

Inspección volumétrica in situ de uniones a tope y por electrofusión en tubos de polietileno

Dr. Mike Troughton and Dr. Fredrik Hagglund, TWI Ltd, UK

RESUMEN

Muchos de los defectos que aparecen en las uniones, cuando las soldaduras de tubos de polietileno se realizan en campo, tales como presencia de polvo, grasa, suciedad, huellas dactilares o soldaduras en frío no pueden ser detectados simplemente mediante una inspección visual de la unión. Para detectar estos tipos de defectos, se requiere una técnica de inspección volumétrica.

En este artículo se describe un nuevo sistema de inspección por ultrasonidos phased array y los correspondientes procedimientos que se han desarrollado específicamente para la inspección in situ de las soldaduras a tope y por electrofusión en tubos de polietileno. Asimismo, se describen varios casos en los que se ha empleado este sistema, tanto en campo como en fabricación, y el trabajo actual para desarrollar normas internacionales sobre la inspección volumétrica de las uniones de tuberías de polietileno

Palabras clave: Polietileno, tubería, soldadura a tope, electrofusión, END, inspección, defectos

1 Introducción

Las tuberías de polietileno (PE) ofrecen ventajas significativas sobre otros materiales como hierro fundido, acero, cobre y hormigón para el transporte de fluidos. No se corroen y tienen una estimación de vida en servicio mayor, lo que supone una necesidad de sustitución menos frecuente, tienen un coste de instalación menor debido a su peso ligero y flexibilidad, y tasas de fugas significativamente menores ya que es un sistema totalmente soldado. Sin embargo, su uso en entornos críticos de seguridad, como son las tuberías de toma de agua de enfriamiento de las centrales nucleares, está siendo restringido ante la falta de un método probado y fiable de ensayos no destructivos (NDT) para las uniones soldadas.

El método actual para asegurar la calidad de las uniones realizadas tanto por soldadura a tope (BF) como electrofusión (EF) en tuberías de PE durante la instalación consiste en el registro de los parámetros de soldadura empleados, junto con una inspección visual de la unión soldada y un ensayo de presión hidrostática a corto plazo, que se complementa con un ensayo destructivo muestral de las uniones. Sin embargo, la inspección visual sólo permite examinar la superficie externa de la unión; no es posible tener evidencia de defectos incrustados o soldaduras en frío. Además, los trabajos previos realizados en TWI [1,2] han apuntado que en la prueba de presión hidrostática sólo fallarán aquellas uniones BF y EF que contengan defectos macroscópicos. Además, si existe un defecto en una unión soldada, sólo hay una pequeña posibilidad de que se incluya en la muestra que se corta para los ensayos mecánicos. Finalmente, probar mecánicamente una unión y luego reemplazarla por una de calidad desconocida no garantiza la integridad de la tubería.

Un ensayo no destructivo (END) de tipo volumétrico puede proporcionar un análisis completo de toda la unión sin necesidad de destruir aquellas que son conformes. Por lo tanto, es el único método que tiene el potencial de asegurar la integridad de las soldaduras en una tubería de PE. Sin embargo, para conseguir esto, ha de probarse la técnica de END para detectar todos los tipos de defectos posibles, que reducirían la integridad de la unión.

2 Defectos potenciales para las uniones por soldadura a tope y electrofusión en tubos de PE

Puesto que las tuberías de PE se instalan normalmente en campo, existe un número significativo de potenciales defectos en las uniones soldadas. Se enumeran a continuación estos posibles fallos:

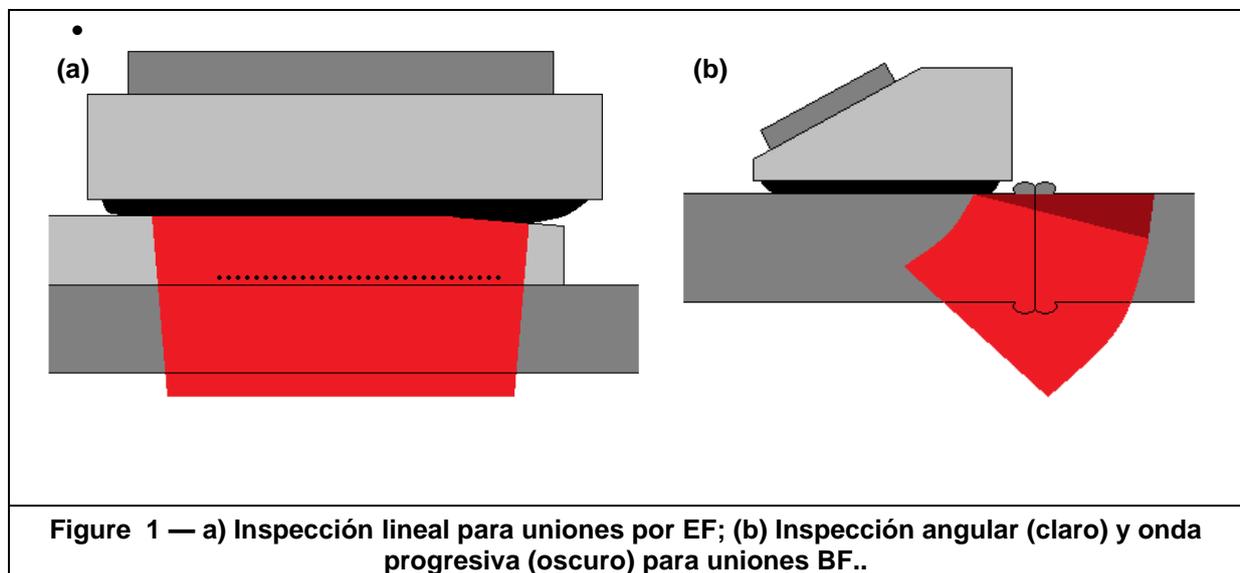
- **Desalineación de las uniones:** el desalineamiento axial de las tuberías en una soldadura BF puede ser causado bien por una sujeción incorrecta en la soldadura, o por la forma ovalada de la tubería. Si las tuberías no se sujetan durante el proceso de soldadura, puede producirse una

desalineación angular en las soldaduras por EF. Afortunadamente, ambas imperfecciones pueden ser detectadas en un examen visual de la unión.

