



Introducción

Las técnicas FMC/TFM provienen del *Phased Array*, que a su vez deriva del ultrasonido convencional. La primera aplicación del *Phased Array* tuvo lugar en el ámbito de la medicina, específicamente en las ecografías con fines diagnósticos. Más tarde, más precisamente para la década de

1990/2000, *Phased Array* fue introducido en la industria con el mismo concepto que se utilizaba en medicina (Figura 1): observar el estado interior de diversas piezas y partes críticas de una estructura. Por ejemplo, inspección de soldaduras, localización de fisuras y distintos defectos en ejes, realización de mapeos de corrosión, controles de fabricación en

línea y fuera de ella, entre otros usos.

La técnica *Phased Array* consiste en un tipo de ensayo no destructivo cuyo principio de funcionamiento deriva del ultrasonido convencional, aunque con ciertas diferencias. Entre ellas, se destaca el hecho de que *Phased Array* utiliza transductores con múltiples elementos capaces de ser excitados de manera individual,

Nuevas técnicas de inspección en ensayos no destructivos: FMC / TFM (*Full Matrix Capture / Total Focusing Method*)

Por *Martín Chimenti (ARO S.A.)*

En este trabajo se presentan los principios de funcionamiento más relevantes de las técnicas de inspección FMC/TFM, ambas de alta sustentabilidad desde el punto de vista medioambiental y de la salud de las personas, al tiempo que se ofrecen ejemplos de aplicaciones reales. Una sólida formación en FMC/TFM, elaborar un plan de escaneo óptimo y acceder a un equipo apropiado para llevar a cabo inspecciones con esta técnica son tres factores clave para facilitar el trabajo de inspectores de campo y del personal de integridad.

Este trabajo fue seleccionado del 4º Congreso de Integridad y Corrosión en la Industria del Petróleo y del Gas realizado por el IAPG.

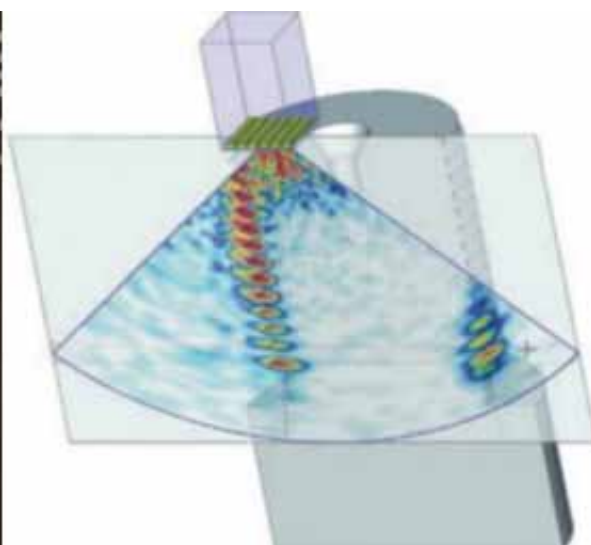


Figura 1. Diagnóstico médico e industrial.

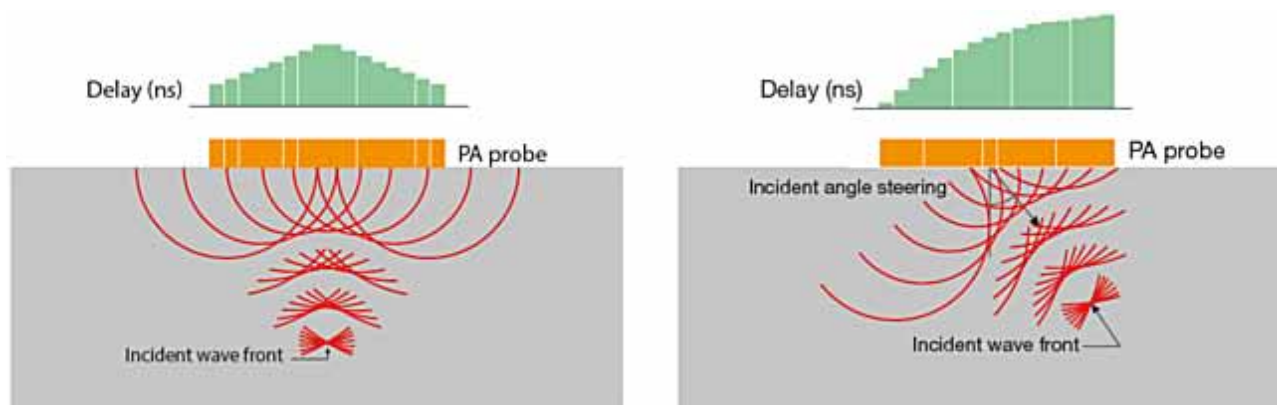


Figura 2. Ilustración de la dirección del haz en función de los distintos retardos para cada uno de los elementos del transductor.

generando así un frente de ondas en la dirección deseada (Figura 2). Los ecos recibidos por cada uno de los elementos son retardados temporalmente entre sí, para luego ser sumados y producir, como resultado, una sola vista A-Scan para cada ángulo que se utilice. De esta forma, el receptor combina las señales de los elementos generando un conjunto de vistas de la pieza ensayada y, así, se inspecciona el 100% de lo deseado obteniéndose más información que si se inspeccionará con ultrasonido convencional.

Al igual que en ultrasonido convencional, con *Phased Array* se pueden localizar discontinuidades y conocer su profundidad. Pero, a diferencia del ultrasonido convencional, con *Phased Array* es posible indicar las coordenadas en las cuales se encuentra una discontinuidad, y también es posible medirla (en ancho y largo). A diferencia del ultrasonido convencional, este ensayo tiene la ventaja de obtener un registro de la inspección realizada y, además, demanda tiempos muy cortos de inspección, lo que posibilita llevarla a cabo a gran velocidad en comparación con otras técnicas no destructivas.

Otra de las ventajas de *Phased Array* reside en que toda la información que se obtiene es conseguida en tiempo real, lo que permite corregir *in situ* los defectos que se encuentren sin necesidad de tener que procesar de forma excluyente la información para hacer un diagnóstico fuera de campo. De esta forma, se logra reducir notablemente los tiempos de ensayos. Asimismo, esta tecnología es

altamente sustentable desde el punto de vista de la salud de las personas y del medioambiente, ya que no utiliza productos químicos ni nocivos, al margen de que el hecho de no requerir consumibles facilita la reducción de futuros costos constantes.

Finalmente, otro factor a tener en cuenta en esta técnica es la focalización, es decir, la concentración de toda la energía del haz en una determinada zona de interés en lo que se está evaluando. Como contrapartida, la mayoría de los equipos industriales permite focalizar en una profundidad determinada, lo que hace que se tenga una muy buena resolución en esa profundidad; sin embargo, a medida que se encuentran reflectores fuera de esta área, estos van a aparecer borrosos y algo más grandes que un reflector idéntico que se encuentre dentro del área de focalización indicada en el equipo de inspección. Por el contrario, la técnica TFM, derivada de *Phased Array*, posibilita una amplia focalización que abarca toda el área que será inspeccionada.

Desarrollo

El método de focalización total (TFM por sus siglas en inglés: *Total Focusing Method*), comenzó a utilizarse en industria recientemente. TFM utiliza los datos obtenidos a través de la técnica de captura de la matriz completa, o *Full Matrix Capture* (FMC), lo que permite, entre otras cosas, resolver el problema de resolución y focalización en *Phased*

Array. Así, con TFM no solo se mantiene la amplitud en los puntos focalizados dentro del área de interés que el operador indica en el equipo de inspección, sino que también se genera una excelente focalización en toda esta área y no solo a una determinada profundidad.

El método de FMC es la estrategia de adquisición utilizada, cuyos datos luego serán procesados por TFM. Automáticamente, una vez procesados los datos, se visualizan en la pantalla del equipo las indicaciones encontradas en la inspección. Cabe destacar que este proceso, aquí descrito en una sucesión de tres pasos, tiene lugar en lapsos sumamente breves y, por ende, completamente imperceptibles.

En este trabajo se abordan las principales características de FMC / TFM, los principales pasos para realizar el ensayo y los resultados obtenidos en diversas aplicaciones realizadas con el equipo OmniScan X3 de la marca Olympus.

