

DRAFT

**Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division Conference
PVP2013
July 14-18, 2013, Paris, FRANCE**

PVP2013-9709

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN ULTRASÓNICA PARA TUBERÍAS DE POLIETILENO

Malcolm Spicer

TWI Ltd
Granta Park, Great Abington, Cambridge
CB21 6AL, UK
Tel: +44 1223 899000
Email: malcolm.spicer@twi.co.uk

Mike Troughton

TWI Ltd
Granta Park, Great Abington, Cambridge
CB21 6AL, UK
Tel: +44 1223 899000
Email: mike.troughton@twi.co.uk

Fredrik Hagglund

TWI Ltd
Granta Park, Great Abington, Cambridge
CB21 6AL, UK
Tel: +44 1223 899000
Email: fredrik.hagglund@twi.co.uk

RESUMEN

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME) está desarrollando un código (N-755) para el uso de polietileno (PE) en los sistemas de tuberías enterradas las plantas de energía nuclear. Sin embargo, la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (NRC) no ha aprobado este Código debido a una serie de preocupaciones; una de las cuales es la falta de técnicas de ensayos no destructivos (END) validadas para inspeccionar uniones soldadas en tuberías de PE. Este artículo describe el desarrollo de un sistema ultrasónico phased array y los procedimientos para la inspección de uniones soldadas en tuberías de PE de diámetros entre 125 y 1000 mm. El sistema incluye hardware y software que ha sido diseñado específicamente. El sistema ha sido evaluado por varias organizaciones y se presentarán los resultados de estos ensayos. Junto con el desarrollo del sistema de inspección, se ha llevado a cabo un importante programa de trabajo para desarrollar criterios de aceptación de defectos en las soldaduras de tuberías de PE. Los tipos de defectos investigados incluyeron contaminación por partículas, defectos planos y soldaduras frías. Los tamaños críticos de defectos y los niveles de contaminación se determinaron en base a pruebas a largo y corto plazo de uniones soldadas en tuberías de PE.

INTRODUCCIÓN

Las tuberías de PE ofrecen ventajas significativas sobre otros materiales, como hierro fundido, acero y hormigón, para el transporte de fluidos como el gas natural y el agua. No se corroen, tienen una vida útil más larga, son menos costosas de instalar debido a su poco peso y flexibilidad, y tienen tasas de fuga significativamente menores debido a tener un sistema totalmente soldado. Sin embargo, su uso en entornos críticos de seguridad, como las tuberías de entrada de agua de refrigeración en centrales nucleares [1], está siendo restringido por la falta de un método END fiable y validado. Se han realizado varios estudios para desarrollar métodos de END para las uniones Butt Fusion (BF) [2-6] y Electro-Fusion (EF) [7-9]. Sin embargo, estos se han limitado a un pequeño rango de tamaños de tubería y / o no han incluido criterios de aceptación. Este documento describe el progreso en el desarrollo del sistema de inspección ultrasónica presentado por primera vez a la Conferencia PVP 2012 [10].

PROCESO DE SOLDADURA DE BUTT FUSION

La soldadura por fusión a tope, también conocida como soldadura con placa calefactora, herramienta de calentamiento, espejo o platina (Figura 1), se usa para soldar tuberías de PE de tamaños típicamente entre 50 y 2000 mm de diámetro.



FIG. 1 SOLDADURA DE TUBOS DE PE POR BF

La técnica utiliza una placa de metal caliente, conocida como placa calefactora o placa de calentamiento, para calentar y fundir los extremos de las tuberías de PE. Una vez que los extremos se funden suficientemente, se retira la placa caliente y las tuberías se juntan bajo presión para formar la soldadura.

PROCESO DE SOLDADURA POR ELECTROFUSIÓN

En la soldadura por EF, los extremos de los tubos se insertan en cualquiera de los extremos de un accesorio (Figura 2), que contiene una bobina de cable calefactor en el interior. La corriente pasa a través de la bobina, que calienta y funde el interior de los accesorios y el exterior de las tuberías, produciendo una soldadura (Figura 3).

