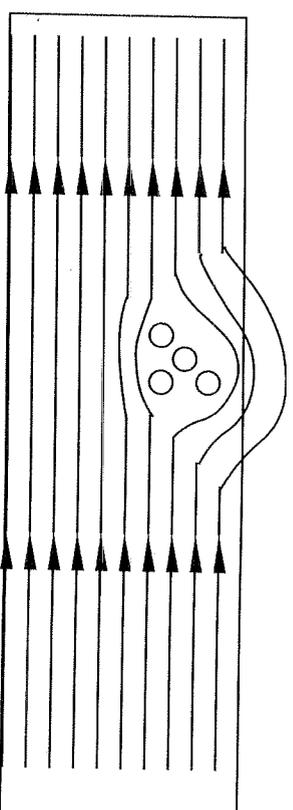


FIGURA 9. ALTERACIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR POROSIDAD CERCA DE LA SUPERFICIE

ciones fiables cuando se encuentran a una distancia de la superficie superior a 6 mm.

Para la interpretación fiable de resultados debe tenerse en cuenta la geometría de la pieza inspeccionada, ya que pueden detectarse acumulaciones de partículas magnéticas a causa de variaciones bruscas de la geometría de las piezas o sobresaturación de flujo magnético en algunos puntos de las mismas.

En efecto, como señala la figura 10, la pieza puede tener una concentración de flujo en la garganta central, lo que da lugar a un campo de fuga periférico que producirá una acumulación de partículas a lo largo del perímetro de la garganta. Para confirmar si se trata de una indicación relevante, deberá disminuirse el amperaje de la corriente que produce el campo magnético y ver si se confirma la acumulación de partículas.

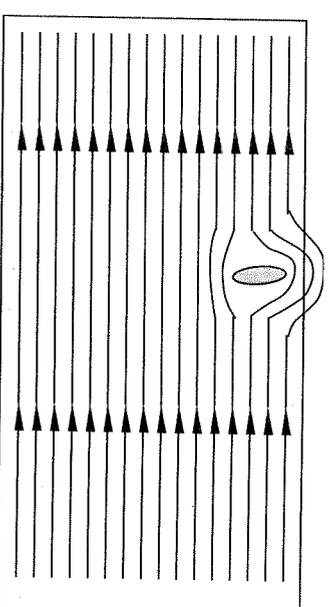


FIGURA 9. ALTERACIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR POROSIDAD CERCA DE LA SUPERFICIE

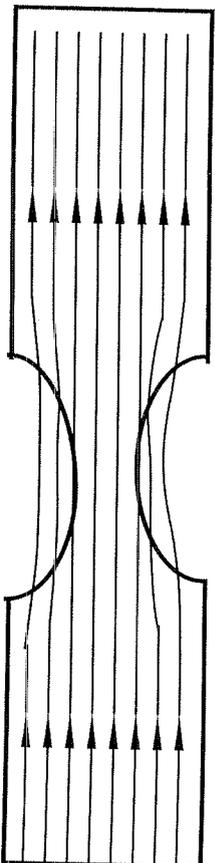


FIGURA 11. SE PRODUCEN CAMPOS DE FUGA EN UN ESTRECHAMIENTO DE LA PIEZA POR SOBREMAGNETIZACIÓN DEL MATERIAL

CAPÍTULO 5

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

Dirección de la magnetización

Las líneas de fuerza de un campo magnético inducido por una corriente eléctrica siguen la orientación de la llamada «ley de la mano derecha». Si asimos con dicha mano una varilla dejando el dedo pulgar en la dirección y sentido de la corriente, los demás dedos señalarán la dirección de las líneas de fuerza.

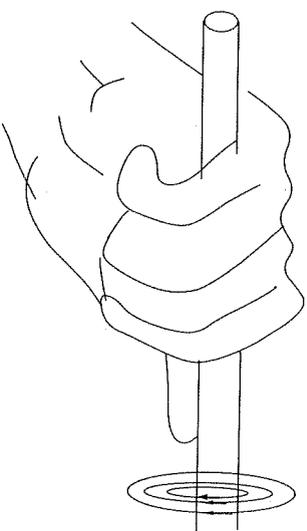


FIGURA 12. REGLA DE LA MANO DERECHA

Esto significa que si aplicamos una corriente directamente a una barra ferromagnética que queramos ensayar, se generarán corrientes circulares transversales que serán muy apropiadas para detectar defectos longitudinales. Ya que el campo de fuga y por lo tanto, el descubrimiento de las heterogeneidades del material se producen cuando dichas anomalías son perpendiculares a las líneas de inducción.