- Mala preparación de la tubería: en las soldaduras BF, un planteamiento incorrecto podría dar lugar a un escalón en el extremo de la tubería, lo que generaría un cordón de soldadura irregular. Esto, nuevamente, puede detectarse mediante un examen visual. En las soldaduras por EF, puede detectarse mediante un examen visual, si la superficie de la tubería no se ha raspado antes de insertarla en el accesorio. Sin embargo, si la preparación se ha llevado a cabo pobremente, dejando áreas sin raspar, no sería posible detectarlo mediante un examen visual de la unión terminada.
- Defectos planos: estos tipos de defectos pueden aparecer en las uniones BF y por EF. Pueden ser causados por huellas dactilares, por ejemplo, al tocar accidentalmente los extremos de la tubería mientras se retira la viruta tras el corte durante el proceso BF o al tocar la superficie del tubo raspado durante el proceso de EF; sudor que cae sobre las superficies a soldar; o gotas de lluvia, si la operación de soldadura no está protegida de la intemperie. Estos tipos de defectos no pueden ser detectados por examen visual.
- Partículas: en ambientes secos y ventosos, el polvo que es transportado por el aire o la arena fina son atraídos por la superficie de los tubos de PE. En la soldadura BF, puede llegar a los extremos de la tubería fundida durante la fase de eliminación de la placa del calentador y también puede llegar a la propia placa calentadora. En la soldadura por EF, la suciedad puede llegar a la superficie de la tubería raspada antes de que la tubería se inserte en la conexión, especialmente en zonas húmedas y fangosas. Nuevamente, estos tipos o defectos no pueden ser detectados por examen visual.
- Penetración insuficiente de la tubería: en las uniones por EF, si las tuberías no se sujetan durante la soldadura, pueden moverse debido a cargas axiales, lo que significa que no están completamente insertadas en la conexión. Este tipo de defectos sólo pueden detectarse mediante un examen visual si el extremo de la unión por EF está marcado en los tubos antes de la soldadura.
- Soldaduras en frío: se deben a una fusión incompleta o parcial causada por una penetración inadecuada de la cadena molecular y co-cristalización en la interfase, lo que resulta en un modo de fallo frágil cuando se somete a una prueba mecánica a corto plazo. Las soldaduras en frío pueden ocurrir en uniones BF si la operación de soldadura se lleva a cabo en condiciones de frío y viento sin una protección adecuada de la operación de soldadura y puede ocurrir en uniones por EF si hay un espacio excesivo entre el tubo y la conexión debido, por ejemplo, a la forma ovalada de la tubería o a una finalización prematura del ciclo de calentamiento.

3 Desarrollo de técnicas de ensayo por ultrasonidos phased array para tubos de PE

Los tipos de uniones BF y EF requieren técnicas de inspección muy diferentes. Las técnicas utilizadas se muestran en la Figura 1.



La técnica de inspección para las uniones por EF se realiza de forma lineal a 0 grados, centrándose en la zona de fusión entre el accesorio y la tubería; Véase la figura 1 (a). Los factores más críticos para la inspección de las uniones por EF son el alcance y la resolución. La zona de fusión está normalmente situada por debajo del elemento calefactor y se requiere una resolución suficiente para la inspección entre las vueltas de alambre. Generalmente, la resolución aumenta a medida que aumenta la frecuencia. Sin embargo, el PE es un material altamente atenuante y la atenuación aumenta a su vez a medida que la frecuencia es mayor [3]. Por lo tanto, la frecuencia debe ser baja para que con los accesorios más grandes y gruesos se consiga una distancia suficiente de propagación del sonido. Afortunadamente, en los accesorios EF más grandes, el diámetro y espaciado del alambre son generalmente mayores, de forma que la resolución es suficiente. Para tubos más pequeños, tanto el diámetro del cable como la separación son menores, por lo que se requiere una sonda con una frecuencia más alta para poder inspeccionar la zona de fusión.

Para la inspección de uniones BF se emplean dos técnicas diferentes; pulso-eco angular y ondas progresivas; Véase la figura 1 (b). Las técnicas son complementarias en términos de alcance. La técnica de pulso-eco sectorial utiliza todos los elementos del palpador array para crear una apertura, barriendo el haz en un rango de ángulos que permita cubrir la mayor parte de la zona de fusión, excepto unos pocos milímetros cerca de la superficie exterior. La técnica de la onda progresiva está diseñada para cubrir la región cercana a la superficie externa, que es la parte de la soldadura no cubierta por la técnica pulso-eco angular. La configuración de la técnica de ondas progresivas utiliza un barrido con un ángulo alto, que produce ondas longitudinales que se propagan inmediatamente bajo la superficie de inspección, para detectar defectos superficiales y subsuperficiales (por ejemplo, a unos pocos milímetros de la superficie externa).

4 Desarrollo del sistema de inspección

Un sistema phased array para la inspección por ultrasonidos consta de una serie de componentes:

- Sonda phased array, que produce la señal ultrasónica y detecta las señales reflejadas por los defectos de la unión.
- Cuña de la sonda, que garantiza que los ultrasonidos se transmitan desde el palpador al tubo de PE o se ajusten al ángulo correcto y con la mínima pérdida de energía.
- Cabezal del palpador, que asegura un buen contacto entre la cuña de la sonda y el tubo de PE y un ajuste alrededor de toda la circunferencia de la unión.
- Un escáner, que mueve la sonda alrededor de la unión del tubo sin ningún movimiento en la dirección axial y registra su posición circunferencial.
- Un detector de defectos, que envía señales eléctricas a los elementos de la sonda y analiza las señales de retorno.