Principios elementales de funcionamiento de FMC/TFM

En FMC, y a diferencia de la adquisición en *Phased Array*, se excita al transductor de a un elemento por vez y, cuando la onda generada en esta excitación detecta una indicación en el volumen de inspección, se genera una reflexión que es recibida por todos los elementos del transductor. Este proceso se repite hasta que el total de elementos del transductor es pulsado. De esta forma, todos los A-Scan generados son alma-

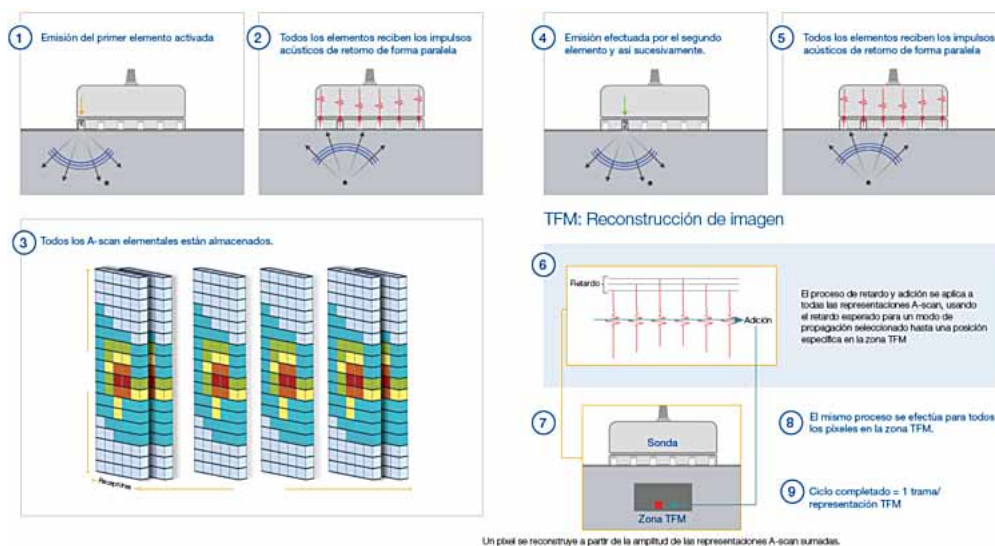


Figura 3. Funcionamiento de FMC y TFM.

cenados en un formato de matriz, en donde las variables intervinientes serán el tiempo, los receptores y los emisores (Figura 3, pasos 1 a 5).

El proceso de reconstrucción de la imagen de los distintos A-Scan, generados por la adquisición FMC, es realizado por TFM (Figura 3, pasos 6 a 9). Los datos adquiridos por FMC se procesan para crear la imagen enfocando en toda el área de interés. Esta área está formada por píxeles, un pixel se reconstruye a partir de las distintas amplitudes de los A-Scan sumados en la matriz. Una vez realizado esto para todos los píxeles que constituyen la zona o área de TFM (seleccionada en función de lo que se está inspeccionando), se obtienen imágenes de gran nitidez y resolución.

El transductor utilizado en FMC/TFM es el mismo que se utiliza en inspecciones de *Phased Array*. Según el equipo que se utilizará y de las habilitaciones del software proporcionadas por los fabricantes, ambas técnicas pueden encontrarse, de serie, disponibles para su uso. El hecho de que FMC/TFM utilice los mismos transductores, e incluso las mismas cuñas, escáneres, encoders y demás accesorios que *Phased Array*, es una gran ventaja, ya que se reducen los costos de inversión en el caso de empresas que ya utilizan la tecnología de *Phased Array* en sus respectivos controles periódicos de integridad y quieren migrar a FMC/TFM.

Un caso real de aplicación de *Phased Array* y FMC/TFM

Un ejemplo práctico que permite ver en acción los principios de funcionamiento de FMC/TFM y compararlos con los de *Phased Array* es el caso de una probeta de aluminio con cuatro agujeros laterales, pasantes, hechos de igual diámetro entre sí, de los cuales dos están ubicados a igual profundidad; y los restantes, a distintas profundidades (Figura 4). La zona de los cuatro orificios fue inspeccionada con un transductor de 5 MHz con cuña de 0°, tanto por *Phased Array* como por FMC/TFM, tal como se explica en la figura 4.

Cuando se apoya el transductor sobre el bloque, y sin desplazarlo, tal como se ve en la foto de la figura

4, y en el modo *Phased Array*, se observa que los cuatro agujeros no se ven juntos en la pantalla del equipo, sino que se ven por partes.

En la figura 5a se observan los primeros tres agujeros, uno en forma completa y los otros dos en forma parcial. Al desplazar el transductor sobre esta zona podríamos ver, en forma completa, los dos primeros, o el segundo y el tercero, o bien los dos que están a la misma profundidad (Figura 5b). En este último caso, se puede apreciar que la resolución lateral del transductor no es suficiente para detectar ambos agujeros en forma separada (tal como encuentran en la probeta), sino que el haz del transductor genera una continuidad entre ellos por su reducida separación.

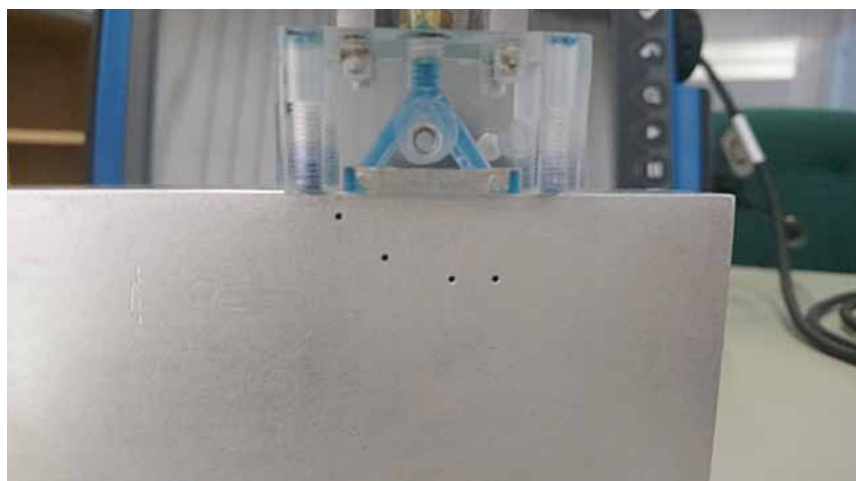


Figura 4. Escaneo a 0° sobre probeta con cuatro agujeros laterales de iguales diámetro entre sí.

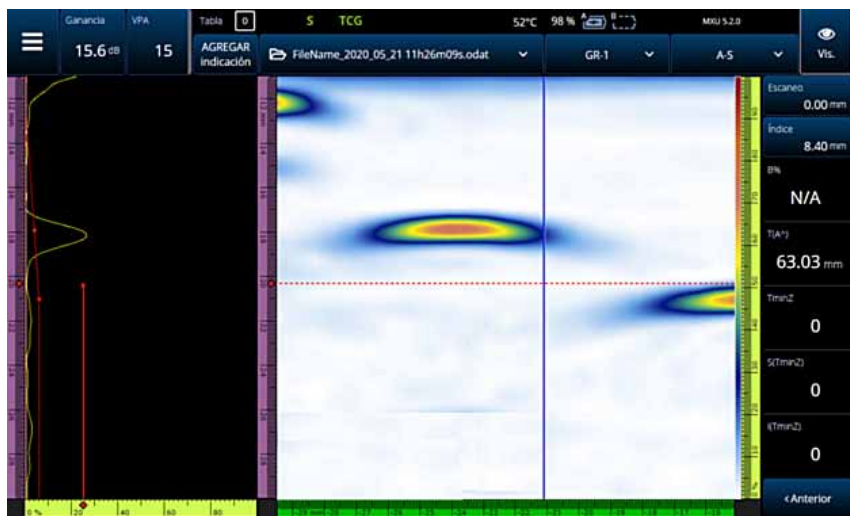


Figura 5a. Detección de algunos de los agujeros por Phased Array sin desplazar el transductor.

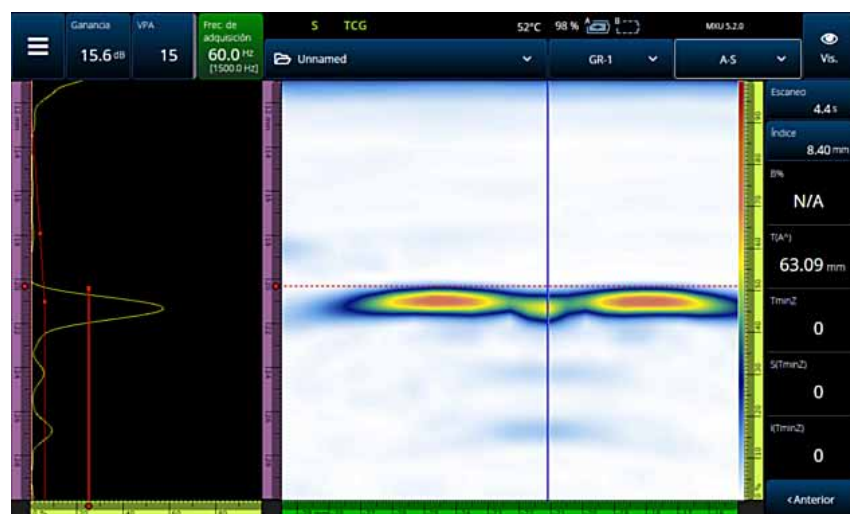


Figura 5b. Detección de algunos de los agujeros por Phased Array sin desplazar el transductor.

