

# Supervisión de **salud** **ESTRUCTURAL:** nuevos métodos magnéticos

J. Jesús **Villegas Saucillo**  
José Javier **Díaz Carmona**  
Agustín Leobardo **Herrera May**

Actualmente, las ciudades requieren de infraestructura compleja como puentes, túneles, edificios, sistemas de generación de energía, parques industriales y sistemas de transporte. El desempeño de esta infraestructura debe ser supervisado, registrando información de los parámetros más representativos para controlar su seguridad y funcionamiento. La infraestructura envejece o sufre los efectos de fenómenos como los sismos, que pueden ocasionarle daños estructurales, reduciendo su operación y seguridad. Estos daños pueden eventualmente afectar la integridad de seres humanos e incrementar los costos de mantenimiento de las estructuras civiles. Los beneficios de los sistemas de monitoreo son principalmente la optimización del funcionamiento, la reducción del mantenimiento



**Figura 1.** Detección de zonas de concentración de esfuerzos y grietas en una tubería de vapor usando el método de memoria magnética.<sup>1</sup>



**Figura 2.** Inspección de defectos en una soldadura de tubería ferromagnética usando métodos magnéticos.<sup>2</sup>

y la reparación de las estructuras civiles, lo cual permite disminuir el riesgo de posibles fallas críticas. Así, para incrementar la seguridad y tiempo de operación de la infraestructura se deben realizar estudios de su salud estructural empleando diferentes tipos de sensores en combinación con sus sistemas de procesamiento y transmisión de señales.

Con los estudios de salud estructural se puede conocer el grado de funcionalidad de una estructura, considerando su envejecimiento y acumulación de daños. Esta supervisión implica la selección de estrategias de localización de defectos, la instalación y mantenimiento del sistema de sensores; así como, el procesamiento y transmisión de las señales.

#### ETAPAS DE LA SUPERVISIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL

La supervisión estructural está integrada por dos etapas: 1) adquisición y procesamiento de datos; 2) análisis de resultados. La adquisición de datos consiste en el registro de parámetros de las estructuras en un intervalo de tiempo, usando sensores. Los datos se procesan mediante técnicas digitales en el dominio del tiempo, la frecuencia o una combinación de ambos. Posteriormente, se hace un análisis de resultados con

estudios estadísticos. Estos análisis permitirán determinar el grado de envejecimiento o magnitud de los daños (desgaste, degradación, grietas, fatiga y corrosión) de las estructuras.

Para valorar el estado y el desempeño de las estructuras, los sensores realizan diferentes tipos de mediciones como deformaciones, desplazamientos, deflexiones, vibraciones, temperatura, esfuerzos, grietas, corrosión y fatiga. Varias de estas mediciones son realizadas con pruebas no destructivas debido a su característica no invasiva.

Entre los métodos para pruebas no destructivas de estructuras ferromagnéticas se tiene el método de memoria magnética de metales. Este método puede detectar grietas, discontinuidades geométricas o esfuerzos residuales en estructuras ferromagnéticas a través de la variación del campo magnético natural de la estructura. El campo magnético natural de un material ferromagnético sufre alteraciones debido a altas densidades de dislocaciones de sus redes cristalinas. Durante los procesos de manufactura de las estructuras ferromagnéticas se pueden generar esfuerzos residuales o grietas pequeñas, los cuales modifican el campo magnético de la superficie de las estructuras. Cuando una estructura ferromagnética está sujeta a cargas estáticas o dinámicas, se puede incrementar el tamaño de una grieta hasta que provoque una falla crítica en el material. Esta propagación de la grieta está relacionada con una variación del campo magnético natural de la estructura.



**Figura 3.** Detección de zonas de concentración de esfuerzos y grietas en riel de ferrocarril usando el método de memoria magnética.<sup>1</sup>



**Figura 4.** Monitoreo de zonas de concentración de esfuerzos en una tubería usada para la perforación de un pozo petrolero.<sup>3</sup>

El método de memoria magnética tiene importantes ventajas con respecto a otros métodos. Por ejemplo, no requiere generar un campo magnético externo mediante bobinas, ya que utiliza el campo magnético natural de la estructura ferromagnética. Esto permite reducir el consumo de energía y el número de elementos del sistema de supervisión. Además, puede detectar daños en los materiales ferromagnéticos causados por procesos de manufactura como zonas con alta concentración de esfuerzos residuales y grietas. Otra ventaja es que no requiere de contacto directo y tratamiento especial en la superficie de la estructura. Permite la realización de pruebas en menor tiempo usando un sensor de campo magnético, reduciendo el tamaño del sistema de muestreo y su costo de operación. Además, tiene la capacidad de detectar defectos externos e internos del material ferromagnético. Sin embargo, el método de memoria magnética solo es aplicable a materiales ferromagnéticos y se requiere de más investigaciones para predecir con mayor exactitud la magnitud de los defectos de la estructura. Esto representa un importante reto científico y una oportunidad para nuevas investigaciones.

