

INSPECCIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE ACFM

Facundo Lohrengel/Luis A. Ohara, Petromark SRL
facundo.lohrengel@petromark.com.ar / Luis.ohara@petromark.com.ar

1.0 Sinopsis

En el contexto actual de constante evolución tecnológica, la integración de diversas herramientas de inspección permite obtener información cada vez más precisa sobre el estado de los activos industriales. En particular, el uso de la técnica ACFM (Alternating Current Field Measurement) en la inspección de soldaduras representa una alternativa eficaz para la detección y evaluación de fisuras superficiales, sin necesidad de remover recubrimientos protectores.

La técnica ACFM es un método de inspección electromagnética que ofrece un alto nivel de confiabilidad en la detección de grietas por fatiga y otras discontinuidades superficiales en soldaduras y componentes metálicos. Su principal ventaja radica en la posibilidad de realizar inspecciones a través de recubrimientos no conductivos en buen estado, lo que permite reducir tiempos de intervención, minimizar paradas operativas y optimizar costos asociados a la preparación superficial. Esta característica resulta especialmente beneficiosa en aplicaciones donde los recubrimientos cumplen un rol crítico o su reposición implica elevados costos.

El sistema ACFM registra digitalmente todos los escaneos realizados, generando una base de datos completa para cada inspección. Esta información puede ser analizada posteriormente, facilitando la trazabilidad de los ensayos y la comparación evolutiva de indicaciones detectadas. Asimismo, el dimensionamiento de defectos en tiempo real permite realizar una evaluación inmediata de su posible criticidad, contribuyendo a una toma de decisiones más ágil y fundamentada en campo.

Entre las características destacadas de la técnica se encuentran su baja sensibilidad a condiciones climáticas adversas y su adaptabilidad a diferentes entornos de operación, incluyendo inspecciones atmosféricas y submarinas. La ejecución del ensayo requiere un trabajo coordinado entre operador y asistente, lo que facilita la intervención en zonas de difícil acceso y amplía su aplicabilidad en distintos escenarios industriales.

2.0 Introducción

La seguridad y confiabilidad de las estructuras metálicas en sectores como energía, petroquímica, transporte y offshore dependen en gran medida de la aplicación de métodos de inspección precisos y confiables. La detección temprana de discontinuidades superficiales en soldaduras resulta fundamental para prevenir fallas estructurales y garantizar la continuidad operativa. Los métodos tradicionales, como líquidos penetrantes y partículas magnéticas, si bien son ampliamente utilizados, presentan limitaciones en ambientes hostiles, en presencia de recubrimientos protectores o cuando se requiere trazabilidad digital de los resultados.

En este contexto, la técnica ACFM se posiciona como una alternativa que combina rapidez de ejecución, capacidad de dimensionamiento y registro digital de datos. Su aplicación permite inspeccionar a través de recubrimientos no conductivos en buen estado, reduciendo tiempos de preparación superficial y minimizando intervenciones sobre el activo.

Un sistema moderno de ACFM está compuesto por una sonda de inducción de campo, equipada con electrónica analógica de bajo ruido, acoplada a una unidad de control y a un software de adquisición y análisis basado en entorno Microsoft Windows, de operación intuitiva. Los sensores trabajan típicamente en un rango de frecuencia comprendido entre 5 y 50 kHz, permitiendo una adecuada sensibilidad para la detección y evaluación de grietas superficiales.

3.0 Desarrollo

3.1 Concepto básico de la física de ACFM

La sonda ACFM está constituida por una bobina de inducción (verde) y al menos dos bobinas de detección (sensores) más pequeñas, con sus ejes orientados en sentido paralelo (X) y perpendicular (Z) respectivamente, a la superficie de la pieza bajo inspección (Figura 1).

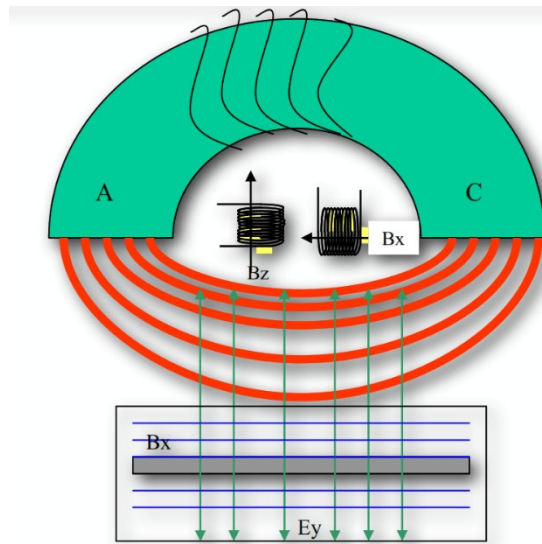


Figura 1: Esquema de sonda de ACFM

La geometría y orientación de la bobina de inducción permite la generación de un campo uniforme. La bobina de inducción genera un campo magnético que a su vez crea el flujo de líneas de corriente (campo eléctrico uniforme Y) sobre la superficie de la pieza. El campo eléctrico tiene asociado un campo magnético transversal (X; a 90°) a las líneas de flujo eléctricas (Figura 2).