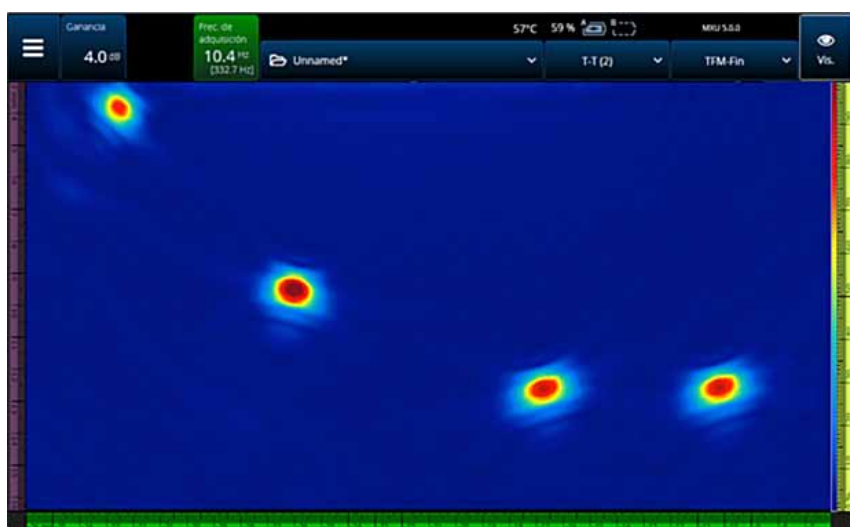


Figura 6. Detección de los cuatro agujeros por FMC/TFM sin desplazar el transductor.

Por el contrario, en el caso de realizar la inspección con el equipo en modo FMC/TFM (Figura 6), ni bien se apoya el transductor en la zona de los agujeros de la probeta, y sin necesidad de desplazarlo, se detectan los cuatro agujeros con una gran resolución y una geometría no ovalada sino circular, asemejándose así a la real de la probeta evaluada. Por consiguiente, TFM proporciona una mayor resolución, focalización y definición geométrica de indicaciones en comparación con *Phased Array*.

Modos de onda y plan de escaneo

TFM también se diferencia de *Phased Array* en la posibilidad de utilizar distintos modos de ondas de inspección, que consisten en manipular electrónicamente al haz en su dirección y en el tipo de onda que se utilizará en función de lo que se vaya a inspeccionar. Algunos de estos modos de onda se pueden observar en las figuras 7a y 7b. En una misma inspección, se pueden realizar barridos en modo pulso eco con ondas transversales (T) o longitudinales (L), o también se puede utilizar el modo auto-tándem (en el que un grupo de elementos del mismo transductor será encargado de emitir y otro grupo, de recibir las señales), se pueden combinar aquí ondas longitudinales con transversales o bien una de estas dos de manera individual.

Los modos indirectos (por ejemplo, LL-L, TT-T, TT-TTT) y los modos de conversión (como el LT-L) permiten seguir el perfil de una indicación orientada de forma vertical, mientras que los modos directos (como L-L o T-T) o los modos de reflexión (TT-TT) proporcionan mayor sensibilidad y precisión a las puntas de las indicaciones desde otras orientaciones de fallas por sí solos; sin embargo, los modos directos no se considerarán adecuados para el examen de volumen completo. De aquí la importancia de contar con un equipo con capacidad multigrupo, como se verá más adelante.

La selección del modo de inspección se lleva a cabo durante la elaboración el plan de escaneo, etapa fundamental para asegurar los mejores resultados posibles en la inspec-

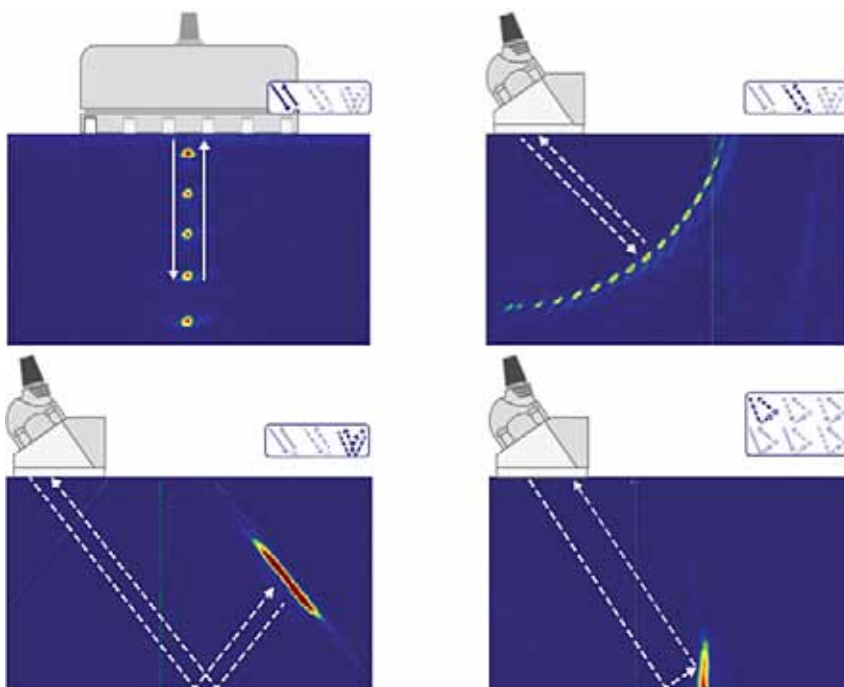


Figura 7a. Algunos modos de inspección, por pulso-eco y auto-tándem, en TFM.

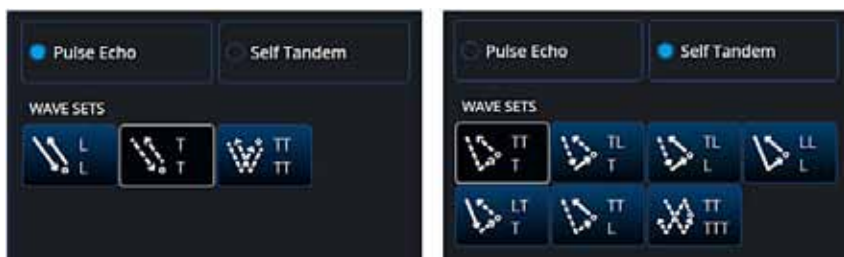


Figura 7b. Algunos modos de inspección, por pulso-eco y auto-tándem, en TFM.

ción. En el plan de escaneo, además de seleccionar los modos de onda y el transductor y la zapata a utilizar, también se configura el diseño de la soldadura (en caso de inspeccionar una) y el tamaño de la zona o área de TFM que se utilizará para llevar a cabo la inspección.

La elaboración del plan de escaneo y la selección del transductor que se utilizará se realizan con gran facilidad gracias al asistente de plan de escaneo y al AIM (Mapa de Influencia Acústica) que posee el OmniScan X3 (Figuras 8 y 9). El AIM es una herramienta que permite visualizar de forma anticipada la distribución acústica del haz para cada modo de ondas de TFM en función de lo que se desea inspeccionar. Como consecuencia, también posibilita ver el alcance del transductor y de la zapata seleccionados o a seleccionar, ya que, como se señaló, podemos anticiparnos a la inspección visualizando qué transductor y qué configuración son

los más apropiados para realizar un ensayo determinado, de la forma más efectiva posible.

Además de la visualización de la concentración de colores intensos en el AIM, otro parámetro para tener

en cuenta a la hora de realizar el plan de escaneo será el del índice de sensibilidad, el cual representa la máxima amplitud de cada Mapa AIM y es un número adimensional, que se buscará que siempre sea el más alto posible.

En la figura 9 se puede observar el AIM (Mapa de Influencia Acústica), en el que las áreas rojas intensas muestran que la respuesta ultrasónica es muy buena y varía entre 0 dB y -3 dB en relación con la amplitud máxima. Las áreas naranjas varían entre -3 dB y -6 dB a partir de la amplitud máxima, las amarillas varían entre -6 dB y -9 dB, y así sucesivamente. Además, se puede ver, alrededor de la soldadura y en color anaranjado, el rectángulo correspondiente al área de TFM, zona que el operador configura indicando sus dimensiones y, al mismo tiempo, visualizándola en la pantalla del equipo a la hora de realizar el plan de escaneo.