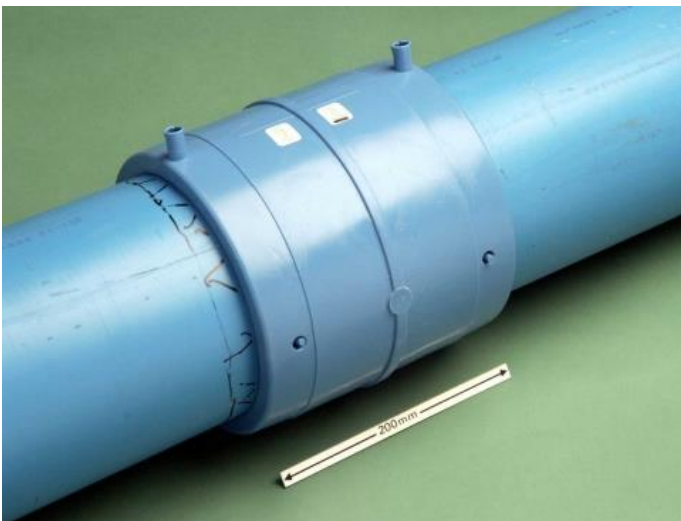


FIG. 2 UNIÓN POR ELECTROFUSIÓN



FIG. 3 SECCIÓN DE UNA UNIÓN POR EF QUE MUESTRA LA POSICIÓN DE LOS ALAMBRES DE CALENTAMIENTO

EL PROYECTO TESTPEP

El proyecto TestPEP financiado con fondos europeos involucra a 17 organizaciones de siete países europeos. Es un proyecto de tres años, que comenzó en febrero de 2010, y tiene un valor total de € 3,5M. Su objetivo es diseñar, fabricar y validar un sistema de ultrasonidos phased array que se pueda utilizar para inspeccionar uniones tubería-tubería y accesorios-tubería (codos, curvas, reductores, tes) uniones BF y EF en tuberías de PE, que son robustas y sencillas de operar. El concepto es tener un instrumento tipo caja negra, directamente conectado al escáner, con una conexión Ethernet simple para descargar los datos grabados. Paralelamente, se establecerá la importancia del tamaño y la cantidad de defectos en relación con los requisitos del servicio, lo que se logrará mediante ensayos mecánicos a largo plazo de uniones que contengan defectos conocidos, y la comparación con resultados para soldaduras que no contengan defectos.

El proyecto se ha dividido en varios paquetes de trabajo técnicos basados en las siguientes especificaciones:

- Materiales
 - PE80 y PE100
- Tamaño de las tuberías
 - 180mm SDR 17
 - 225mm SDR 11
 - 355mm SDR11
 - 450mm SDR 17
 - 710mm SDR 17
- Tipos de defectos
 - Contaminación por partículas finas (polvo)
 - Contaminación por partículas gruesas (arena, arena)
 - Defectos planos (huellas dactilares, aceite y grasa, gotas de lluvia)
 - Soldaduras frías
 - Penetración insuficiente de las tuberías en uniones por EF

- Distancia de trabajo mínima alrededor de la unión
 - 200mm

FABRICACIÓN DE UNIONES SOLDADAS

Se han realizado varias uniones soldadas que contienen simulaciones de los tipos de defectos definidos en la especificación en los materiales de PE, tipos de uniones y tamaños de tuberías también definidos en la especificación.

Dado que, tanto para la evaluación de END como para los criterios de aceptación, es necesario conocer el tamaño exacto y/o la cantidad de cada uno de los defectos, la mayoría de los defectos elegidos fueron simulaciones idealizadas de defectos reales que pueden encontrarse en el campo:

- Talco micrométrico (tamaño de partícula $<45\mu\text{m}$) - para simular la contaminación por partículas finas.
- Arena de sílice graduada (tamaño de partícula 150 - 300 μm) - para simular la contaminación por partículas gruesas.