4.1 Sondass Phased Array

Como se mencionó anteriormente, el PE es un material altamente atenuante para los ultrasonidos y por lo tanto las sondas tienen que ser diseñadas específicamente para este material. Se encontró que, para inspeccionar uniones BF y por EF de diámetros entre 90mm y 800mm, se requiere un mínimo de cuatro sondas diferentes (Tabla 1).

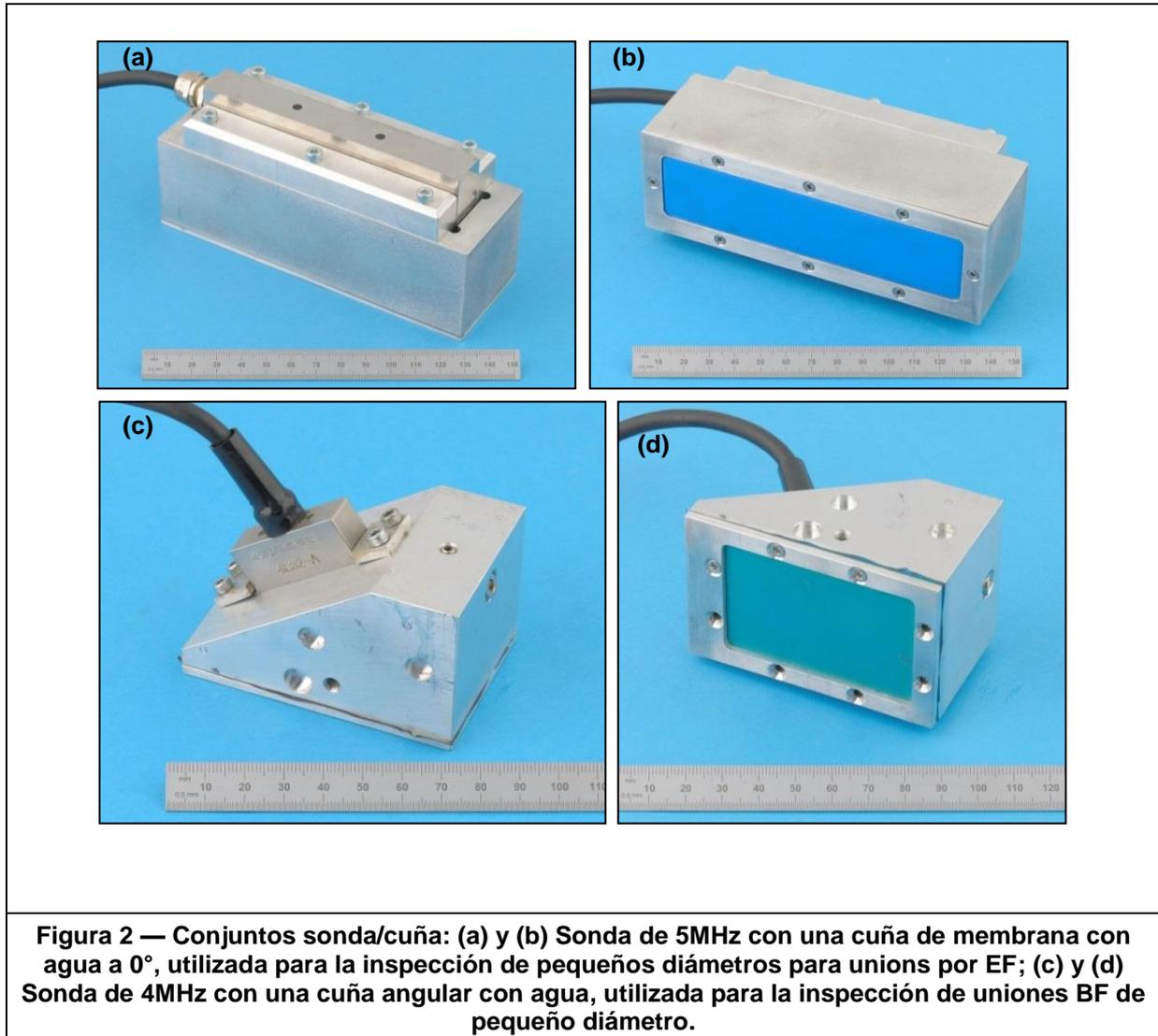
Tabla 1 — Propiedades de las sondas

Unión	Tamaño de la sonda	Frecuencia, MHz	Nº de elementos
BF	Pequeña	4	32
	Grande	2	64
EF	Pequeña	5	128
	Grande	3.5	128

4.2 Suelas para las sondas

Para realizar la inspección en tubos de plástico, se han diseñado y fabricado nuevas suelas de membrana con agua. Las ventajas de utilizar una cuña de agua son su baja atenuación y una

velocidad que permite dirigir haces angulares. Algunos de los montajes de sonda cuña se muestran en la Figura 2.



Para las soldaduras BF, el ángulo de las cuñas se optimizó para minimizar el ajuste electrónico de los elementos de la sonda. Para las soldaduras por EF se requieren cuñas de 0°. La membrana es un material flexible que se adapta a la tubería y las superficies de ajuste, y contiene el agua en la cuña.