Al combinar la información que brindan los colores del AIM junto con los índices de sensibilidad, se facilita en gran medida la selección de uno u otro transductor, como así también la correcta y adecuada elaboración del plan de escaneo, esencial para obtener un resultado satisfactorio de inspección.

A continuación, se mostrará cómo, gracias al Mapa de Influencia Acústica (AIM), se evita la realización de pruebas empíricas innecesarias para la selección del transductor.



Figura 8. Elaboración de plan de escaneo, geometría y tipo de material por inspeccionar.

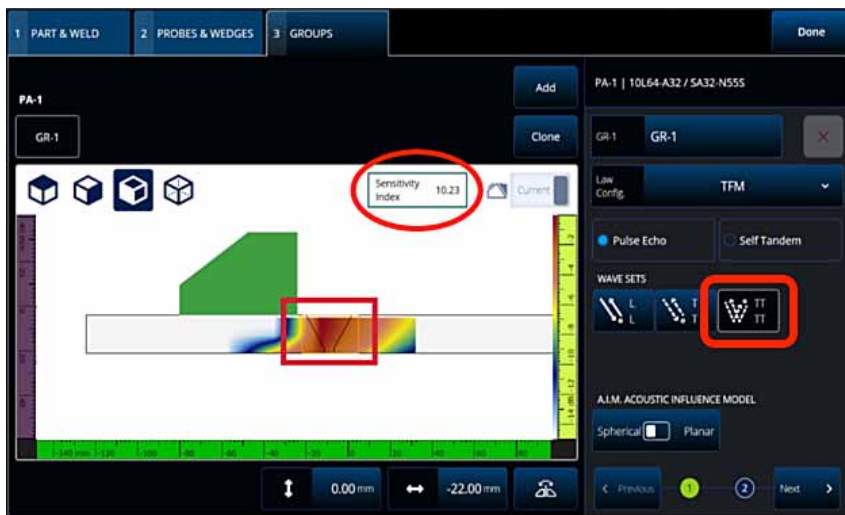


Figura 9. Configuración de inspección mediante la ayuda del AIM e índice de sensibilidad.

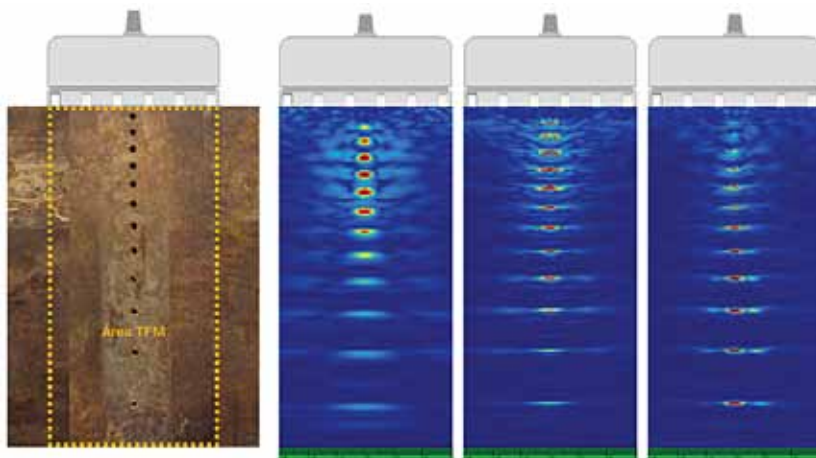


Figura 10. Obtención de distintas imágenes en función del transductor seleccionado para una misma área de TFM.

En la figura 10 se observa que, para una determinada zona de inspección (área de TFM), se dispone de tres transductores distintos para ensayarla. En función del transductor a utilizar, se obtendrán distintos resultados en la zona cercana a la superficie, en el centro de la pieza o en el extremo opuesto a la superficie (cada caso se visualiza, de manera respectiva, en las figuras 11, 12 y 13).

La probeta por inspeccionar (Figura 10) tiene doce agujeros del mismo diámetro realizados a distintas profundidades, pero todos sobre el mismo eje. En el caso del primer transductor que se utilizará, notamos que, según el Mapa AIM, la mejor respuesta se obtiene en el primer tercio del espesor de la probeta (Figura 11, izquierda). Esto se comprueba de manera empírica haciendo la inspección físicamente (Figura 11, derecha).

Con respecto al segundo transductor (Figura 12), según el AIM su respuesta es buena en una longitud mayor a la del caso anterior, pero se tiene un índice de sensibilidad menor al de la Figura 11 y esto hará que, si bien se detecta mayor cantidad de agujeros, su forma aparezca levemente deformada respecto a los detectados en la figura 11.

Para finalizar esta tanda de pruebas, se utiliza un tercer transductor (figura 13). Según el AIM, su respuesta

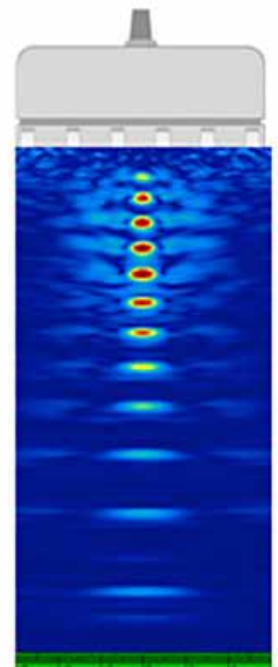
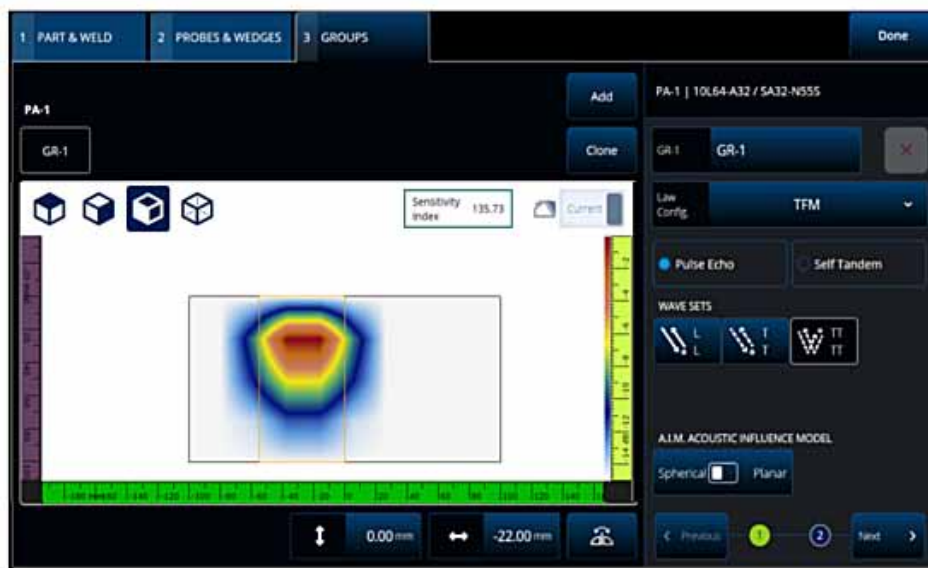


Figura 11. Ejemplo de simulación en Mapa de Influencia Acústica (AIM) (izquierda) e imagen real de inspección (derecha).



ta es buena luego de la mitad de espesor de la probeta, con un índice de sensibilidad menor al de los dos casos anteriores, pero de todas formas posibilitó ver los últimos agujeros, que no se pudieron visualizar en los dos ensayos previos. Sin embargo, en el tercer ensayo se perdió defini-

ción y capacidad de detección en el primer tercio de la probeta.

Como se observa en las figuras 11, 12 y 13, mediante el dibujo de la pieza por inspeccionar (que, en este caso, se podría asemejar a un ejemplo de corrosión), la indicación del material y el valor de espesor, la

selección de uno u otro transductor en el asistente de plan de escaneo y su respectivo modo de inspección (ondas longitudinales a 0°), se puede determinar cuál es el transductor más apropiado para llevar a cabo la inspección.

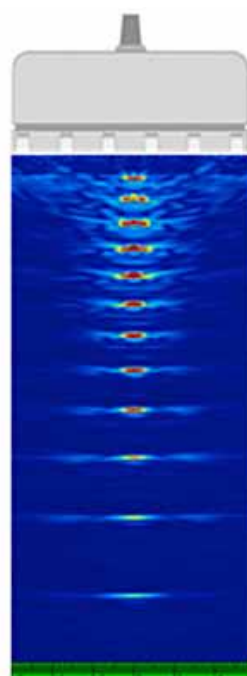


Figura 12. Ejemplo de simulación en Mapa de Influencia Acústica (AIM) (izquierda) e imagen real de inspección (derecha).