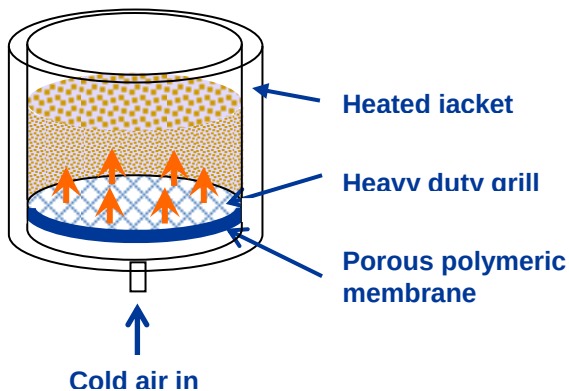


FIG. 4 DIAGRAMA DE REPRESENTACIÓN DE LA CAMA DE ARENA FLUIDIZADA



FIG. 5 CAMA DE ARENA FLUIDIZADA CALIENTE

- Discos de aluminio (25 μm de espesor, 1-50mm de diámetro) - para simular defectos planos

Se utilizaron discos de aluminio porque el trabajo previo había demostrado que, son una buena simulación de defectos placas reales para END por ultrasonidos [2]. Se han desarrollado procedimientos para insertar los defectos en las uniones por EF y BF de forma reproducible [10]. Por ejemplo, para introducir un nivel uniformemente repetible de contaminación de partículas gruesas, se ha desarrollado un lecho de arena fluidizado para depositar un nivel predeterminado de arena de sílice graduada sobre el extremo del tubo antes de la soldadura (Figuras 4 y 5).

DESARROLLO DE TÉCNICAS DE END

Las técnicas de END por ultrasonidos phased array se han desarrollado para la detección de defectos en los distintos tipos de materiales de tuberías de PE y tamaños de tuberías definidos en la especificación, incluido el diseño y la fabricación de sondas y sondas de ultrasonidos phased array a medida. Se han determinado las propiedades de los materiales de PE elegidos [10, 11], así como los métodos para superar la velocidad acústica muy lenta y la naturaleza altamente atenuante de estos materiales, que luego se incorporaron en la especificación de la sonda ultrasónica.

Además de este trabajo, se está desarrollando el software de reconocimiento de defectos y clasificación automática para permitir que el sistema de inspección proporcione una indicación de pasa/no pasa.

Para inspeccionar las uniones por EF, el desafío fue lograr una resolución lo suficientemente buena como para poder inspeccionar la zona de fusión más allá de los cables de calentamiento. Dado que la atenuación de los ultrasonidos aumenta rápidamente con la frecuencia en los materiales de PE [10], la solución más adecuada es un compromiso; la frecuencia debe ser lo suficientemente baja como para permitir que el sonido se propague a la distancia requerida pero lo suficientemente alto para lograr la resolución deseada. Esto requirió la elección cuidadosa de parámetros para la sonda phased array. La estrategia fue utilizar un barrido lineal normal focalizado en la zona de fusión (Figura 6), usando una nueva cuña de agua de cara abierta con una zona de sellado que se usa para mantener de manera efectiva el agua en la cuña (Figura 7)..

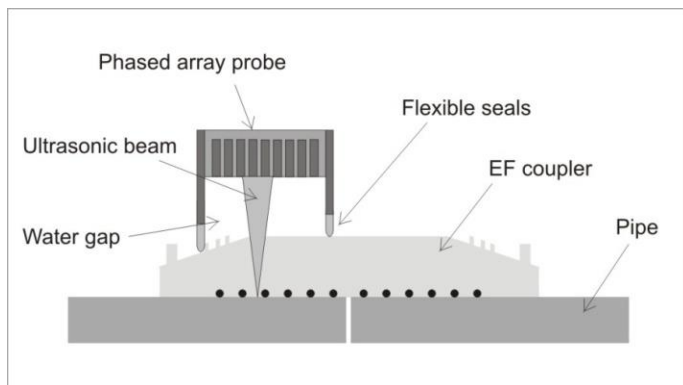


FIG. 6 ESQUEMA DE LA TÉCNICA DE INSPECCIÓN PARA UNIONES POR EF



FIG. 7 CUÑA DE AGUA A CERO GRADOS UTILIZADA PARA INSPECCIONES EN EF

Utilizando la técnica que ya se ha desarrollado en el proyecto [10], se ha inspeccionado una gama de uniones de tubería por EF que ha dado resultados alentadores.