4.3 Sistema de barrido y cabezales de las sondas

El sistema de barrido, específicamente diseñado y fabricado para inspeccionar uniones en tuberías de PE, es flexible y adaptable a los diferentes tipos de unión y tamaños. Comprende una placa principal que se mantiene en posición alrededor de la tubería mediante varios eslabones y un mecanismo de ajuste (Figura 3). La placa principal contiene el encoder, que registra la posición circunferencial alrededor de la unión, y también el soporte para los cabezales de las sondas. Los conjuntos de sonda / cuña para las dos configuraciones de unión utilizan el mismo cabezal, para todos los diámetros de tubería por encima de 90 mm.

4.4 Detector de defectos

Los ensayos por ultrasonidos PA utilizan controladores array que contienen hardware y software para realizar las inspecciones. Para el despliegue in situ, están disponibles una serie de sistemas portátiles. Los requisitos básicos para un detector de defectos adecuado para inspeccionar las uniones de tubería PE es un instrumento que contiene transductores phased array de 128 elementos, pudiendo dirigir 32 elementos al mismo tiempo.

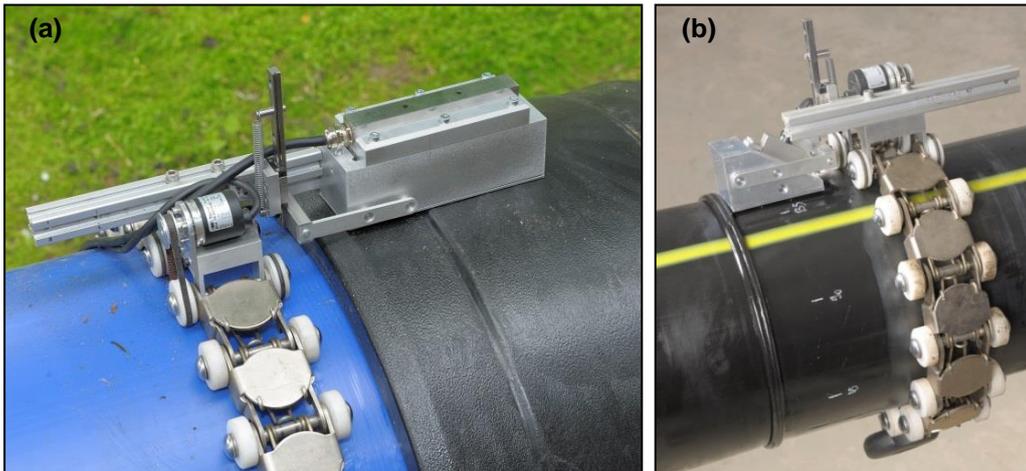


Figure 3 — El Sistema de barrido: (a) para uniones por EF; (b) para uniones BF.

5 Valoración del Sistema de inspección

5.1 En laboratorio

Para que el sistema de inspección sea aplicable a la industria, éste debe ser capaz de detectar todos los tipos de defectos relevantes. Por esta razón, el sistema y los procedimientos asociados han sido evaluados en laboratorio en más de 200 soldaduras de tuberías de PE, con diámetros entre 180 y 710 mm, con defectos artificiales. Se emplearon defectos artificiales ya que, para definir los límites de detección de la técnica de NDT y determinar el tamaño crítico o la concentración de defectos que reducen la integridad de la unión, es necesario conocer la ubicación exacta, el tamaño y la cantidad de cada tipo de defecto.

Los defectos artificiales utilizados fueron:

- Discos de aluminio de 25 μ m de espesor para simular defectos panos discretos. Trabajos previos desarrollados en TWI han demostrado que, en lo que respecta a NDT por ultrasonidos, los discos metálicos de poco espesor son una buena simulación de la falta real de fusión en las uniones de tuberías de PE [4].
- Talco micrométrico, con tamaño de partícula <45 μ m, para simular partículas finas.
- Arena de sílice, con tamaño de partícula entre 150-300 μ m, para simular partículas gruesas.

Las figuras 4 y 5 muestran imágenes ultrasónicas de una unión por EF de 225 mm que contiene un disco de aluminio de 2 mm de diámetro y donde el tubo no ha sido completamente insertado en el acoplador (introducción insuficiente de la tubería), respectivamente. Ambos tipos de defectos pueden ser claramente detectados.

La figura 6 muestra las imágenes de una unión por EF estándar de 450 mm y una soldadura en frío, donde el tiempo de calentamiento se redujo al 50% del valor recomendado por el fabricante. Se ha demostrado que la línea de indicación por encima de los hilos de calentamiento es el límite de la zona de fusión en el accesorio para EF [5]. Por lo tanto, la distancia entre la indicación del límite de la zona de fusión y las indicaciones del hilo de calentamiento puede utilizarse para detectar soldaduras frías [5 - 7].

La Figura 7 muestra una imagen ultrasónica de una unión por EF de 225 mm que contiene contaminación por arena y la Figura 8 muestra una imagen de pulso-eco sectorial a partir de una unión BF de 355 mm que contiene un defecto plano de 4 mm en la interfaz de fusión. Una vez más, ambos tipos de defectos pueden ser detectados.