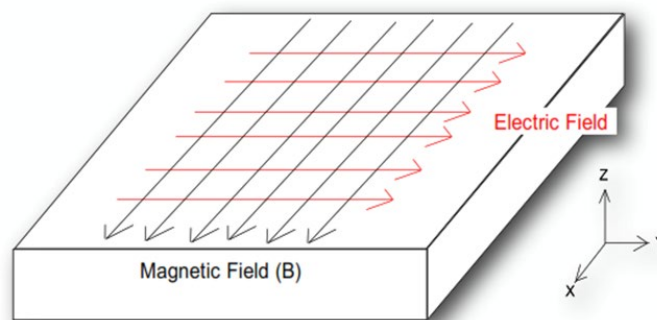


Figura 2: Orientación de campo eléctrico y campo magnético

Los sensores de detección son pequeñas bobinas que registran las perturbaciones del campo magnético asociado con la corriente superficial en la pieza. La orientación de los sensores permite registrar las perturbaciones al campo magnético superficial sobre la pieza (campo X) y en sentido perpendicular a la misma (campo Z).

3.2 Perturbación del campo Eléctrico (Eje Y)

El campo eléctrico uniforme (Y) generado por la bobina de inducción de la sonda tiene un comportamiento característico en presencia de una grieta.

Las líneas de flujo se desvían hacia los extremos acumulándose y se reduce la densidad de las líneas del campo al centro del defecto (Figura 3).

La técnica ACFM se soporta en dos criterios básicos: se asume que se tiene un campo uniforme en el material y que la grieta tiene un perfil semi-elíptico.

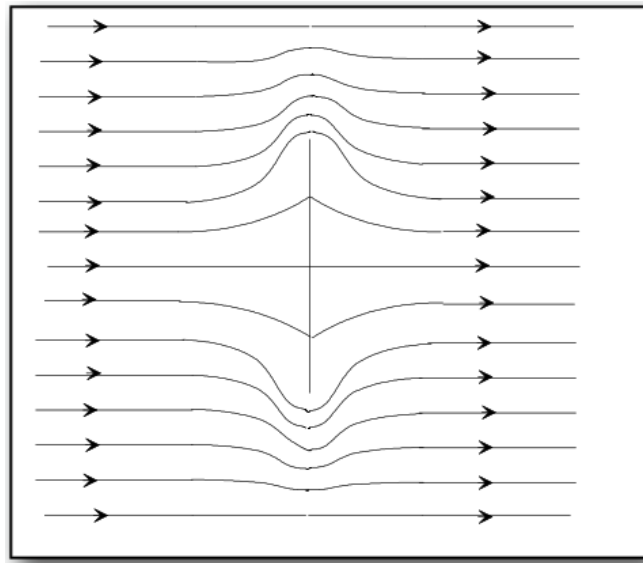


Figura 3: Comportamiento de las líneas de flujo ante la presencia de una grieta

3.3 Perturbación del Campo Magnético (Eje X)

Como el campo magnético (X) está asociada al campo eléctrico, se ve afectado en la misma proporción, aumentando la densidad de flujo magnético (B) en los extremos y disminuyendo al centro del defecto (Figura 4).

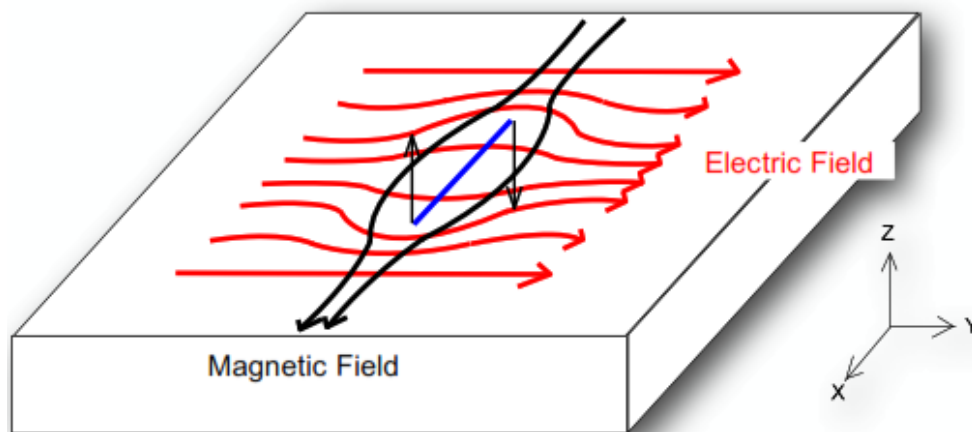


Figura 4: Comportamiento de la densidad de flujo magnético B en los campos X y Z

La medición en las variaciones de la densidad de flujo magnético (B) en los campos X y Z por medio de las bobinas de detección de la sonda (sensores) y su presentación cartesiana en base tiempo en la pantalla de una computadora permite mediante su análisis identificar la presencia de un defecto y su dimensionamiento posterior.

3.4 Presentación de las lecturas de los Campos Magnéticos

La medición de los valores de los campos magnéticos en X y Z se efectúan a través de los sensores de bobina de la sonda.