#### APLICACIONES

El principal uso del método de memoria magnética es la detección oportuna de zonas de concentración de esfuerzos, grietas superficiales y defectos de soldadura. Estos daños en las estructuras ferromagnéticas

afectan su funcionamiento e incrementan el riesgo de accidentes. El método de memoria magnética tiene aplicaciones específicas en la supervisión estructural en la industria mexicana. Este método puede emplearse para detectar a tiempo grietas y esfuerzos residuales en la infraestructura de la industria de hidrocarburos y gas, por ejemplo en la infraestructura de Petróleos Mexicanos, la Comisión Federal de Electricidad, el sistema de comunicaciones y transportes, la industria metal-mecánica y Ferrocarriles Mexicanos. Algunas aplicaciones del método de memoria magnética son:

I) Supervisión de grietas, zonas de concentración de esfuerzos y defectos en soldadura en tuberías de vapor y álabes de turbinas. Este análisis se puede realizar en tiempo real empleando tres sensores de campo magnético, los cuales detectan las variaciones de los componentes del campo magnético en tres direcciones ortogonales x, y, z, que están relacionados con la magnitud de los esfuerzos residuales, el tamaño de las grietas y daños en la soldadura<sup>1,2</sup> (Figuras 1 y 2).

II) Otra aplicación del método es la detección de fisuras y esfuerzos residuales en las estructuras de soporte (torres) de las líneas de transmisión de energía eléctrica de alta tensión y en las vías de ferrocarriles.<sup>1</sup> La detección de estos defectos se realiza igualmente a través de un sistema basado en un arreglo de sensores de campo magnético (Figura 3).

III) El método permite un diagnóstico temprano de daños en tuberías de acero de pozos petroleros causados por factores de erosión y la geología del terreno.<sup>3</sup>



**Figura 5.** Puente colgante de la Isla Russky que la conecta a la ciudad de Vladivostok, Rusia. Este puente está formado por materiales ferromagnéticos cuya salud estructural podría ser monitoreada usando el método de memoria magnética.

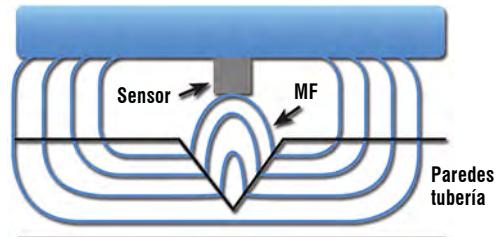
Un procesamiento digital es introducido al software de análisis con el fin de mejorar la razón señal-ruido, así como eliminar el ruido de alta frecuencia. Además, el procesamiento de filtrado permite la obtención de las características principales de las señales del método de memoria magnética, las cuales están relacionadas con el nivel de daño estructural. Por lo tanto, la magnitud de la concentración de esfuerzos en la tubería del pozo petrolero se puede predecir de una manera oportuna y confiable (Figura 4).

IV) Otra aplicación del método es la localización de defectos en los engranes de la maquinaria de la industria minera. En estos, defectos como grietas pueden propagarse en la superficie de los engranes por fatiga mecánica hasta provocar la ruptura del material.

V) La estructura de barcos puede afectarse por vibraciones, impactos, fatiga mecánica y corrosión durante su navegación. Estos factores pueden incrementar la formación de esfuerzos elevados y la propagación de grietas en la estructura de las embarcaciones. Con mucha frecuencia estos problemas se originan en las regiones de soldadura de las estructuras de los barcos. Para estos casos, el método de memoria magnética permite el análisis y localización de regiones con concentración de esfuerzos de gran magnitud. Para el monitoreo y localización de defectos en las estructuras de las embarcaciones se puede utilizar un sensor magnético con una interfaz que transmite los datos a una computadora.

El método de memoria magnética puede detectar alteraciones del campo magnético natural de estructuras ferromagnéticas causadas por zonas de concentración de esfuerzos residuales o discontinuidades geométricas como fisuras y cambios de espesor. Estos esfuerzos se concentran alrededor de defectos o heterogeneidades en los materiales ferromagnéticos producidos durante sus procesos de fabricación o como consecuencia de la aplicación de cargas mecánicas.