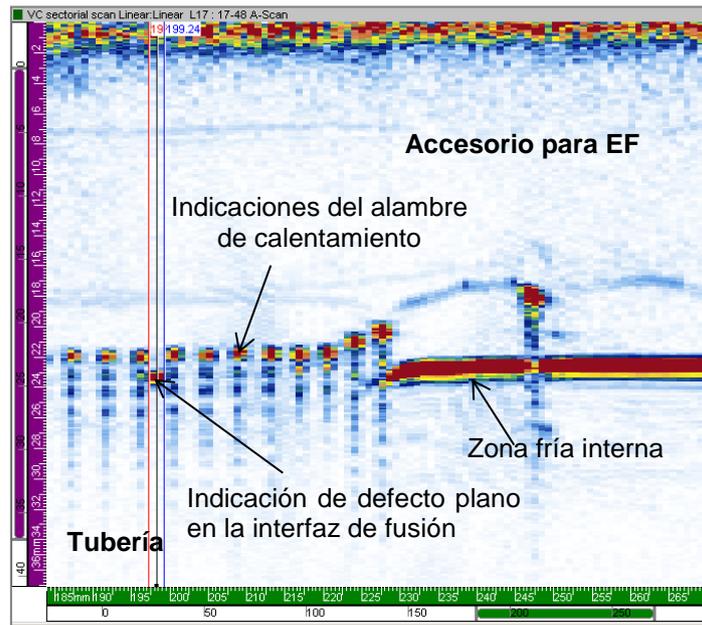


Figura 4 — Imagen ultrasónica de una soldadura por EF 225R SDR11 que contiene un disco de aluminio de 2 mm en la interfaz de fusión.

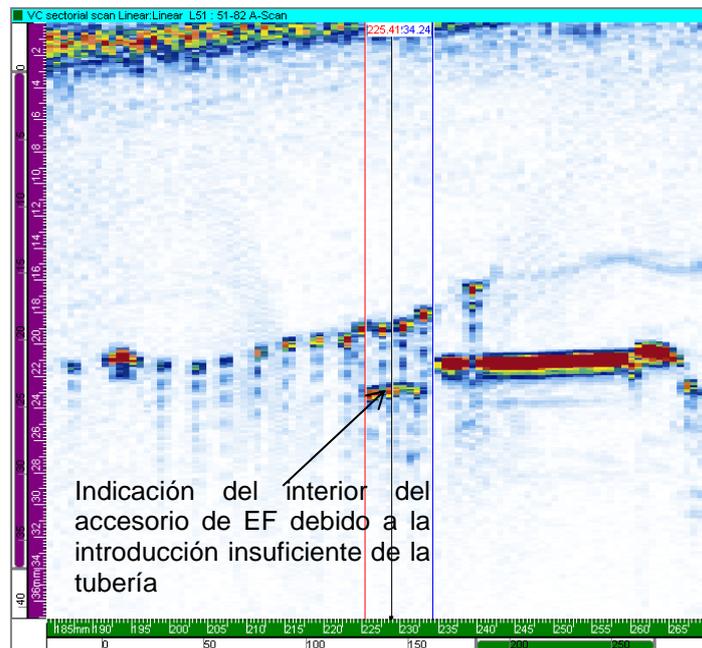


Figura 5 — Imagen ultrasónica de una soldadura por EF 225R de 225 mm con introducción insuficiente de la tubería.

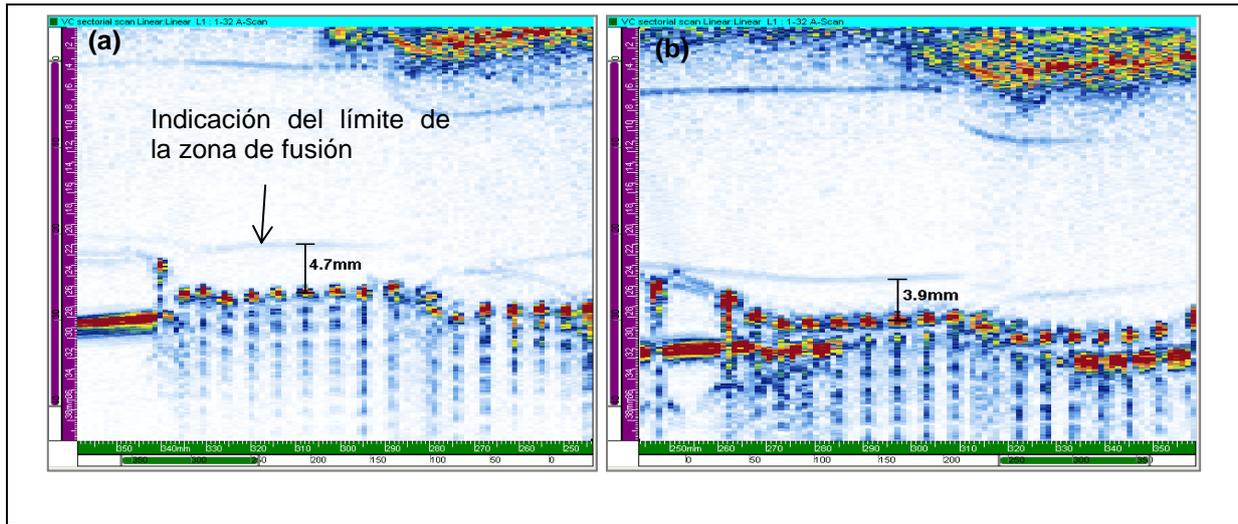


Figura 6 — Imágenes ultrasónicas de: (a) una unión por EF estándar SDR17 de 450 mm; (b) una soldadura por EF SDR17 de 450 mm donde el tiempo de calentamiento se redujo en un 50%, lo que dio como resultado una soldadura fría.