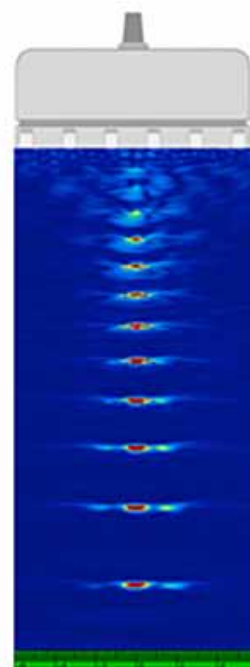
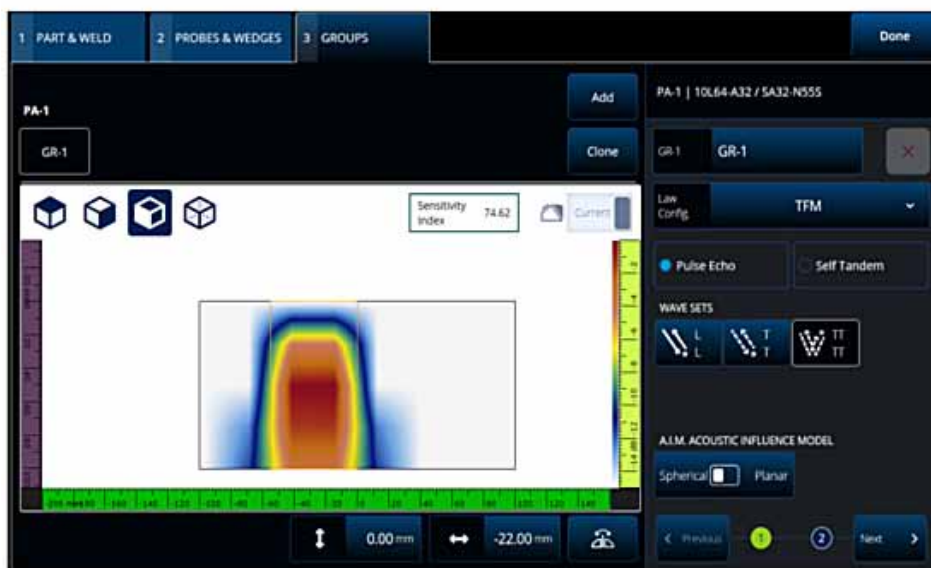


Figura 13. Ejemplo de simulación en Mapa de Influencia Acústica (AIM) (izquierda) e imagen real de inspección (derecha).

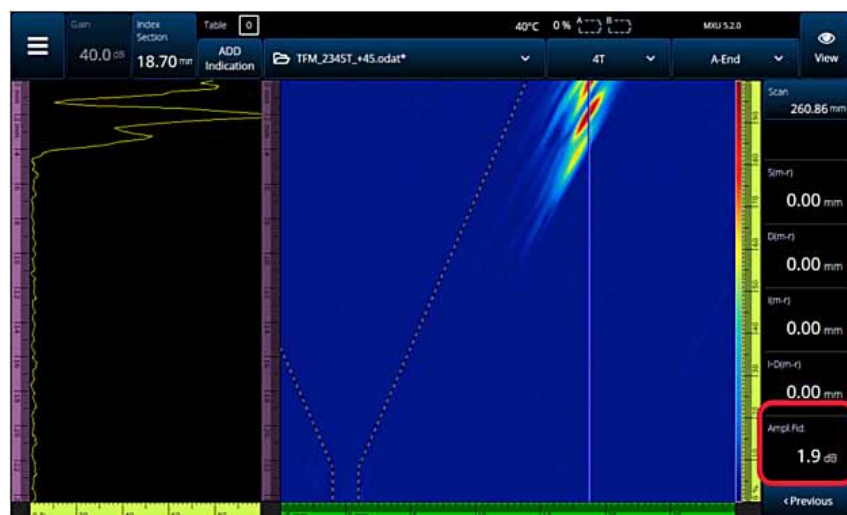


Figura 14. Valor de Amplitude Fidelity de lectura directa.

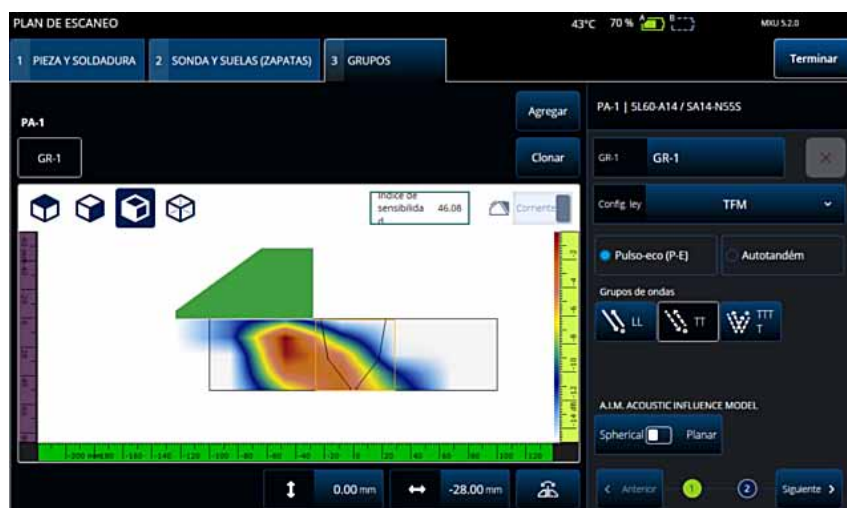


Figura 15. Plan de escaneo para inspección de soldaduras por FMC/TFM.

Amplitude Fidelity

Un concepto nuevo, y de vital importancia, que aparece en FMC/TFM, es el del *Amplitude Fidelity* (AF). Dicho parámetro es definido y establecido en el Código ASME BPCV 2019, Sección V, Artículo 4 (XI-461), y debe ser menor o igual a 2 dB.

El *Amplitude Fidelity* consiste en un parámetro que mide, en dB, la máxima variación de amplitud causada por la resolución de la grilla de TFM. Este parámetro se debe cumplir en toda el área de TFM que se selecciona en el plan de escaneo, por lo tanto, el equipo de inspección deberá mostrar el valor más alto de AF que se tenga en la zona de TFM (Figura 14); esto es lo que hace el OmniScan X3 y es clave que sea así, ya que del valor de AF dependerá de la sensibilidad del ensayo y, de eso el éxito de las inspecciones por realizar.

Inspección en soldaduras

El criterio empleado hasta aquí se sigue para inspección de soldaduras, pero con zapatas de tipo angular (Figura 15). En este caso, y a diferencia de *Phased Array* e incluso de Ultrasonido, no se selecciona un ángulo de inspección, sino que se observa directamente el haz representado por el mapa de colores proporcionado por

el AIM, el índice de sensibilidad, y se elige uno u otro modo de onda (es decir, se manipula electrónicamente el haz, orientándolo de forma que se abarquen distintas partes de la soldadura de la forma más perpendicular posible). Es importante destacar que se pueden realizar inspecciones con hasta cuatro modos en forma simultánea, y se obtienen los resultados de todos ellos *in situ*, sin necesidad excluyente de procesar imágenes. Esto resulta ventajoso, ya que una misma soldadura, o bien distintas regiones dentro de ella, pueden ser vistas de una u otra manera, se logra así una gran mejora en la geometría obtenida de las indicaciones (o defectos) y, por lo tanto, se facilita considerablemente la interpretación de lo inspeccionado.

Siguiendo lo anteriormente indicado acerca de los modos de onda pulso-eco y auto-tándem (Figura 7b), y aplicándolo a soldaduras, pueden lograrse distintas imágenes para un mismo defecto. Pero, si se sabe qué se está buscando, o bien si se arman dos, tres, o cuatro grupos distintos de inspección, pueden obtenerse excelentes resultados para las diversas geometrías de las indicaciones o defectos por encontrar.

Asimismo, debemos tener en cuenta que, además del parámetro de *Amplitude Fidelity*, y como parte del proceso de calibración, se deben verificar la velocidad y retardo (como en cualquier equipo de ultrasonido), la resolución y la sensibilidad, los modos de ondas (su efectividad) y el dimensionamiento (altura y longitud) contra un bloque patrón que contenga entallas, ranuras y agujeros laterales (por ejemplo, el especificado en ASME V en la figura XI-434.1-1).

En el caso de buscar fisuras con origen en el talón de la soldadura, y teniendo en cuenta la geometría de este defecto, la mejor dirección que puede recorrer el haz será en el modo auto-tándem en las 3T (Figura 16). Es decir, emisión de onda transversal al medio paso, reflexión en el fondo del material sin conversión de onda en su camino hacia el reflector (fisura de la Figura 16) y retorno del haz a un determinado grupo de elementos del transductor a partir de la reflexión en ella.