Esta información se digitaliza y el programa la presenta en la pantalla del monitor como dos gráficas cartesianas (Figura 5).

La combinación de estas dos gráficas en una tercera pantalla genera una nueva gráfica denominada “mariposa” debido a que el trazo característico de un defecto recuerda las alas de una mariposa.

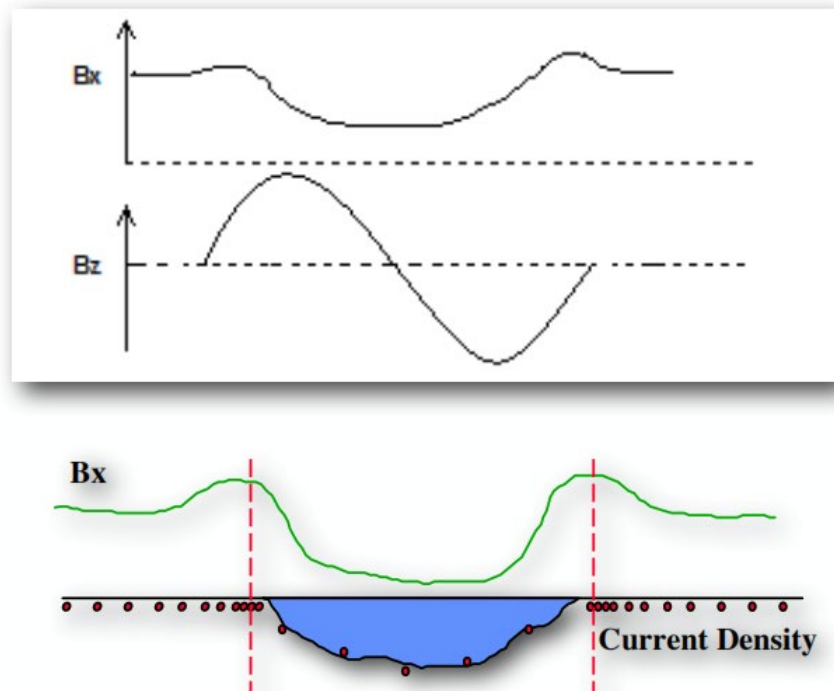


Figura 5: Graficas cartesianas

La gráfica de B_x presenta un aumento en su valor que se corresponde con los extremos del defecto, dado que es ahí donde se acumulan más líneas de flujo eléctrico.

3.5 Interpretación entre la gráfica de B_z y la Densidad de Líneas de Flujo eléctrico y su Curvatura

La gráfica de B_z presenta dos valores pico, uno positivo y otro negativo, que corresponden a dos puntos muy cercanos a los extremos del defecto (Figura 6).

En los extremos del defecto, la curvatura de las líneas de flujo produce una componente perpendicular a la superficie de la pieza (Z), cuya magnitud está en función del radio de curvatura de las líneas de flujo y su signo depende de la dirección de giro de estas (regla de la mano derecha).

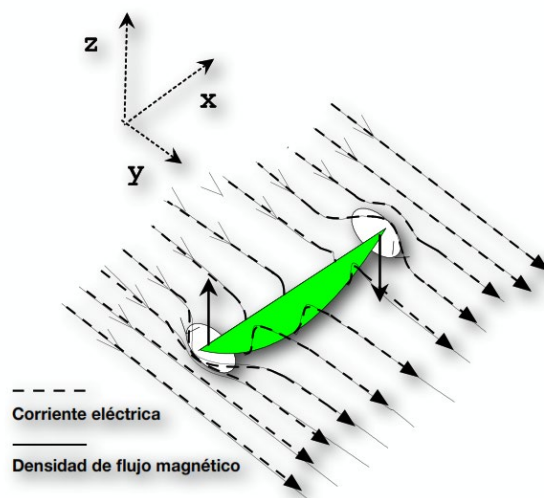


Figura 6: Grafica de B_z y la densidad de líneas de flujo eléctrico

Como resultado de estas interacciones, la interrelación específica entre B_x , B_z y la grieta producirá normalmente los siguientes trazos en las gráficas (Figura 7):