Por el contrario, si la barra tuviese grietas transversales, no se podrían detectar con campos transversales, pero sí con líneas de inducción longitudinales inducidas por las espiras de un solenoide por las que circulase corriente, o por un campo inducido por un imán exterior cuyos polos estuviesen en contacto con los extremos de la barra.

Esto significa que para hacer una buena inspección deben aplicarse sucesivamente dos campos perpendiculares, ya que así, siempre podremos atravesar las heterogeneidades del material con un ángulo superior a 45°.

Profundidad de la detección

El campo magnético generado por una corriente es tanto más profundo cuanto menor es la frecuencia de la corriente, por lo que con corriente continua se puede llegar a detectar discontinuidades hasta una profundidad de 6 mm bajo la superficie, mientras que a 50 hercios que es la frecuencia de la corriente alterna, no se logrará detectar ninguna anomalía por debajo de 0,5 mm de profundidad.

Sin embargo, para la detección de grietas superficiales, la corriente alterna tiene un mejor comportamiento, ya que la alternancia de los campos que produce la variación de la polaridad somete a las partículas magnéticas a una agitación intensa que facilita su desplazamiento y, en consecuencia su atracción por los campos de fuga.

La sensibilidad de las corrientes rectificadas varía con el número de fases, ya que la monofásica conserva alternancias de intensidad, por lo que someterá a las partículas a una agitación beneficiosa, mientras que conserva un sentido único de polaridad lo que le permite tener una buena penetración. La trifásica rectificada se comporta prácticamente como una corriente continua, por lo que tendrá una buena penetración pero menor sensibilidad.

Valor de la corriente de magnetización

La intensidad de la corriente eléctrica ha de ser la adecuada para permitir que todas las heterogeneidades superficiales y subsuperficiales relevantes puedan ser detectadas. Una corriente excesiva produce sobresaturación

magnética, lo que da lugar a indicaciones erróneas, mientras que muy baja intensidad generará campos de fuga demasiados débiles para atrapar a las partículas. La corriente de cada ensayo debe establecerse en el procedimiento correspondiente.

La tensión no tiene apenas efecto en el campo magnético y deberá mantenerse tan baja como sea posible a fin de evitar arcos y sobrecalentamientos puntuales y en evitación de posibles accidentes.

Existen tablas que proporcionan indicaciones sobre los valores más recomendables de la corriente, tanto si se trata de corrientes directas, como de las que generan el campo de magnetización.

Por ejemplo, para una pieza cilíndrica maciza de 25 mm de diámetro y 500 mm de longitud se recomienda una intensidad en electrodos de 700-1.200 A y 2.500 A vuelta para el campo de la bobina, mientras que para 80 mm de diámetro y 200 mm de longitud, la corriente en electrodos será de 2.240-3.840 A y en la bobina 18.000 A vuelta.

La inspección de la soldadura en una chapa de acero realizada con electrodos de contacto que producen líneas de fuerza circulares se realizará procurando que exista un buen contacto entre la chapa y los electrodos, para que no se produzcan arcos que puedan dañar las chapas. El ensayo se hará mediante dos ensayos perpendiculares, aplicando los siguientes valores de intensidad de acuerdo con el espesor de la chapa y la separación entre los electrodos:

Para una separación entre electrodos de 5 a 10 mm, si la chapa tiene menos de 20 mm de espesor se aplicará una corriente de 200-300 amperios y si la chapa tiene más de 20 mm de espesor, de 300-400 amperios.

Para una separación entre electrodos de 15 a 20 mm, si la chapa tiene menos de 20 mm de espesor se aplicará una corriente de 400-600 amperios y si tiene más de 20 mm de espesor, de 600-800 amperios.

Las partículas magnéticas

Son limaduras u óxidos de hierro, de tamaño comprendido entre 0,1 y 0,4 mm, cuyos colores más usuales son el negro, rojo y verde, que son los que ayudan a mejorar el contraste y se elige en función del estado superficial

de la pieza a inspeccionar, acudiéndose a veces al artificio de pintar la pieza con laca blanca y utilizar partículas negras para resaltar el contraste.