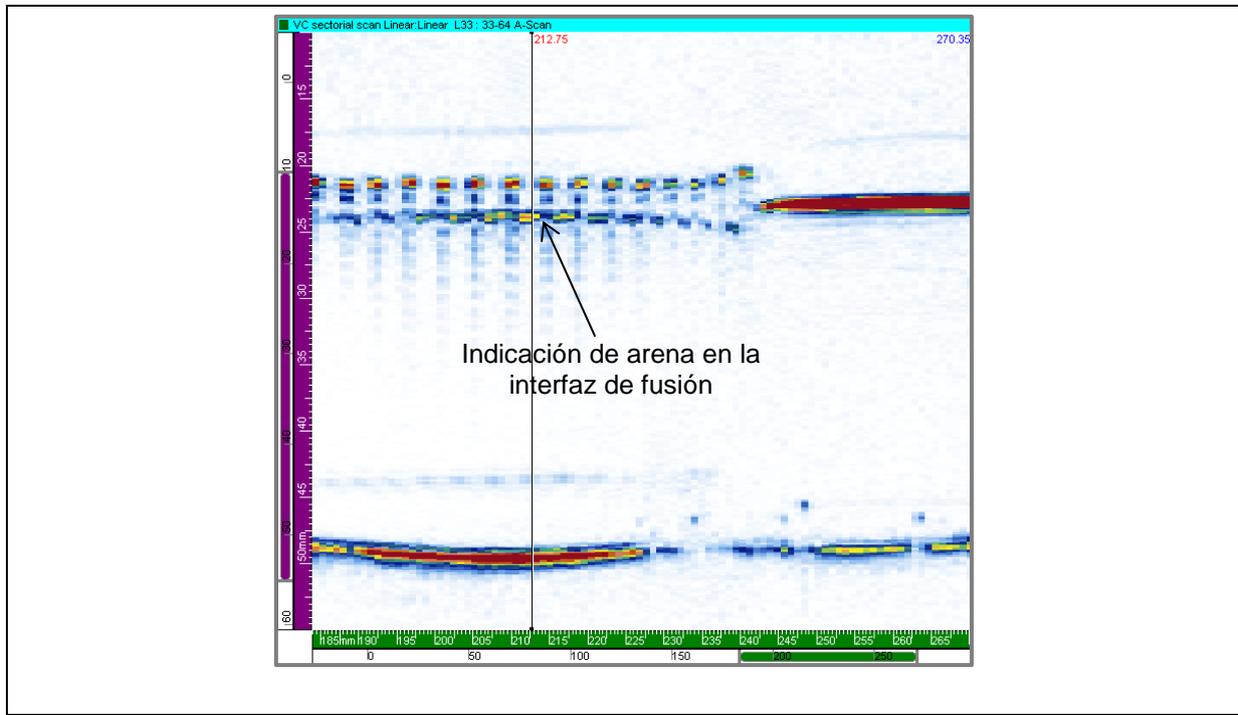


Figura 7 — Imagen ultrasónica de una unión por EF 225R SDR11 que contiene arena de sílice normalizada.

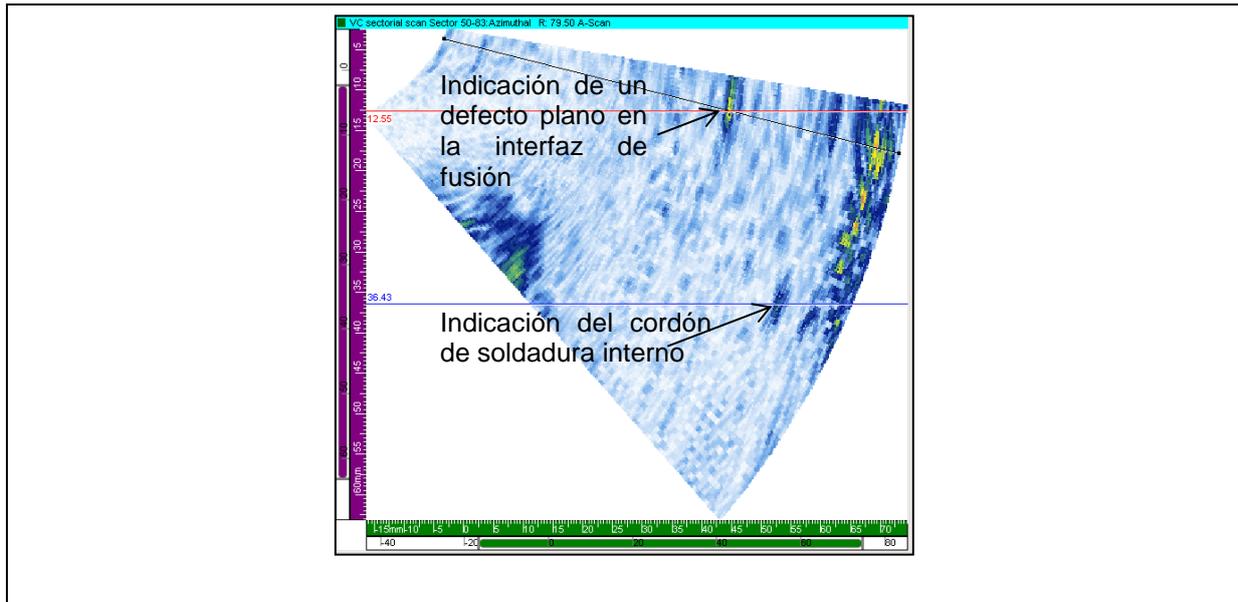


Figura 8 — Imagen ultrasónica de una unión SDR11 BF de 355 mm que contiene defecto plano de 4 mm en la interfaz de fusión.

Los resultados de los ensayos en el laboratorio mostraron que el sistema de inspección podía detectar de forma consistente los siguientes defectos, tanto en las soldaduras BF como por EF:

- Defectos planos, falta de fusión y huecos, hasta 1 mm de diámetro.
- Partículas finas y gruesas.
- Soldaduras frías.
- Introducción insuficiente de la tubería en uniones por EF.

El impacto de estos defectos tanto en el desempeño a corto y largo plazo de la unión también se evaluó mediante pruebas mecánicas, con el fin de desarrollar criterios de aceptación de defectos.