Las figuras 8, 9 y 10 muestran una serie de imágenes de soldaduras por EF en una tubería de PE de 180 mm. La

figura 8 muestra una buena unión sin defectos discernibles. La Figura 9 muestra una unión con discos de aluminio de 8 mm y la Figura 10 muestra una unión con un disco de aluminio de 2 mm que demuestra que es fácilmente detectable una falta de fusión de al menos 2 mm de diámetro. La indicación desde el borde superior de la ZAT también es visible en la Figura 8, aunque no es tan evidente en las Figuras 9 y 10. Esta característica se puede utilizar para detectar soldaduras frías [8, 10]. Además de esto se puede ver claramente la señal de la superficie interna del tubo.

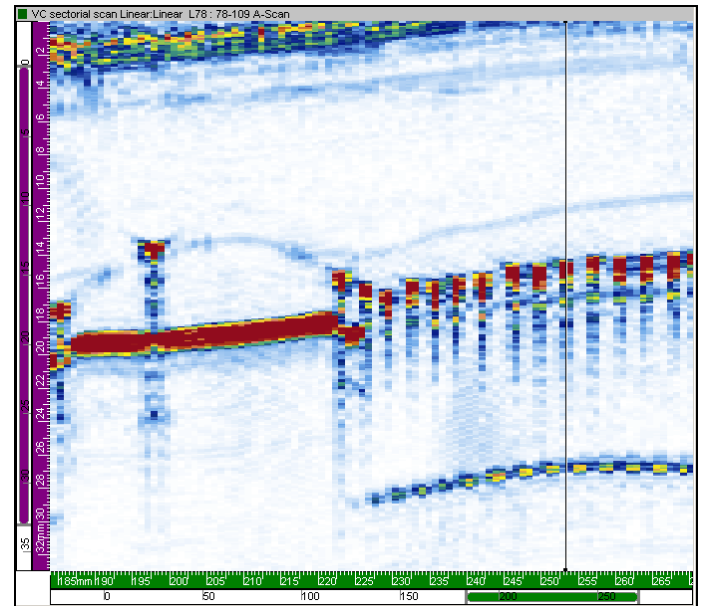


FIG. 8 PHASED ARRAY ULTRASONIC IMAGE OF 180MM EF FITTING CONTAINING NO FLAWS

Las Figuras 11 y 12 muestran una buena soldadura y una soldadura fría, respectivamente, en un tubo soldado de 450 mm por EF. Se ve la diferencia medida en la distancia de la indicación para la ZAT de los cables. También se puede ver en la Figura 12 que hay zonas de falta de fusión asociada a la interfaz.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los tamaños de uniones de tubería por EF y los tipos de defectos inspeccionados hasta la fecha