También se utilizan partículas fluorescentes, las cuales, utilizando la vía húmeda suelen proporcionar una posibilidad de localización de hasta 100 veces más que las visibles. Para estas partículas se utilizan lámparas de luz negra, que hace más visibles las indicaciones a partir de 5 minutos después de haber sido encendida.

Actuando en vía seca, las partículas se distribuyen uniformemente sobre la superficie a inspeccionar un momento después de que haya comenzado la magnetización, a fin de que se orienten en el aire hacia los campos de fuga, por medio de un atomizador o una pistola de soplado y eliminando el exceso con una suave corriente de aire. Se evitará seguir esparciendo partículas después de haber terminado la magnetización, ya que podrían emborronarse algunas indicaciones.

Suelen mezclarse partículas de varios tamaños en la proporción idónea. Las más pequeñas y alargadas aumentan la sensibilidad y las más gruesas y redondas ayudan a detectar grandes discontinuidades y arrastran a las más pequeñas evitando que se produzcan falsas indicaciones.

Actuando en vía húmeda, las partículas se encuentran en una suspensión en agua, aceite o petróleo, según proporción señalada por el fabricante. Primero se moja la superficie y mientras está escurriendo se conecta la magnetización durante un corto periodo de tiempo, hasta que el líquido deja de escurrir.

La vía húmeda aporta mejores resultados que la seca en superficies lisas situadas horizontalmente, mientras que la seca se utiliza en las demás posiciones y con piezas rugosas, como pueden ser la soldadura y la fundición.

Desmagnetización

El magnetismo residual o remanente que permanece en la pieza, una vez que ha sido sometida a un proceso de magnetización, puede resultar perjudicial, en algunos casos, por las siguientes razones:

— Daños en partes móviles por atracción de virutas metálicas.

— Dificultades para realizar la limpieza del material por atracción de partículas magnéticas.

— Incompatibilidad del magnetismo de la pieza con su utilización posterior.

— Posibilidad de daños por atracción de virutas durante el mecanizado.

— Desviación magnética del arco en piezas sometidas a procesos de soldado.

Dado que la magnetización desaparece cuando se sobrepasa el punto de Curie a los 770°, no será necesario desmagnetizar las piezas que se sometan a tratamiento térmico por encima de esta temperatura.

Para desmagnetar un material se invierte la corriente magnetizante un cierto número de veces y se va disminuyendo su intensidad en cada inversión (véase figura 7). El método más extendido es el de desmagnetización por corriente alterna, mediante el cual se coloca la pieza en el interior de una bobina por la que circula corriente alterna y se va alejando lentamente hasta que a unos 2 metros se puede considerar anulada la influencia del campo y se procede a cortar la corriente.

En la inspección por medio de un yugo portátil, se puede desmagnetizar manteniéndolo conectado y separándolo lentamente de la pieza, a la vez que se va girando.

CAPÍTULO 6

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Características generales de los equipos

Existen diversos tipos de equipos utilizados en la detección de defectos por la técnica de partículas magnéticas. Nos limitaremos a dar una descripción de los más usuales.

En su mayor parte utilizan corriente eléctrica que puede ser alterna o continua para inducir un campo en el elemento magnetizante, aunque a veces se utiliza un simple imán permanente cuando la aplicación de la corriente puede suponer un riesgo de explosión o de incendio o el ensayo debe hacerse en un lugar en donde no sea posible disponer de una toma de corriente.

Las partículas magnéticas se aplican mientras el elemento magnetizante está aplicado sobre la pieza a inspeccionar, concretamente durante el proceso de magnetización, a fin de aprovechar la máxima pendiente de la curva de permeabilidad, aunque también se utiliza la técnica de magnetización residual en la que las partículas se aplican después de haber sido retirado el elemento inductor, pero este método sólo puede aplicarse a materiales de alta retentividad magnética y tiene poca sensibilidad.