5.2 En fábrica

Una tubería de PE que iba a ser instalada en una central eléctrica del Reino Unido fue inspeccionada en la fábrica de Rotherham, Reino Unido, antes de ser entregada. Las tuberías tenían diámetros entre 450 y 630mm y espesores de pared entre 36 y 60mm. En total, se inspeccionaron 88 soldaduras BF (Figura 9).



Figura 9 — Inspección de soldaduras a tope de 630 mm en tuberías de PE en fábrica.

La figura 10 (a) muestra una imagen sectorial de la inspección alrededor de una de las tuberías donde había una indicación en la soldadura. La posición circunferencial de esta se marcó en el cortándose posteriormente la soldadura. Asimismo, la sección que contenía la soldadura se recortó en una máquina de soldadura a tope. Las virutas se analizaron para detectar cualquier imperfección

en la ubicación de la indicación. La figura 10 (b) muestra una fotografía del corte en el lugar de la indicación, poniendo de manifiesto un defecto en la unión.

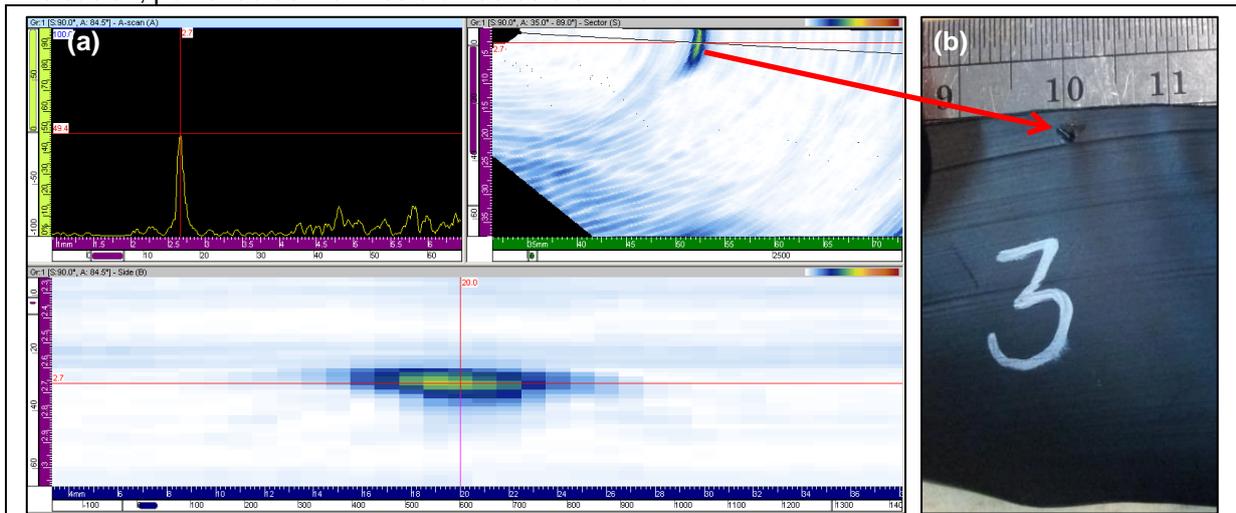


Figura 10 — (a) Imagen de la inspección sectorial de una de las soldaduras BF que indica un defecto en la unión; (b) fotografía de una sección de la soldadura en el lugar de la indicación ultrasónica..

5.3 En campo

Se han realizado inspecciones sobre el terreno en el Reino Unido y en el extranjero. La Figura 11 (a) muestra el equipo que se está utilizando para inspeccionar una unión por EF de 710 mm en el norte de Gales, para una tubería que se está instalando para una central hidroeléctrica y la Figura 11 (b) muestra una inspección en una soldadura por EF de 250 mm en un gasoducto en Sheffield, Reino Unido



Figura 11 — Inspecciones en campo: (a) Norte de Gales and (b) Sheffield, Reino Unido.

La Figura 12 muestra las posiciones de algunas de las 30 soldaduras BF y por EF que fueron inspeccionadas en el centro de la ciudad de Milán. Los diámetros de las tuberías oscilaban entre 90 y 315 mm. Una vez finalizadas las inspecciones, algunas de las uniones se cortaron y seccionaron basándose en los informes de inspección. La Figura 13 muestra una correlación típica entre la sección y la imagen ultrasónica



Figura 12 — Tuberías que fueron inspeccionadas en dos excavaciones diferentes en el centro de la ciudad de Milán..

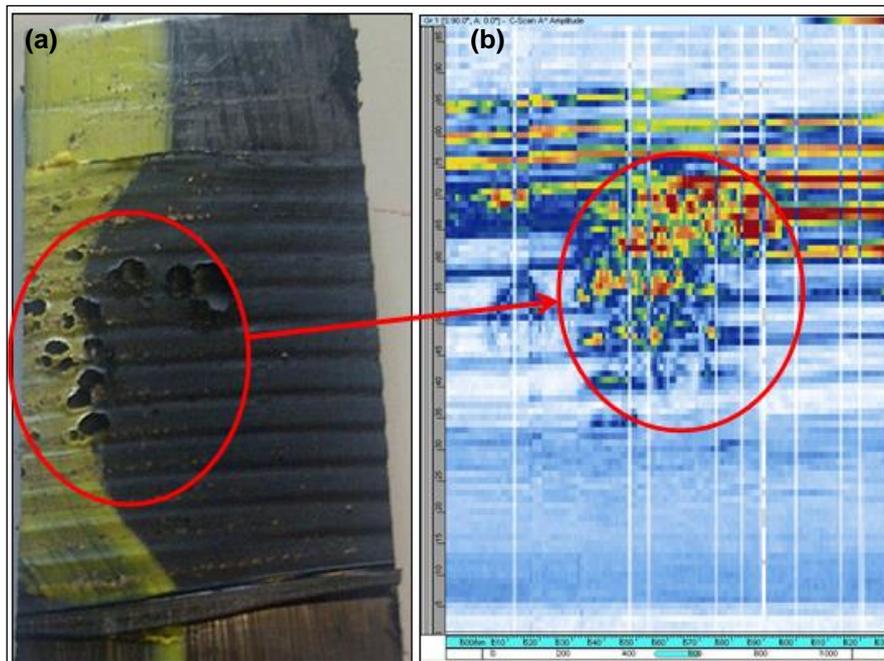


Figura 13 — (a) Fotografía de la fractura de la interfaz de una unión por EF de 315 mm; (b) Imagen C-scan de la misma área antes de seccionar.