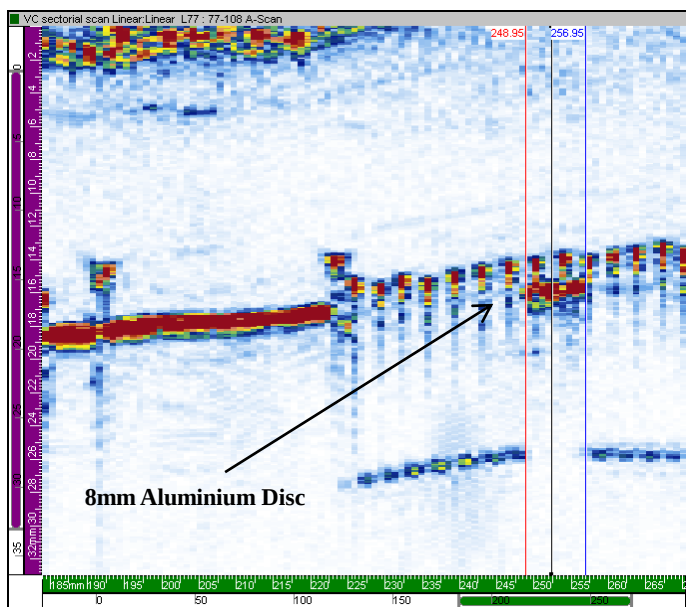


FIG. 9 IMAGEN DE UNA UNIÓN POR EF EN TUBO DE PE DE 180MM CON UN DISCO DE ALUMINIO DE 8mm

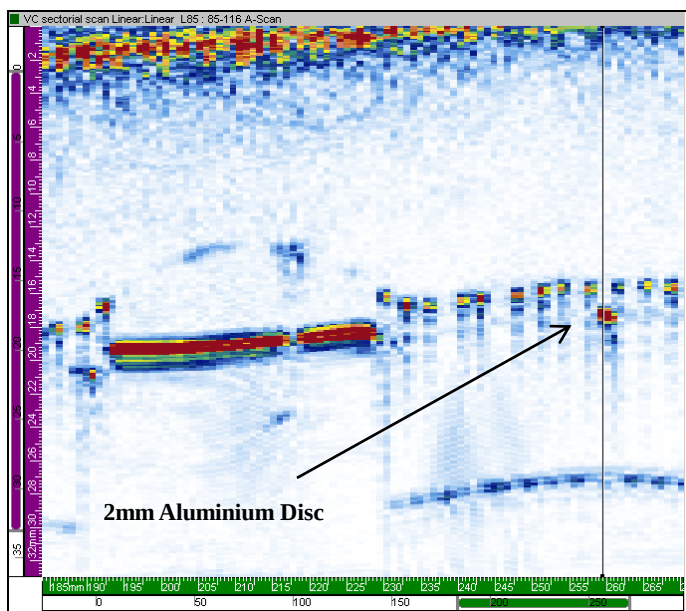


FIG. 10 IMAGEN DE UNA UNIÓN POR EF EN TUBO DE PE DE 180MM CON UN DISCO DE ALUMINIO DE 2 mm

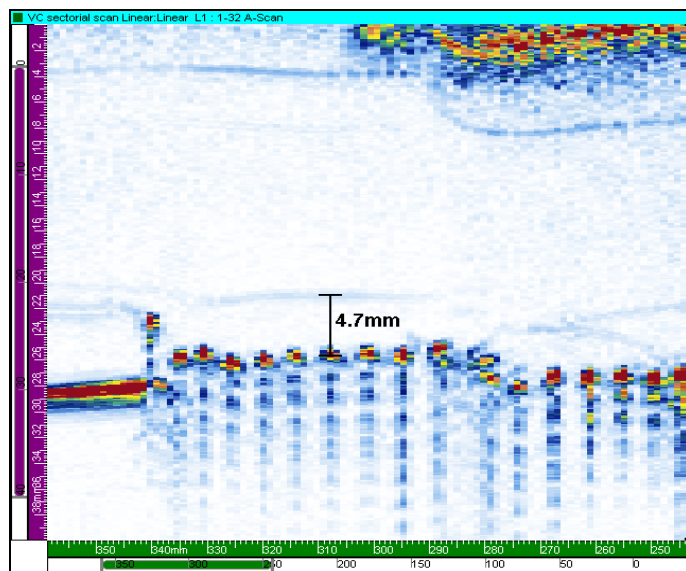


FIG. 11 IMAGEN DE UNA UNIÓN POR EF EN UNA TUBERÍA PE DE 450 MM CON BUENA FUSIÓN

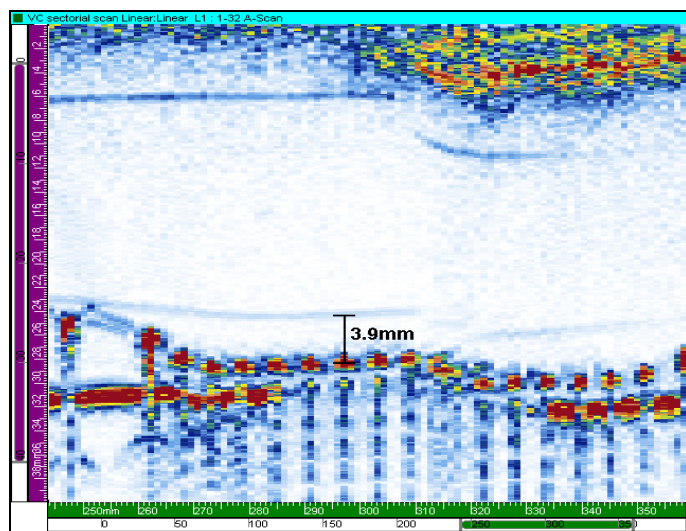


FIG. 12 IMAGEN DE UNA UNIÓN POR EF EN UNA TUBERÍA DE PE DE 450 MM CON SOLDADURA FRÍA

TABLA 1 RESUMEN DE LOS TAMAÑOS DE LAS UNIONES TUBERÍAS POR EF / TIPOS DE DEFECTOS INSPECCIONADOS

	Planos	Part. finas	Part. grues	Sold. fría	Penet. insufic
180	X			X	X
225	X			X	X
355	X			X	X
450	X			X	X