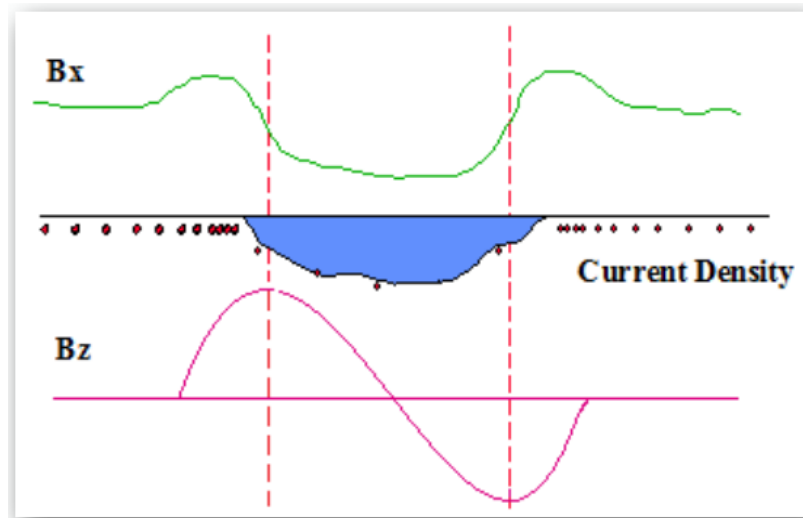


Figura 7: Gráfica de interrelación entre B_x , B_z y la grieta

3.6 Interrelación entre las gráficas de B_x , B_z y Mariposa

Al combinar B_x y B_z en un gráfico (Figura 8) polar se elimina el parámetro de tiempo, por lo que la gráfica de mariposa es independiente de la velocidad de desplazamiento de la sonda. Esta característica ayuda a diferenciar la señal producida por una grieta de otras señales, permitiendo una velocidad de exploración muy rápida sin ser muy sensible a los cambios de velocidad que el operador pueda efectuar durante un rastreo.

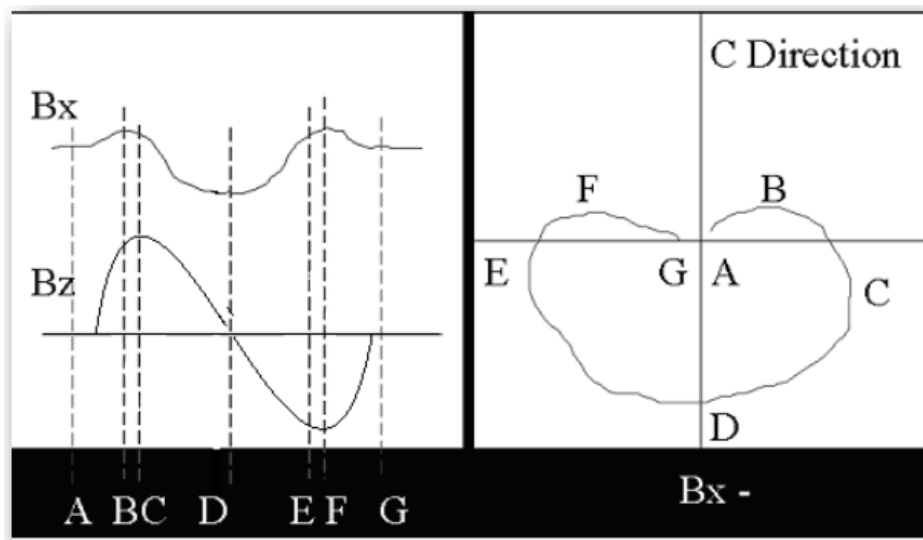


Figura 8: Gráfica de B_x , B_z y Mariposa

3.7 Principio de operación sensor CP/ B_z

Al desplazar la sonda en dirección C, a medida que el campo de excitación interactúa con la bobina del sensor CP/ B_z , la presencia de una grieta crea una respuesta negativa sobre el primer extremo de la grieta, un equilibrio y luego una respuesta positiva cuando el sensor se mueve sobre el segundo extremo de la grieta, lo que permite realizar una lectura de B_z . La polaridad de las señales se invertirá si la sonda se desplaza en dirección A.