6 Desarrollo de normas

El trabajo realizado por TWI sobre el desarrollo de técnicas de inspección phased array por ultrasonidos para tuberías de PE está siendo utilizado en dos nuevos Informes Técnicos ISO que se están desarrollando en el Grupo de Trabajo ISO / TC138 / SC5 / WG17 (Tubos de Plástico, Conexiones y Válvulas - Métodos de ensayo alternativos). En noviembre de 2014 se aprobó el proyecto de Informe Técnico ISO / DTR 16943 (Inspección de uniones por electrofusión por medio del método de ensayo por ultrasonidos phased array), y el proyecto de Informe Técnico para la inspección de las uniones de soldadura a tope utilizando phased array. El método de ensayo por

ultrasonidos está siendo revisado actualmente por el Grupo de Trabajo. Además, TWI está proporcionando información sobre el Anexo XXVI (Reglas para la construcción de tuberías de polietileno tipo 3 enterradas) en NDT de las uniones de tuberías de PE.

7 Conclusiones

Se ha desarrollado y evaluado un sistema NDT de ultrasonidos Phase Array para la inspección de las soldaduras por EF y BF en tuberías PE, con diámetros exteriores entre 90 y 800 mm y espesores de pared entre 8 y 65 mm, tanto en ensayos de laboratorio como durante in situ. Los resultados de este trabajo han demostrado que:

- Tanto las uniones por EF como las soldaduras a tope BF en tuberías de PE pueden ser inspeccionadas in situ con éxito en excavaciones o trincheras.
- Es posible tener un análisis inicial de cada unión inmediatamente después de la inspección permitiendo una retroalimentación rápida, de forma que las uniones puedan ser retiradas del servicio basándose en este análisis.
- Existe una excelente correlación entre los resultados de la inspección y las muestras seccionadas posteriormente.

References

1. C.I. Brown and M.J. Troughton, 'Qualifying long-term performance of butt fusion welds in PE pipes from short-term tests', Plastics Pipes XII Conference, Milan, Italy, 19-22 April 2004.
2. M.J. Troughton, C.I. Brown, J Hessel and M Piovano, "Comparison of long-term and short-term tests for electrofusion joints in PE pipes", Plastics Pipes XIII Conference, Washington DC, USA, 2-5 October 2006.
3. L. Mazeika, R. Sliiteris and A. Vladisaukas, 'Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples', Ultragarsas, Vol. 65(4), 2010.
4. I.J. Munns and G.A. Georgiou, 'Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes', Insight, 41(5), 1999.
5. C. Bird, D. Caravaca and A. Raude, 'The inspection of cold welds in electrofusion joints'. Plastics Pipes XIII conference, Washington DC, USA, 2-5 October 2006.
6. M. Troughton, M. Spicer and F. Hagglund, 'Development of ultrasonic phased array inspection of Polyethylene pipe joints', ASME 2012, Pressure Vessels and Piping Conference, Toronto, Canada, 15-19 July 2012.
7. J. Shi, J. Zheng, W. Guo and C. Xu, 'Safety assessment of cold welding defect in electro-fusion joint of polyethylene pipe', ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2012-78655, 2012.

Acerca de los autores

El Dr. Mike Troughton es Director Técnico de Plásticos de TWI y responsable de coordinar todas las actividades de I + D, consultoría y capacitación en el área de polímeros. Sus principales áreas de especialización incluyen la soldadura, inspección y ensayos mecánicos de tuberías PE, en las que ha escrito más de 30 trabajos técnicos. Asimismo, es el editor de Handbook of Plastics Joining – A Practical Guide. Ha gestionado más de 80 proyectos de investigación y consultoría para clientes de todo el mundo, incluidos tres proyectos financiados con fondos europeos, con un presupuesto de más de 5 millones de euros, para el desarrollo de métodos de inspección por ultrasonidos para soldaduras en tuberías de PE. Es el principal Experto del Reino Unido en el Comité Europeo de Normalización CEN / TC249 / WG16 (Soldadura de materiales termoplásticos) y fue responsable del desarrollo de las únicas normas internacionales sobre ensayos no destructivos de soldaduras en termoplásticos. Es el presidente de varios comités nacionales e internacionales sobre soldadura de plásticos y es también el experto del Reino Unido en varios comités de normas ISO, CEN, ASTM, AWS y ASME.

Dr Fredrik Hagglund tiene más de diez años de experiencia en el campo ensayos no destructivos, tecnología de la medida y ultrasonidos para la industria de las uniones. Ha publicado más de 30 trabajos de investigación y tiene una participación activa tanto escribiendo asistiendo a las reuniones de las normas ISO y ASME. Fredrik se unió al Grupo de Tecnología No Destructiva de TWI trabajando investigación, desarrollo y aplicación de tecnología ultrasónica. Durante su carrera ha desarrollado amplias habilidades en tecnología de ultrasonido, procesamiento de señales, modelado y ensayos por ultrasonidos phased array. Durante los años en TWI, Fredrik ha ganado numerosos

proyectos de colaboración, incluyendo nuevos campos de investigación en END, tales como acústica no lineal e inspección de materiales multicapa.