En primer lugar los equipos pueden clasificarse en fijos, móviles y portátiles estando los primeros preparados para inspecciones en taller efectuadas sobre un determinado tipo de piezas fabricadas o reparadas, que en general se abarcan en su totalidad, mientras que los equipos móviles y portátiles se adaptan a piezas inspeccionadas de diversa forma y tamaño, ya que el ensayo no se realiza abarcando la pieza, sino aplicando el elemento

magnetizante a zonas o puntos singulares en donde se sospecha que pueda existir un fallo.

Equipos fijos

Son más variados que los móviles, pues suelen adaptarse a las necesidades concretas de un determinado tipo de fabricación o inspección. Pueden adoptar distintas formas y sistemas de funcionamiento convencionales o automatizados, teniendo en cuenta las piezas y materiales que se van a inspeccionar.

Pueden utilizar la vía seca o la vía húmeda, empleando en el primer caso partículas en forma de polvo seco y en el segundo una suspensión de dichas partículas en agua o hidrocarburos convenientemente agitado para que las partículas se encuentren uniformemente distribuidas. Este método tiene la ventaja de que no se desperdician partículas, ya que se reutilizan posteriormente mediante el adecuado circuito de recuperación.

Los equipos fijos suelen utilizar dos tipos de elementos magnetizantes:

- una bobina circular que induce un campo longitudinal en la pieza que pasa a través de ella.
- dos electrodos aplicados en los extremos de la pieza, con el fin de inducir un campo transversal en la misma.

En algunos casos la bobina circular se sustituye por un par de polos magnéticos que se aplican en los extremos de la pieza, a fin de inducir en ella un campo longitudinal. Estos polos están magnetizados por dos bobinas alimentadas por corriente continua, o alterna si la polaridad está invertida en cada una de ellas.

En los equipos de polvo seco, las partículas se aplican mediante una pistola en el momento de la magnetización y un operario se encarga de observar las posibles acumulaciones de partículas, claros indicios de algún fallo del material.

Estos equipos fijos pueden estar preparados con bancadas automatizadas a fin de integrarse a una cadena de producción, para inspeccionar de forma continua piezas fabricadas en serie.

En relación con el tamaño de la bobina circular o la disposición de los elementos magnetizantes, los equipos fijos pueden inspeccionar piezas de diversos tamaños comprendidos entre pocos centímetros y varios metros.

La potencia de magnetización de los equipos, determinada por la intensidad de corriente de la bobina inductora, puede llegar a varios miles de amperios. La corriente, normalmente es alterna, aunque se suministran equipos con corriente rectificadas. En caso que se considere necesario, pueden incorporar un equipo de desmagnetización

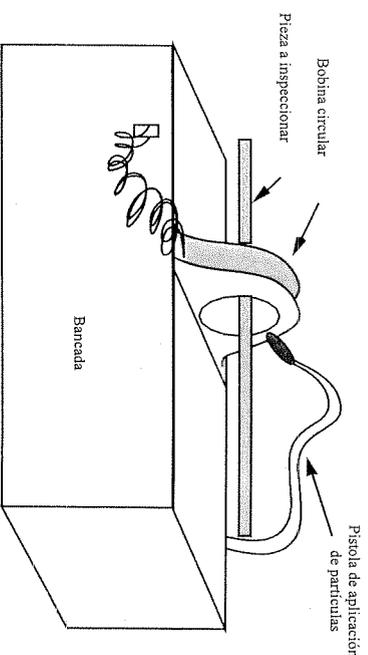


FIGURA 13. ESQUEMA DE EQUIPO FIJO DE INSPECCIÓN

Cuando se trata de investigar piezas cilíndricas huecas, pueden utilizarse aparatos que consiguen una magnetización transversal introduciendo en su interior un eje por el que circula una corriente eléctrica, permitiendo así la detección de discontinuidades paralelas al eje del cilindro.

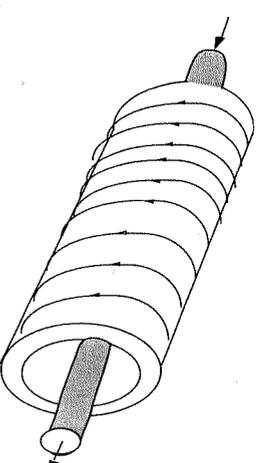


FIGURA 14. MAGNETIZACIÓN TRANSVERSAL INDUCIDA POR CONDUCTOR CENTRAL

Equipos móviles

La ventaja de los equipos móviles no radica solamente en la posibilidad de su transporte a los lugares en donde se encuentren las piezas que sea necesario inspeccionar, sino también en su versatilidad para practicar ensayos en piezas de cualquier dimensión y en puntos situados en cualquier posición y de complicada geometría.