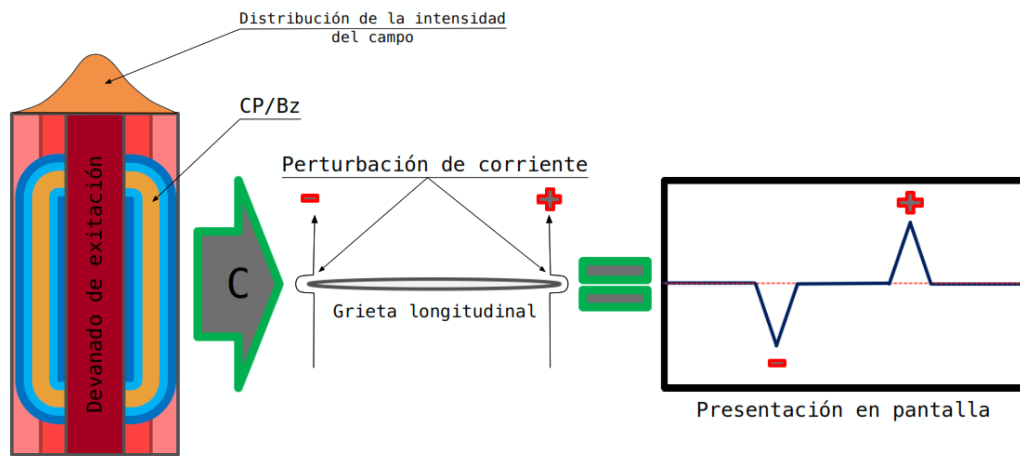


Figura 9: Principio de operación sensor CP/Bz

3.8 Principio de operación sensor Abs/Bx

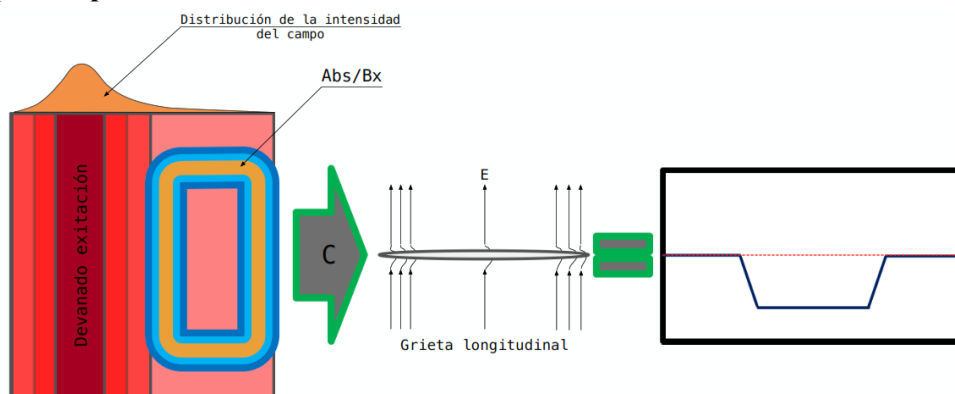


Figura 10: Principio de operación sensor Abs/Bx

El campo de excitación reduce su intensidad al alejarse del devanado, al colocar el devanado de excitación adyacente a la bobina de detección Abs/Bx, se inducen líneas de campo (E) que fluyen a lo largo de la superficie del material, siguiendo la trayectoria superficial del defecto. El campo fluye hacia abajo y luego hacia arriba del defecto siguiendo la superficie del material. Midiendo esta interacción de campo, se obtiene Bx.

Al colocar las 2 bobinas del sensor adyacentes entre sí y utilizando un único devanado de excitación, se pueden obtener Bx y Bz simultáneamente:

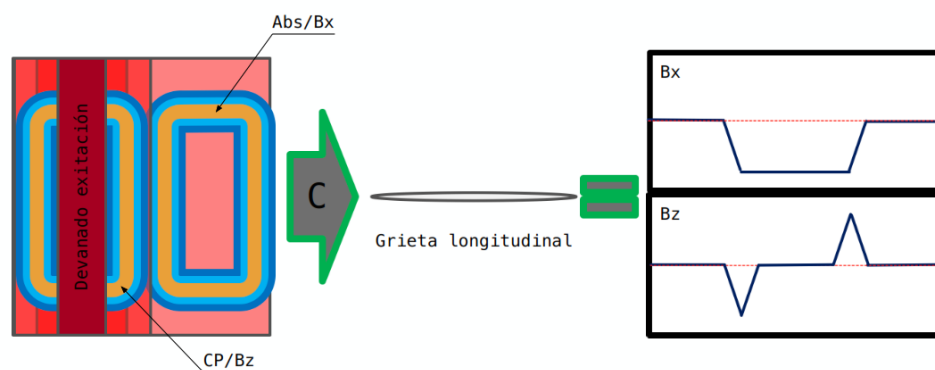


Figura 11: Grafica Bx y Bz en simultaneo

3.9 Ajustes previos a la inspección

Una de las características más importantes y única del sistema ACFM es que no requiere calibración previa en sitio antes de iniciar un servicio de inspección. Esta característica se logra con el uso de archivos electrónicos de configuración para las sondas que almacenan todos los datos de configuración necesarios para operar en un material específico.

De todos modos, el operador tiene la responsabilidad de efectuar una prueba funcional cuando se requiera y una prueba operativa antes de iniciar cualquier trabajo de inspección para verificar el estado del sistema y generar un registro que lo compruebe.

La prueba funcional se lleva a cabo en una placa del mismo material del elemento bajo inspección y debe tener por lo menos 2 ranuras elaboradas por electroerosión (EDM) de 50 mm x 4 mm y 20 mm x 2 mm, estas ranuras deben estar a una distancia del borde de la placa no menor a 100 mm.

3.10 Identificación de una señal característica de una grieta

Una señal producida por un defecto longitudinal (paralelo a la dirección de exploración) generara tres características reconocibles en las gráficas de Bx, Bz y Mariposa.

Para que esta señal sea identificada positivamente como una indicación de grieta deberá cumplir con los siguientes criterios:

- 1) Un ligero incremento en el valor de Bx seguido de una caída gradual con una pendiente constante, alcanzando un valor mínimo donde se invierte la pendiente hasta que se alcanza un valor ligeramente superior a la línea promedio.
- 2) Un incremento súbito en el valor de Bz, cuyo signo debe corresponder con la dirección de desplazamiento de la sonda.
- 3) La combinación de ambas gráficas debe generar un lazo cerrado hacia abajo con un contorno de alas de mariposa. La dirección de generación de esta gráfica debe corresponderse con la dirección de desplazamiento de la sonda.