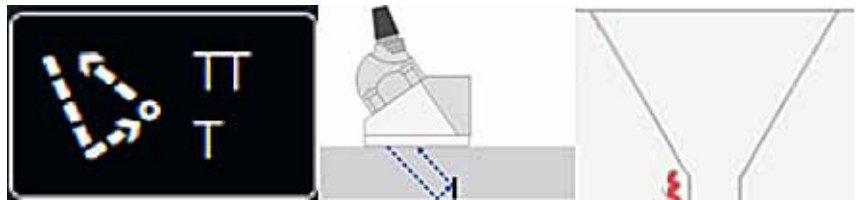


Figura 16. Tipo de onda elegida y fisura por localizar en la zona del talón de la soldadura.

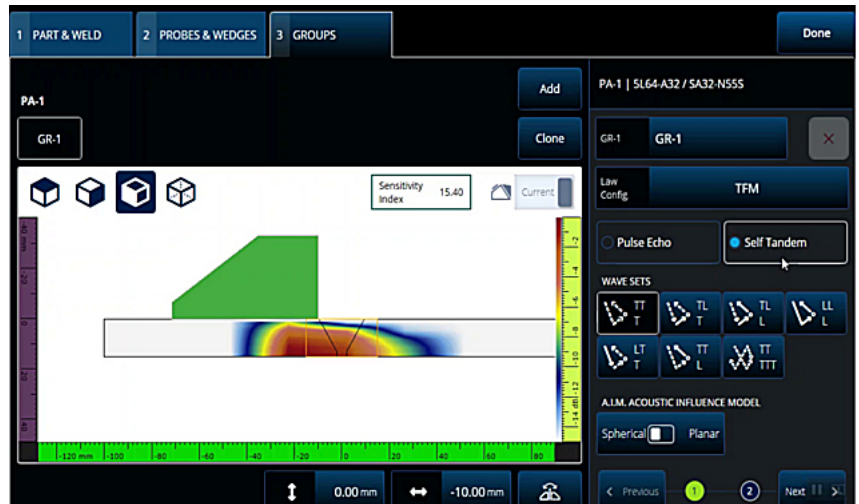


Figura 17. Plan de escaneo concentrando el haz en la zona del talón de la soldadura.

En la figura 17 puede verse cómo se configuró el plan de escaneo, gracias al Mapa de Influencia Acústica (AIM), para localizar este tipo de fisuras. En función de esto, se observa el resultado obtenido por TFM en las figuras 18 y 19, se observa cómo se detectaría esta misma fisura por *Phased Array*.

En la figura 18 se puede ver la fisura obtenida por TFM, que tiene

una geometría prácticamente idéntica a la de la fisura real, imagen que se logra como resultado de la adquisición FMC y el procesamiento por TFM. En la figura 19 se observa la misma fisura, pero mediante *Phased Array* y, por ende, con las consecuentes diferencias en términos de la geometría y definición.

En el caso de buscar fisuras con origen en el exterior de la soldadura



Figura 18. Fisura detectada por TFM (modo de onda 3T).

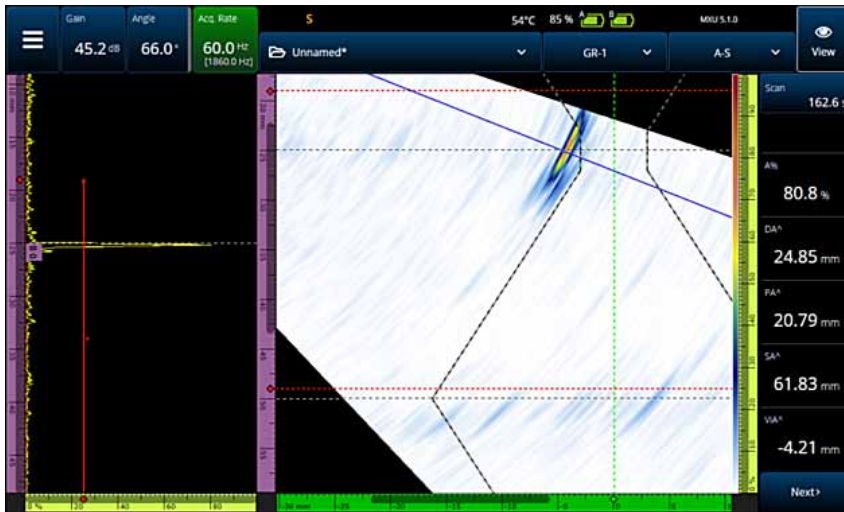


Figura 19. Misma fisura que en las figuras 16 y 18, pero detectada por *Phased Array*.

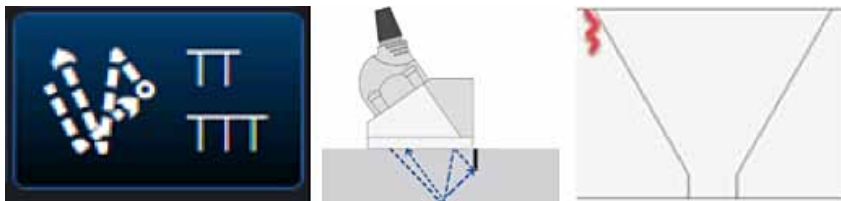


Figura 20. Tipo de onda elegida y fisura por localizar en la zona del exterior de la soldadura.

(Figura 20), si se analizan los modos de ondas disponibles, a simple vista puede notarse que el más adecuado es el del auto-tandem en las 5T. Es decir, emisión de onda transversal en paso completo, reflexión causada en el reflector, sin cambiar de onda, continuando el recorrido sónico hacia la parte superior (aquí es donde se da el rebote en la fisura), luego recorrido de la misma onda transversal hacia la parte inferior de la soldadura,

formando un paso completo, y retorno de la onda al transductor.

De manera análoga a lo observado para el ejemplo anterior (Figura 16), en la figura 21 se observa cómo se configuró el plan de escaneo, gracias al Mapa de Influencia Acústica (AIM), para localizar este tipo de fisuras. En función de esto, se observa el resultado obtenido por dos modos distintos de onda de TFM. Por un lado, se ve la geometría real del de-

fecto (Figura 22) y por el otro, una imagen más parecida a la que proporciona *Phased Array* para este tipo de fisuras (Figura 24). De hecho, se puede observar esta última analogía en la figura 23, que muestra cómo se detectaría esta fisura mediante *Phased Array*.

Si no se realizara el análisis hasta aquí efectuado acerca de los modos de onda y se decidiera inspeccionar la soldadura de la forma más similar a la que se realiza en ultrasonido convencional o incluso en *Phased Array*, se observaría la fisura como se ve en la figura 24, representada por medio de dos indicaciones (como se observa también en la figura 23 de *Phased Array*): una indicación corresponde a la reflexión del inicio de la fisura y la otra, a la del fin de la fisura.

En síntesis, en FMC/TFM una misma indicación puede ser detectada de diversas maneras. Sin embargo, si previamente se analiza y se determina, mediante el Mapa de Influencia Acústica (AIM), cuál es el mejor modo de localizarla, y luego se efectúa un adecuado trabajo en la elaboración del plan de escaneo, entonces es posible detectar defectos con su geometría real, de forma clara y precisa. Incluso es posible encontrar defectos que, por su geometría, no pueden detectarse con *Phased Array* o con ultrasonido convencional en pulso-eco, o bien analizar determinadas costuras, por ejemplo, soldadura en J con ángulos de bisel muy bajos.

Es importante destacar, una vez más, que se pueden efectuar, en un solo barrido, hasta cuatro grupos de inspección (Figura 25), cada uno con un modo distinto de ensayo. Esto facilita la inspección, ya que se reduce notablemente el tiempo del ensayo y, por ende, se aumenta la productividad y eficacia del trabajo de inspección, con lo cual se logra no solo detectar ciertos defectos de la forma más apropiada (Figuras 18 y 22), sino también analizar de forma completa la soldadura (en una sola pasada de inspección), sin tener que repetir numerosas veces el ensayo.

Recordemos que FMC/TFM puede ser utilizado tanto para la inspección de soldaduras circunferenciales como longitudinales, en forma ma-



Figura 21. Plan de escaneo concentrando el haz en la parte superior de la soldadura.



Figura 22. Fisura detectada por TFM (modo de onda 5T).

nual, con un encoder e incluso con escáner semiautomático o automático, al igual que se realiza con *Phased Array*. Sin embargo, debe tener-

se en cuenta que, debido a la gran cantidad de datos e información que procesa TFM para obtener imágenes de elevada resolución, la inspección

con escáner deberá realizarse a una velocidad menor a la que se realizaría en *Phased Array*.