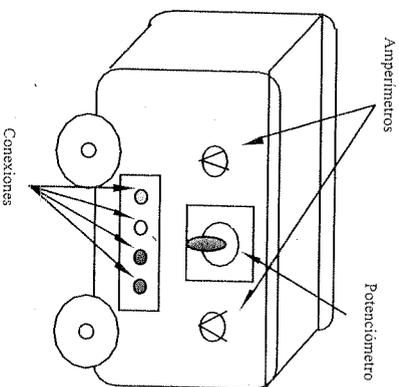


FIGURA 15. ESQUEMA DE EQUIPO MÓVIL

Se desplazan mediante una pequeñas ruedas, aunque para su transporte pueden ser utilizados camiones o carretillas. A su robustez unen una elevada potencia que les permite alcanzar inducciones similares a las de los equipos fijos. Suministran corriente alterna y rectificada de media onda monofásica, con una intensidad que puede llegar hasta 6.000 amperios, alimentándose a 380 V.

La longitud de sus cables suele ser de 10 metros, ya que a mayor longitud se produce una caída de corriente considerable, y al final de los mismos se encuentran los polos que forman el elemento magnetizante, en forma de palpadores. La distancia a la que pueden situarse depende de la corriente de alimentación a las bobinas, la cual se puede regular mediante un potenciómetro.

Hay que advertir que los palpadores no es necesario que se coloquen a una gran distancia, ya que el método aconseja buscar los posibles fallos en puntos singulares de la pieza y no realizar pruebas generales y muy exten-

sas de la misma, que conllevarían un elevado consumo de partículas magnéticas y escasa sensibilidad para la apreciación de defectos.

Con los equipos móviles es posible preparar ensayos en baño por vía húmeda, para lo cual habrá que disponer de un recipiente adecuado y garantizar la conveniente agitación de las partículas en suspensión.

Sustituyendo los palpadores magnéticos por electrodos de corriente se pueden obtener campos transversales para la detección de grietas con otra orientación.

Equipos portátiles

La reducción del tamaño del equipo, con su correspondiente pérdida de potencia, nos lleva a los equipos portátiles de ensayo, para inspección de defectos en diversos puntos de trabajo y utilizables, incluso, sobre equipos o estructuras fijos.

Se trata de equipos ligeros de transformación o rectificación de corriente con cables de 6 a 8 metros, lo que les da una elevada disponibilidad en su campo de actuación. Pueden trabajar con corriente alterna o semirrectificada en intensidades de hasta 1.500 amperios.

Los equipos portátiles se presentan en dos modalidades fundamentales:

- electroimán de tipo yugo.
- electrodos de contacto.

Los equipos de electroimán de tipo yugo están formados por un electroimán articulado cuya parte central es una bobina alimentada por corriente alterna para detección de defectos en piezas de espesor máximo de 0,6 mm y por corriente rectificadas para otros espesores.

El núcleo del electroimán está formado por un conjunto de chapas magnéticas de muy alta permeabilidad y reducida retentividad, y al ser articulado sus brazos pueden abarcar hasta 450 mm.

La potencia del electroimán debe ser la suficiente para levantar una chapa magnética de 4,5 kg, utilizando corriente alterna, y de 18 kg, utilizando

corriente rectificadora, a la separación mayor de los polos a que pueda ser utilizado.

Aplicando los polos del electroimán a los extremos de la zona que se pretende investigar y espolvoreando las partículas magnéticas entre ambos polos, se puede determinar la posibilidad de un fallo del material con una orientación perpendicular a la línea que va de polo a polo, ya que lo que se crea es un campo longitudinal cuyos extremos son los puntos de contacto de las patas del yugo con el material a investigar.