Comportamiento característico de Bx para una grieta de perfil semi-elíptico:

Gráfica de Bx

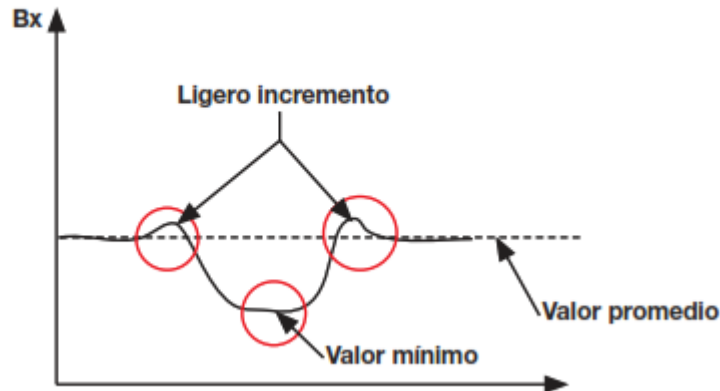


Figura 12: Grafica Bx

La gráfica de Bz presenta un cambio súbito de valor con un incremento cuyo signo (positivo o negativo) está en función de la dirección de desplazamiento de la sonda seguido de un cambio de magnitud similar, pero de signo contrario hasta alcanzar el valor promedio de la señal.

Gráfica de Bz

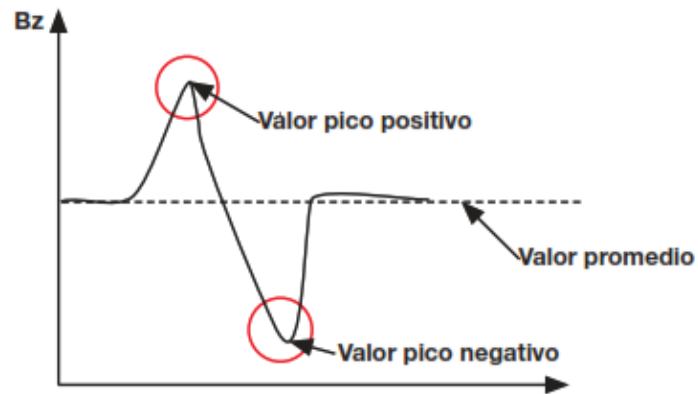


Figura 13: Grafica Bz, avance en dirección C

Cuando la sonda se desplaza en la dirección C, el primer valor pico en Bz es negativo y positivo el segundo:

Cuando la sonda se desplaza en la dirección A, la gráfica de mariposa se genera en sentido contrario a las manecillas del reloj (Anticlockwise):

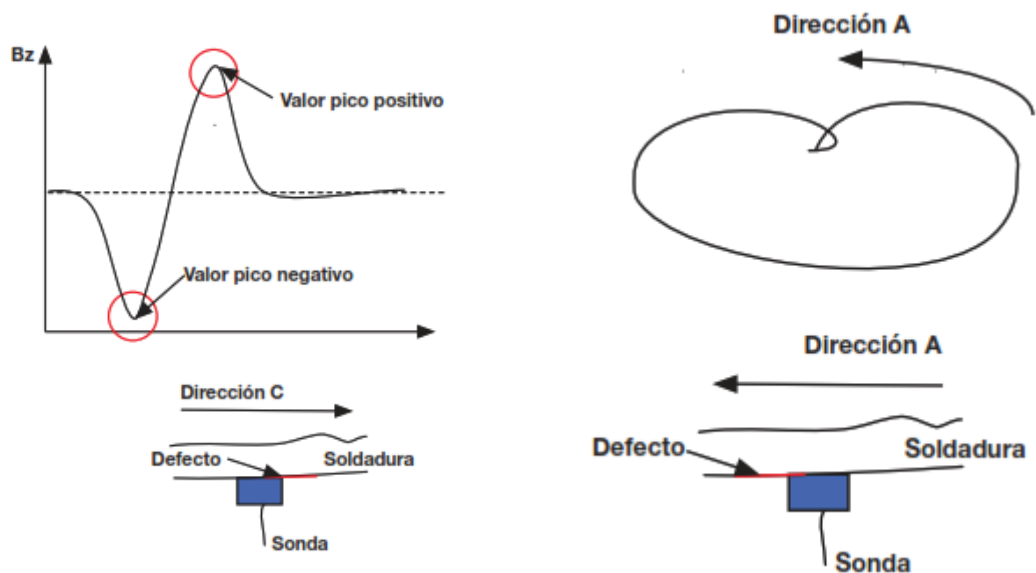


Figura 14: Grafica Bz, avance en dirección A

3.11 Condiciones superficiales en Inspección ACFM

Condición	Efecto observado	Impacto en la inspección
Recubrimientos	- Recubrimiento no conductivo en buen estado: sin problemas hasta 10 mm de espesor.	- Precisión de dimensionamiento reducida.
	- Recubrimiento deteriorado: exploraciones deficientes y señales de levante.	- Posible pérdida de confiabilidad en resultados.
Corrosión	- Capas ligeras: exploración irregular.	- Disminuye sensibilidad para grietas pequeñas.
	- Pérdida de material (pitting): señales adicionales de ruido.	- Dificulta el dimensionamiento.

		- Sondas estándar menos sensibles a pérdida de material que otros tipos.
Cambios en el material	- Diferencias en propiedades del metal. - Soldaduras de reparación o uniones de metales distintos: señales de gran amplitud.	- Señales difíciles de distinguir de las grietas. - Riesgo de enmascarar fisuras reales.