La inspección de las uniones BF requiere el uso de ultrasonidos en ángulo y se utilizó una combinación de cuatro técnicas diferentes para obtener una cobertura completa del área de soldadura: tándem, pulso-eco sectorial, onda progresiva y difracción de tiempo de vuelo (TOFD) (Figura 13).

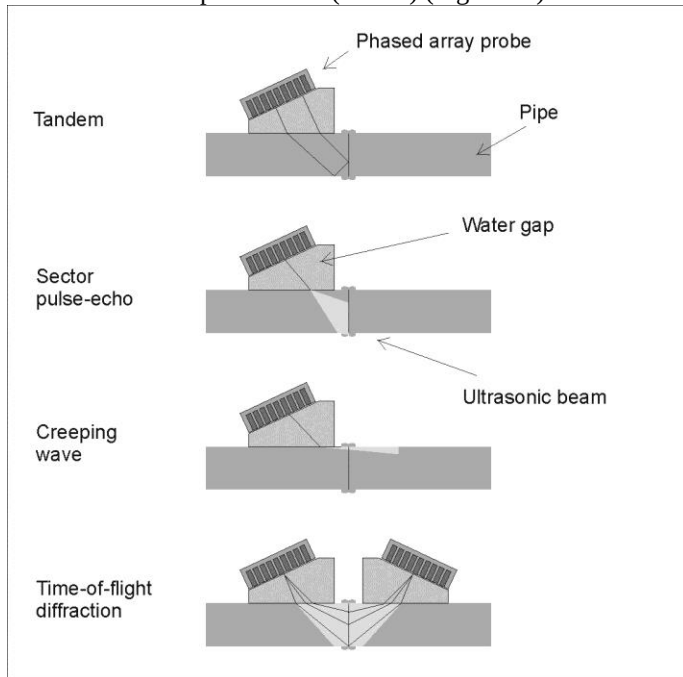


FIG. 13 TÉCNICAS DE INSPECCIÓN UTILIZADAS PARA LA INSPECCIÓN DE SOLDADURAS BF

Utilizando tres de las cuatro técnicas desarrolladas en el proyecto [10] y mostradas en la Figura 13, se ha inspeccionado una gama de uniones BF de tuberías que ha dado resultados alentadores. La técnica que aún no se ha empleado es la técnica TOFD.

Las técnicas son, en la mayoría de los casos, complementarias. La técnica de tándem utiliza la mitad de los elementos phased array para transmitir y la otra mitad para recibir. La técnica es buena para detectar defectos planos, pero la cobertura está restringida a un área más cercana a la superficie interna.

La técnica de pulso-eco sectorial utiliza todos los elementos del conjunto para crear una apertura, barriendo el haz en un rango de ángulos. La técnica proporciona una visión general de la soldadura y cubre la mayor parte de la zona de fusión, excepto unos pocos milímetros cerca de la superficie exterior.

La técnica de la onda progresiva solo cubre la región cercana a la superficie externa de la soldadura, que es la parte de la soldadura no cubierta por las dos primeras técnicas. La configuración para la técnica de onda progresiva usa un barrido sectorial de alto ángulo, que produce ondas longitudinales que

se propagan inmediatamente debajo de la superficie de inspección, para detectar defectos superficiales y sub superficiales.

La técnica TOFD cubre toda la zona de fusión y usa difracción directa para detectar defectos verticales. La configuración que se utilizará en este proyecto es una técnica de pitch-catch que utiliza dos escaneos sectoriales, donde ambas sondas utilizan una gran apertura para transmitir y recibir haces que cubren toda la soldadura.