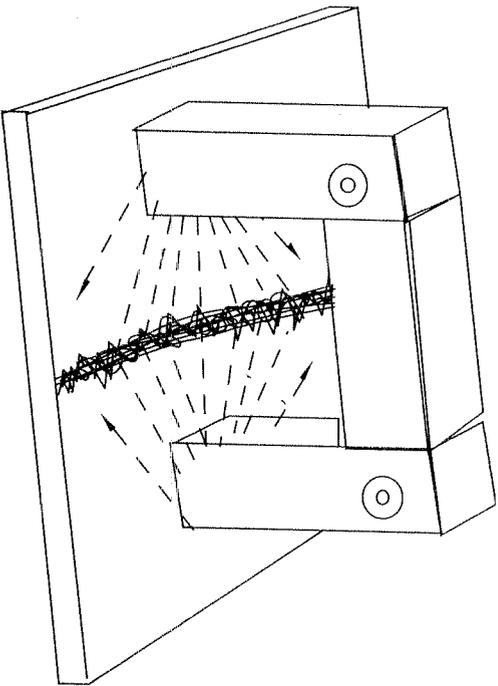


FIGURA 16. MAGNETIZACIÓN DE UNA SOLDADURA POR MEDIO DE UN YUGO DE ELECTROIMÁN

Los equipos de electrodos de contacto están formados por dos electrodos activados por una corriente eléctrica que se ponen en contacto con dos partes muy próximas de la pieza a investigar, produciendo en ella dos campos circulares localizados y distorsionados en el área situada entre los puntos de contacto.

Los electrodos se apoyan en la superficie a inspeccionar y se mantienen firmemente en esta posición durante el paso de la corriente. Los extremos de los electrodos y las áreas a inspeccionar deberán estar suficientemente limpios para permitir el paso de la corriente sin que se produzcan arcos y quemaduras.

Para evitar los arcos se instala un interruptor en una de las empuñaduras del electrodo que permite al operador conectar, después de que los electrodos se hayan posicionado correctamente y desconectar, antes de levantarlos.

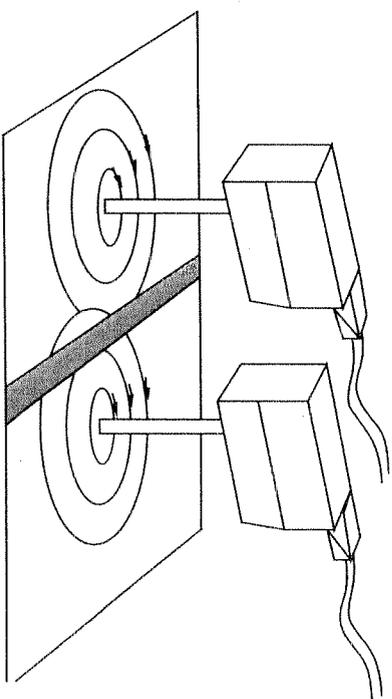


FIGURA 17. ELECTRODOS DE MAGNETIZACIÓN CIRCULAR

Los electrodos se presentan también con una configuración de puente, con el fin de que el operario pueda manejarlos con una sola mano y utilizar la otra para el espolvoreado de las partículas magnéticas.

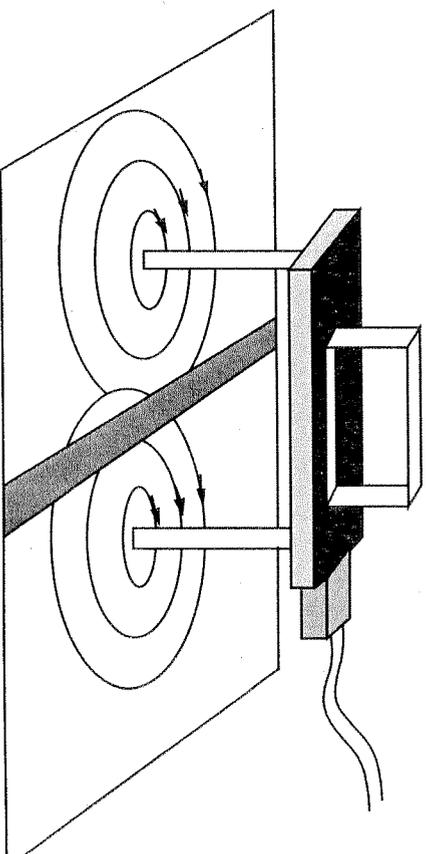


FIGURA 18. MONTAJE DE ELECTRODOS PARA MANEJAR CON UNA SOLA MANO

CAPÍTULO 7

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Reproducción de las indicaciones

Algunos ensayos no destructivos, tales como la radiografía, generan un documento acreditativo de los resultados del ensayo, pero otros no gozan de esa particularidad. Aunque la técnica de las partículas magnéticas no genera un documento gráfico específico, es posible reproducir los resultados mediante la elaboración de impresiones representativas de los mismos.