3.12 Limitaciones del método ACFM

Si bien la técnica ACFM presenta ventajas operativas significativas para la detección y dimensionamiento de grietas superficiales, existen determinadas condiciones que pueden influir en la calidad de la señal y en la precisión de la evaluación.

a) Efecto de borde

La técnica es sensible al denominado efecto de borde, fenómeno que se produce cuando la sonda se aproxima a extremos geométricos del componente inspeccionado. En estas zonas pueden generarse variaciones de mayor amplitud en la señal, capaces de enmascarar indicaciones reales de grietas ubicadas en proximidad a los bordes. Por este motivo, se requiere especial cuidado durante la exploración en dichas áreas. El empleo de sondas tipo Micro o Mini, equipadas con bobinas de inducción de menor tamaño, permite reducir este efecto al minimizar la distorsión del campo inducido.

Asimismo, la presencia de inclusiones metálicas o campos magnéticos residuales puede generar señales espurias que deben ser cuidadosamente analizadas para evitar interpretaciones erróneas.

b) Limitaciones en el dimensionamiento de grietas

La exactitud del dimensionamiento mediante ACFM se basa en modelos teóricos que asumen la existencia de un campo eléctrico uniforme en el material y una grieta de perfil semi-elíptico. Sin embargo, las condiciones reales de servicio no siempre reproducen completamente estos supuestos, lo que puede introducir desviaciones en la estimación de la profundidad del defecto.

Las grietas por fatiga suelen presentar una geometría cercana al perfil semi-elíptico, lo que favorece una buena correlación con el modelo teórico. En cambio, defectos asociados a esfuerzos térmicos o a corrosión bajo tensión (SCC) pueden exhibir morfologías más complejas, dificultando su modelización y aumentando la incertidumbre en el dimensionamiento.

La correcta selección de la sonda y el control de la trayectoria de exploración resultan fundamentales para mantener, en la medida de lo posible, un campo uniforme que permita optimizar la confiabilidad de los resultados.

c) Condiciones superficiales

Recubrimientos

Un recubrimiento no conductivo en buen estado no representa inconvenientes significativos durante una inspección mediante ACFM, siempre que su espesor no supere aproximadamente los 10 mm. En recubrimientos deteriorados o irregulares pueden generarse señales asociadas al efecto de levante (lift-off), reduciendo la exactitud en el dimensionamiento.

Corrosión

Capas ligeras de corrosión no afectan sustancialmente la técnica, aunque pueden producir exploraciones menos uniformes. En presencia de pérdida de material localizada (pitting), se introducen señales adicionales de ruido que pueden disminuir la sensibilidad para la detección de grietas pequeñas y dificultar su evaluación.

Cambios en el material

Las variaciones en propiedades metalúrgicas, especialmente en soldaduras de reparación o en uniones de metales disímiles, pueden generar señales de gran amplitud difíciles de distinguir de las producidas por grietas, existiendo riesgo de enmascaramiento o interpretación ambigua.

3.13 Resultados de piezas ensayadas

3.13.1 Inspección de brida de acero inoxidable

Durante la operación de la brida en campo se produjo una falla generando una fuga en una de las uniones soldadas de la brida de acero inoxidable. Inicialmente, para detectar la fuga, se aplicó el método de líquidos penetrantes (PT) para localizar la falla; sin embargo, los resultados no fueron concluyentes y no permitieron identificar la anomalía de manera efectiva.

Posteriormente, se aplicó la técnica de Corrientes Alternas en Campo Magnético (ACFM) en cada soldadura, logrando localizar la fisura de forma rápida y precisa. Este resultado evidencia la mayor sensibilidad y confiabilidad del ACFM frente a métodos convencionales en la detección de grietas superficiales en componentes metálicos.



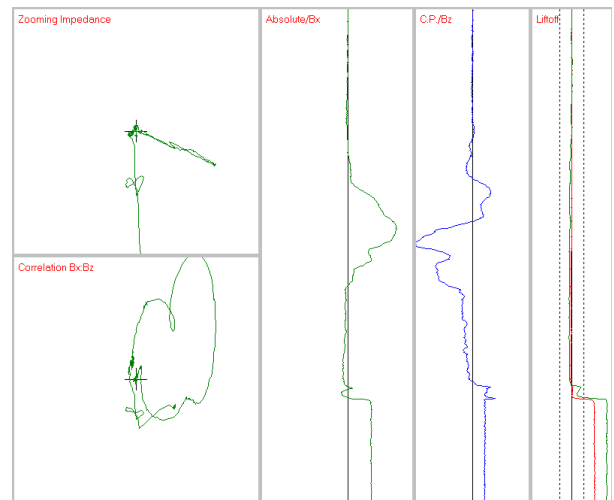
3.13.2 Inspección de línea de alta presión

Durante la inspección de una línea de alta presión, se detectó una indicación de fisura en la pestaña empleando la técnica de Corrientes Alternas en Campo Magnético (ACFM). El procedimiento se realizó de manera rápida y eficiente, confirmando la capacidad del método para identificar discontinuidades superficiales en condiciones operativas críticas.