Los materiales ferromagnéticos poseen un campo magnético natural, el cual se modifica en las regiones de concentración de esfuerzos, fisuras y heterogeneidades como inclusiones no ferromagnéticas. Esta alteración del campo magnético se manifiesta mediante el cambio de dirección de las líneas del campo y la modificación de su magnitud. La variación del campo magnético puede ser detectada mediante un sensor de campo específico (Figura 6).



**Figura 6.** Dispersión de líneas de flujo magnético debido a un defecto geométrico en la superficie exterior de una tubería ferromagnética. Un sensor de campo magnético detecta la variación de campo relacionada con el defecto.

VI) En la industria petroquímica se trabaja con estructuras que operan en ambientes corrosivos o de alta presión como calderas, tuberías, álabes de turbinas y regiones de uniones de soldadura. Estas estructuras están sujetas a riesgos elevados por concentraciones de esfuerzos y propagación de grietas. El método de memoria magnética puede detectar las posiciones específicas de estos defectos, con el objetivo de monitorearlos y controlarlos.

VII) Este método también podría emplearse en la vigilancia periódica del estado de salud estructural de los

cables tensados y componentes de anclaje de los puentes colgantes (Figura 5). Estos cables metálicos son sometidos a ambientes agresivos, fatiga y desgaste por corrosión que disminuye la fiabilidad en el funcionamiento del sistema.

## DESAFÍOS

El desarrollo de la tecnología de supervisión estructural, en conjunto con el método de memoria magnética, necesita un mayor estudio para prevenir con exactitud el tamaño y tipo de los defectos de la estructura. Esto representa un importante reto científico y una oportunidad para nuevas investigaciones. Uno de los desafíos es proporcionar los servicios necesarios para la transmisión remota de la información, además de la modelación numérica de la variación del campo magnético generado por el daño estructural, la evaluación de los datos experimentales y el desarrollo de software para el cálculo con alta exactitud de la severidad del daño estructural. Otro desafío es la implementación de mecanismos o robots con sensores magnéticos con capacidad de trabajar en entornos peligrosos y geometrías complejas donde el ser humano no tiene acceso.

## CONCLUSIONES

Un sistema de supervisión de salud estructural puede proporcionar información en tiempo real sobre la integridad, seguridad y funcionamiento de estructuras basadas en materiales ferromagnéticos. Este método permite la reducción de los costos de reparación gracias a la detección oportuna de daños como grietas, defectos en soldaduras o zonas de esfuerzos elevados.

Para las estrategias de detección de daños estructurales en sistemas de generación de energía (petróleo, gas y energía eléctrica), industria metal-mecánica, estructuras de puentes y sistemas de transporte (trenes, aviones y barcos), el estudio de salud estructural proporciona una solución correctiva antes de que el daño se incremente severamente. El método de memoria magnética es una prueba no destructiva que puede detectar daños sin alterar el estado físico o la constitución química de los materiales. Este método permite el diagnóstico de defectos internos y externos

de las estructuras ferromagnéticas en tiempo real y de manera oportuna.

## R E F E R E N C I A S

<sup>1</sup> KIWATECHNOLOGY. URL: [http://www.kiwatechnology.com/uploadedFiles/Nieuws/Archief\\_2013/7.%20TUV-RHEINLAND\\_MMMM\\_Presentation%20kiwa%20innovatie%20dag.pdf](http://www.kiwatechnology.com/uploadedFiles/Nieuws/Archief_2013/7.%20TUV-RHEINLAND_MMMM_Presentation%20kiwa%20innovatie%20dag.pdf) (acceso 25 abril 2016).

<sup>2</sup> Dubov A, Dubov A, Kolokolnikov S. Application of the metal magnetic memory method for detection of defects at the initial stage of their development for prevention of failures of power engineering welded steel structures and steam turbine parts. *Weld World* 2014 58:225-236.

<sup>3</sup> Zhilin L, Lutao L, Zhang J. Signal feature extraction and quantitative evaluation of metal magnetic memory testing for oil well casing based on data preprocessing technique. *Abstract and Applied Analysis* 2014; 902304.

**J. Jesús Villegas Saucillo**

**José Javier Díaz Carmona**

**Instituto Tecnológico de Celaya**

[jesus.villegas@itcelaya.edu.mx](mailto:jesus.villegas@itcelaya.edu.mx)

**Agustín Leobardo Herrera May**

**Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología**

**Universidad Veracruzana**

© Gabriela Torres Ruiz. De la serie *Silencio*, Dolomitas-Alpes-Italia, 2013.