Una de ellas puede ser por reproducción fotográfica del magnetograma, utilizando filtros especiales y película ortocromática para el caso de partículas fluorescentes y evitando los brillos y reflejos producidos por el aceite o petróleo sobre la superficie de la pieza.

Otra reproducción más sencilla, pero menos indicativa, se obtiene aplicando cinta adhesiva de plástico o un papel secante humedecido con tetracloruro de carbono sobre la acumulación de partículas, indicativa de una discontinuidad del material. De esta forma quedan adheridas a estos soportes las partículas que constituyen la indicación del defecto, pudiendo conservarse en un informe. Tienen el inconveniente de que no queda referencia clara de la situación del defecto sobre la pieza y es preciso indicarlo con la correspondiente anotación.

Por último, puede indicarse que el método más utilizado consiste en realizar un croquis de la pieza expresando con claridad la localización, forma y magnitud de los defectos encontrados, junto con las aclaraciones convenientes del técnico que realiza la inspección.

Interpretación y evaluación

La interpretación consiste en señalar las indicaciones observadas y determinar si son debidas a discontinuidades superficiales o internas del material, separándolas de otras irrelevantes o cuya causa no se encuentre en un defecto del material.

La evaluación tiene por objeto valorar las indicaciones interpretadas como defectos, determinando si son aceptables o no, de acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo, generalmente establecidos en la documentación aplicable e incluidos en el procedimiento y que, a ser posible, estarán contenidos en alguna norma.

La interpretación se llevará a cabo durante la magnetización, tanto si se utiliza la vía seca como la húmeda. En el primer caso conviene examinar el área magnetizada, una vez que se ha eliminado, mediante soplado suave y a ser posible con pistola, el exceso de partículas espolvoreadas.

El área a inspeccionar estará iluminada con un mínimo de 3.800 lux, mientras que la interpretación de partículas fluorescentes se efectuará con una lámpara de luz negra de una intensidad de 800 microwatts/cm², medidos sobre un círculo imaginario de 75 mm de diámetro, situado a 38 cm de distancia frontal del filtro.

Los defectos superficiales o muy próximos a la superficie presentan un magnetograma en forma de pequeñas cordilleras de contornos bien definidos. Son los más peligrosos, ya que por ellos se está iniciando la rotura de la pieza. En los defectos de mayor profundidad, la cordillera pierde altura y los bordes se van difuminando.

Indicaciones falsas debidas a la sobremagnetización se presentan en juntas de materiales de distinta permeabilidad, soldaduras y cambios bruscos de geometría.

Defectos característicos

Para saber interpretar correctamente los resultados de una inspección por partículas magnéticas, es conveniente conocer los defectos que pueden presentarse y la caracterización de los mismos.

Las grietas producidas por la fatiga del material suelen producirse en zonas con cambios bruscos de sección, con agujeros u orificios o sometidas a esfuerzos diferenciales. Son superficiales, muy estrechas y de profundidad variable y se orientan perpendicularmente al eje de la pieza, por lo que su detección se produce con magnetización longitudinal.

Los defectos de soldadura pueden ser debidos a falta de penetración en la raíz del cordón, pudiendo detectarse como una indicación subsuperficial paralela al eje del cordón o grietas de contracción por tensiones debidas al calentamiento y enfriamiento longitudinales y perpendiculares al cordón y ubicadas en el mismo o en la zona próxima.

Los poros y rechupes dan indicaciones subsuperficiales concentradas y de forma irregular o extendidas, cuando el material ha sido sometido a un proceso de laminación o de forja.

Las inclusiones de materiales no metálicos tales como escorias u óxidos aparecen de forma subsuperficial, aisladas o en grupos. Las segregaciones pueden presentarse en forma de líneas o vetas.

Los defectos de laminación más frecuentes suelen ser grietas y pliegues, a veces profundos y muy estrechos y se detectan por presentar indicaciones de tipo capilar.