Asimismo, la indicación fue corroborada mediante el método de partículas magnéticas (MT), lo que proporcionó una verificación independiente y reforzó la confiabilidad del hallazgo. La combinación de ambas técnicas permitió:

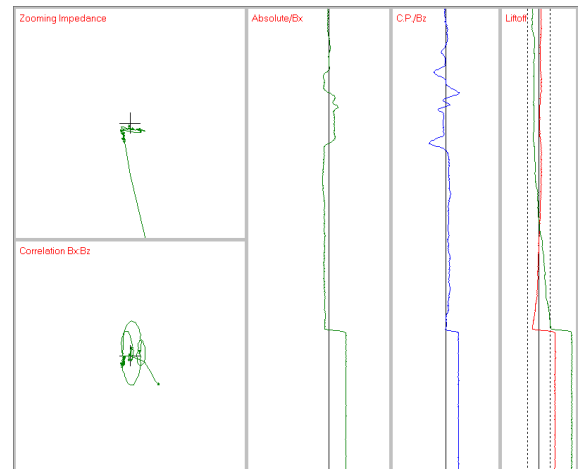
- Validación cruzada de resultados, incrementando la certeza en la detección.
- Reducción del riesgo de falsos positivos o negativos, al contrastar la respuesta electromagnética con la evidencia visual de acumulación de partículas.

- Mayor robustez en la evaluación de integridad estructural, especialmente en componentes sometidos a altas presiones, donde la detección temprana de fisuras es crítica para la seguridad operacional.



3.13.3 Inspección de brida macho, línea de alta presión

Se llevó a cabo la inspección de una brida macho utilizada en un sistema de alta presión, en la cual se detectó una indicación de fisura localizada en la pestaña. El análisis reveló la presencia de fisuras múltiples, lo que evidencia un proceso de degradación más avanzado de lo inicialmente esperado. La identificación de estas discontinuidades resulta crítica, dado que las bridas en líneas de alta presión están sometidas a condiciones de operación severas, donde la integridad estructural es esencial para garantizar la seguridad y continuidad del servicio. La presencia de fisuras múltiples incrementa el riesgo de propagación y eventual falla catastrófica.



4. Conclusión:

La técnica ACFM se consolida como una herramienta eficaz y confiable para la detección y el dimensionamiento de grietas superficiales en soldaduras y componentes metálicos, particularmente en entornos industriales donde la integridad estructural resulta crítica. Su capacidad para inspeccionar a través de recubrimientos no conductivos en buen estado permite reducir intervenciones sobre el activo, optimizar tiempos operativos y minimizar costos asociados a la preparación superficial, sin comprometer la calidad de la evaluación.

El fundamento electromagnético de la técnica, basado en la generación de un campo uniforme y en el análisis combinado de las señales Bx y Bz, posibilita no solo la identificación de discontinuidades, sino también una estimación de su profundidad en tiempo real. La registración digital de los ensayos

garantiza trazabilidad, respaldo documental y posibilidad de análisis comparativo a lo largo del tiempo, fortaleciendo los procesos de auditoría y gestión de integridad.

Si bien existen limitaciones asociadas al efecto de borde, a determinadas condiciones superficiales y a la modelización teórica del perfil de grieta, una correcta selección de la sonda y una adecuada interpretación de las señales permiten mantener niveles satisfactorios de confiabilidad.

En este sentido, el ACFM constituye una alternativa técnica robusta frente a métodos convencionales, aportando información relevante para la evaluación de criticidad y la toma de decisiones basadas en riesgo dentro de esquemas modernos de gestión de activos.

Bibliografía

ASME V, Artículo 15

Manuales del fabricante de ACFM

Li, W., Yuan, X., Zhao, J., Yin, X., Li, X. (2025). Alternating Current Field Measurement Technique for Detection and Measurement of Cracks in Structures.

Curriculum Vitae de los autores:

Ohara Luis

Ingeniero Electrónico, graduado de la Universidad Tecnológica Nacional

Trayectoria:

En el año 2007 inicié las actividades relacionadas con los ensayos no destructivos. Me desempeñe como Ingeniero de aplicaciones en la línea de Krautkramer y luego en la línea de Olympus Industrial, en la técnica de ultrasonido convencional, phased array y corrientes inducidas ofreciendo soluciones en el área de OIL&GAS, automotriz, aeroespacial e industrial.

El año 2018 me radique en Neuquén para desempeñarme como líder técnico en la firma Petromark SRL.

Cargo actual en la empresa:

Líder Técnico

Lohrengel Facundo

Ingeniero Electrónico, graduado de la Universidad Nacional del Comahue

Trayectoria:

En el año 2023 inicié mis actividades en el área de Ensayos No Destructivos (END) como pasante. Entre mis principales tareas se encuentran brindar asistencia en la ejecución y evaluación de ensayos, colaborar en la elaboración de planes de inspección y participar en el mantenimiento de los equipos utilizados en las inspecciones.

En el año 2025 comencé a desempeñarme como asistente técnico en el área de Integridad en Petromark SRL.

Cargo actual en la empresa:

Asistente técnico.