Al utilizar los mismos transductores y zapatas que los que se usan en *Phased Array*, se puede aplicar FMC/TFM en superficies planas o curvas, utilizando las zapatas contorneadas que sean necesarias para cada rango de diámetros de cañerías o ductos.

Siguiendo con la analogía de estas dos técnicas, en FMC/TFM se dimensiona con el mismo razonamiento con el que se dimensiona en *Phased Array*, y se obtienen las mismas vistas de inspección (B-Scan, C-Scan, S-Scan, denominados en TFM Side, Top y End, respectivamente) (Figura 26). En otras palabras, no se pierde la información, ni/o características, a los que el *Phased Array* nos tiene acostumbrados.

Detección temprana de HTHA

Además de inspecciones en soldaduras, otras aplicaciones posibles de FMC/TFM son inspecciones de HTHA (detección temprana de agrietamiento, micro fisuras, defectos volumétricos producidos por Ataque por Hidrógeno a Alta Temperatura) (Figuras 27 y 28), inspecciones de HIC (agrietamiento inducido por hidrógeno, del tipo escalonado y tipo blíster producido por H_2S) e inspecciones de corrosión interna (generalizadas, pitting, etc.).

Si bien todas estas aplicaciones pueden ser cubiertas por *Phased Array*, con FMC/TFM se obtiene una resolución notablemente mejor en estos tipos de casos. En lo que respecta a resolución, TFM está dise-

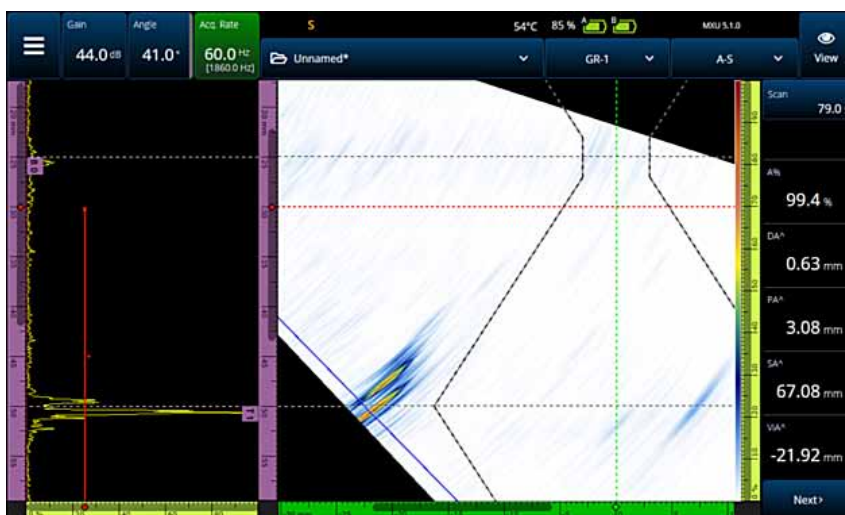


Figura 23. Misma fisura que en las figuras 20 y 22, pero detectada por *Phased Array*.

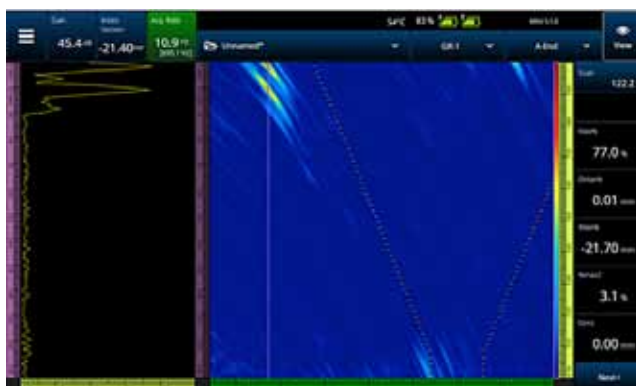


Figura 24. Misma fisura que en las figuras 20, 22 y 23, pero detectada por TFM con el modo de onda 4T.

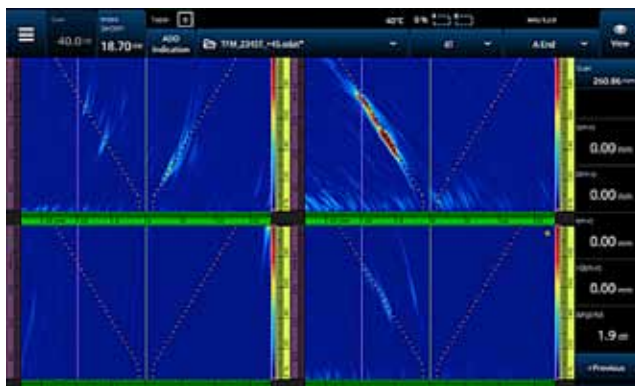


Figura 25. Inspección multigrupo de soldaduras con cuatro modos distintos.

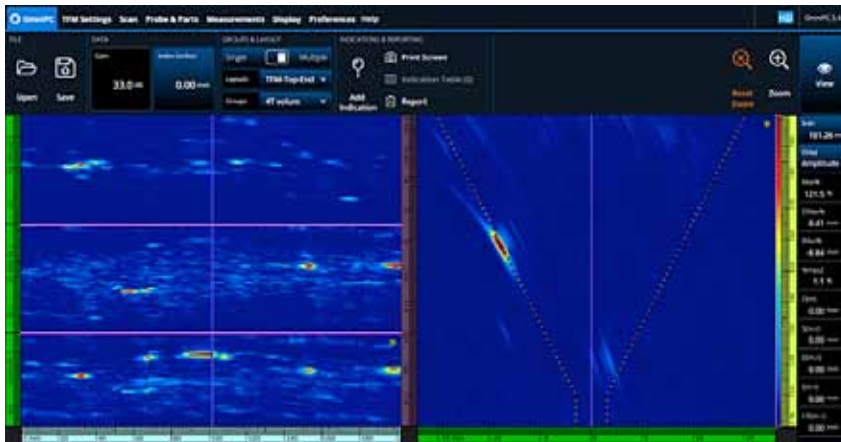


Figura 26. Inspección multigrupo de soldadura con tres modos distintos (TT, TT-TTT y TT-TT); a la izquierda se ven las tres vistas en planta (Top) y una transversal a la derecha.

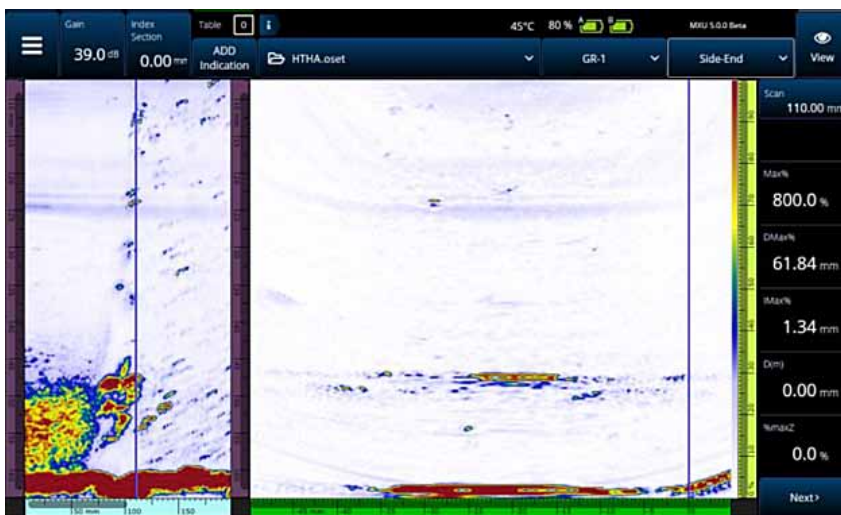


Figura 27. Ejemplo de inspección de HTHA (High Temperature Hydrogen Attack).

ñado para enfocar en todas partes (siempre que la configuración del transductor y la zona por inspec-

cionar permitan enfocar dentro del campo cercano), lo cual no era posible con los equipos industriales y

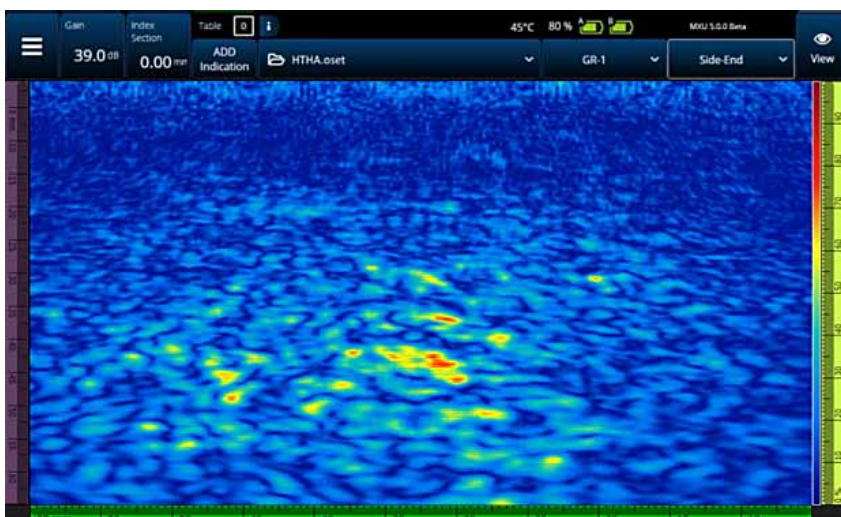


Figura 28. Ejemplo de inspección de HTHA (High Temperature Hydrogen Attack).

portátiles de *Phased Array*, como se señaló más arriba, ya que el tipo de focalización no se daba en todas partes. Más allá de la región de campo cercano, los parámetros de focalización tienen poco o ningún efecto sobre los resultados, tanto en *Phased Array* como en TFM.

Resolución cercana a la superficie en un caso real con *Phased Array* y FMC/TFM

En términos de la resolución cercana a la superficie, TFM logra mejores resultados que *Phased Array* (en pulso-eco) cuando se trata de reducir los ecos cercanos a la superficie en una inspección de 0° , debido a la secuencia de pulsado que se realiza en FMC pulsando de a un elemento a la vez, mientras que en *Phased Array* se genera un frente de ondas a partir de una apertura determinada de elementos en el transductor. De todas formas, en *Phased Array* la resolución cercana a la superficie se logra mejorar con el diseño y la utilización de transductores de tipo dual. Esto último lo podemos comprobar gráficamente en los ejemplos de las figuras 30 y 31, donde se inspecciona a 0° la pieza de la figura 29.

Conclusiones

La correcta elaboración de un plan de escaneo es clave para la obtención de los resultados deseados en la posterior inspección. En este sentido, una variable fundamental también es la capacitación, al igual que para toda técnica o método de Ensayos No Destructivos, una adecuada formación en FMC/TFM es un factor de suma importancia para llevar a cabo estas inspecciones del modo adecuado. Todos estos aspectos son relevantes a la hora de facilitar el trabajo de inspectores de campo y el del personal de integridad.

Cabe preguntarse si existe una técnica mejor o superior respecto de otras. La respuesta es negativa. Es recomendable analizar, en función de la aplicación, qué técnica resulta más conveniente. Incluso, muchas veces conviene complementar las inspecciones entre técnicas; en este

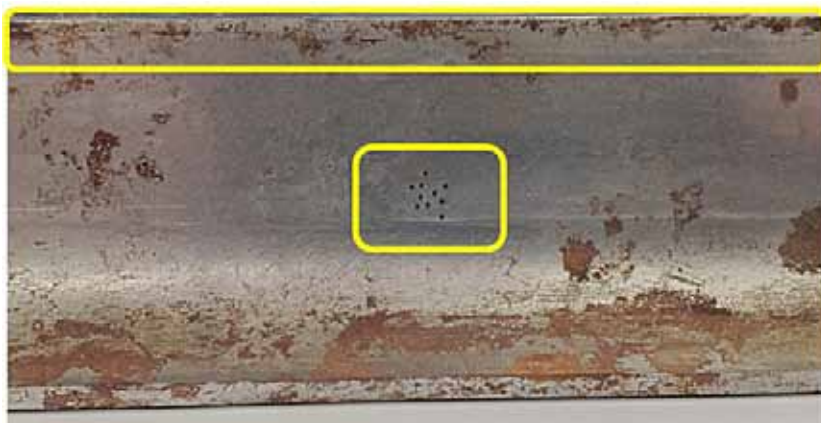


Figura 29. Pieza por inspeccionar con agujeros dispersos (utilizando 0° y ondas longitudinales).

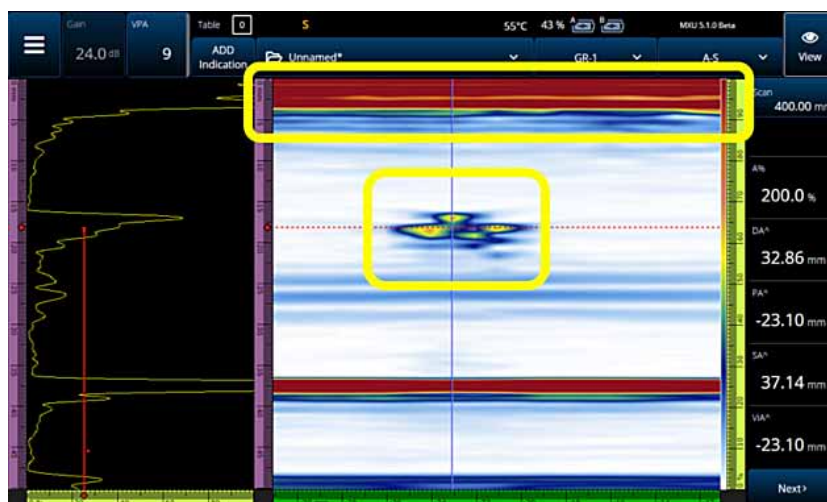


Figura 30. Resolución cercana a la superficie y de los agujeros por medio de *Phased Array*.

sentido, no solo nos referimos al conocido complemento de métodos que, en el ámbito de los Ensayos

No Destructivos, se suelen utilizar para inspeccionar superficial y volumétricamente una determinada

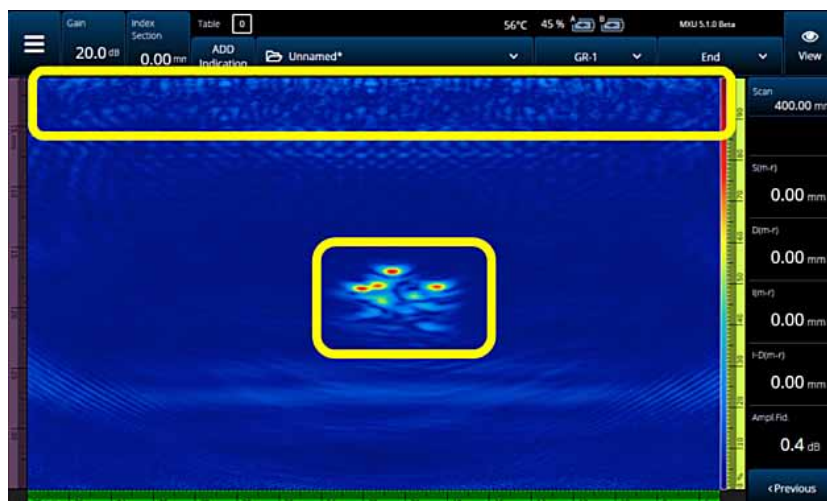


Figura 31. Resolución cercana a la superficie y de los agujeros por medio de FMC/TFM.

pieza, sino que nos referimos a complementar el uso de *Phased Array* con FMC/TFM. Hay aplicaciones en donde FMC/TFM no resulta útil o, en todo caso, su utilización no es eficiente o correcta, como en los casos en que la zona de interés quede fuera del campo cercano del transductor, que es donde se puede enfocar. Por ejemplo, esto es lo que sucede en el control de ejes de ferrocarriles en toda su longitud. Esta aplicación, en cambio, se puede realizar satisfactoriamente con *Phased Array*.

Por eso, contar con un equipo de inspección que posea las técnicas de *Phased Array* y FMC/TFM habilitadas completamente de serie es más que relevante. Recordemos que, para poder realizar FMC/TFM, se utilizan los mismos accesorios que en *Phased Array* (transductores, zapatas, escáneres). Contar con un equipo, como el OmniScan X3, que permita utilizar una u otra técnica, con la posibilidad de cambiar rápidamente entre ellas, proporciona una gran versatilidad para cubrir una variada gama de aplicaciones y, por lo tanto, de servicios.

Bibliografía

1. Comité ASME. ASME BPVC.V Article 4 Mandatory Appendix XI Full Matrix Capture. ASME, 2019.
2. OLYMPUS. Advances in *Phased Array* ultrasonic technology applications. Olympus, 2017.
3. OLYMPUS NDT INC. *Phased Array* Testing. Basic Theory for Industrial Applications. Olympus NDT, 2012.
3. Olympus. Understanding FMC and TFM Technologies. Olympus document number 920-207B_EN. EE. UU. Olympus 2020.
4. Olympus Houston. Comunicación personal.
5. Olympus. OmniScan X3: OmniScan MXU Software. User's Manual. Software Version 5.0.0. Olympus document Number: 10-001244-01EN, Rev. 2, Canadá, September 2020.