Nuevamente, se usaron cuñas de agua de cara abierta. El ángulo de las cuñas se optimizó para minimizar la dirección electrónica de los elementos de la sonda (Figura 14). Esta figura muestra dos sondas BF en la configuración TOFD. Para las otras tres técnicas, solo se requiere una sonda.

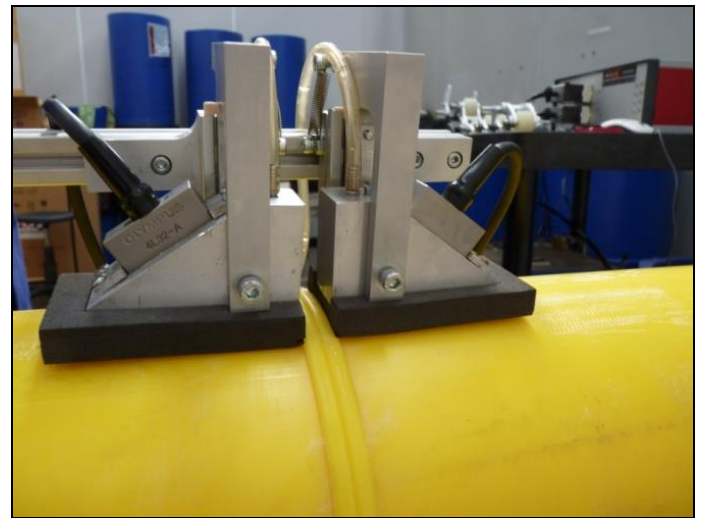


FIG. 14 CUÑAS DE AGUA UTILIZADAS PARA INSPECCIONAR SOLDADURAS BF

La técnica que muestra más prometedora al inspeccionar las uniones BF es la técnica pulso-eco sectorial. Las Figuras 15, 16 y 17 muestran una serie de imágenes de uniones BF soldadas en tuberías de PE de 355 mm. La Figura 15 muestra una buena unión sin defectos discernibles. La Figura 16 muestra una unión con un disco de aluminio de 8 mm y la Figura 17 muestra una unión con un disco de aluminio de 4 mm que demuestra que es fácilmente detectable una falta de fusión de al menos 4 mm de diámetro. Los barridos sectoriales también muestran algunas áreas no deseadas con un alto nivel de ruido. Estas son señales internas del cuerpo de la cuña de agua y se está trabajando para eliminar estas señales. La Figura 18 muestra los B-Scan combinados de un barrido de pulso-eco sectorial y un barrido en tándem en una tubería de 355 mm que contiene discos de aluminio.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los tamaños de uniones BF de tuberías y los tipos de defectos inspeccionados hasta la fecha.

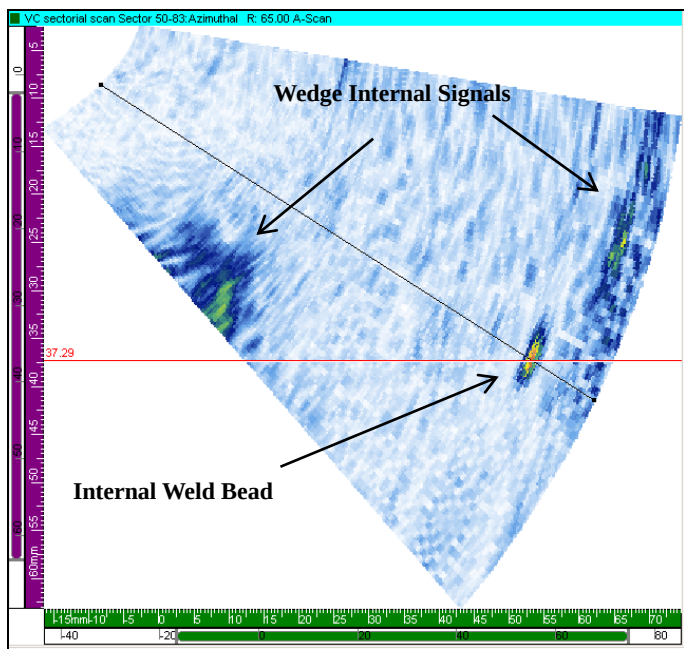


FIG. 15 IMAGEN DE UNA UNIÓN BF EN UNA TUBERÍA DE PE DE 355MM SIN DEFECTOS

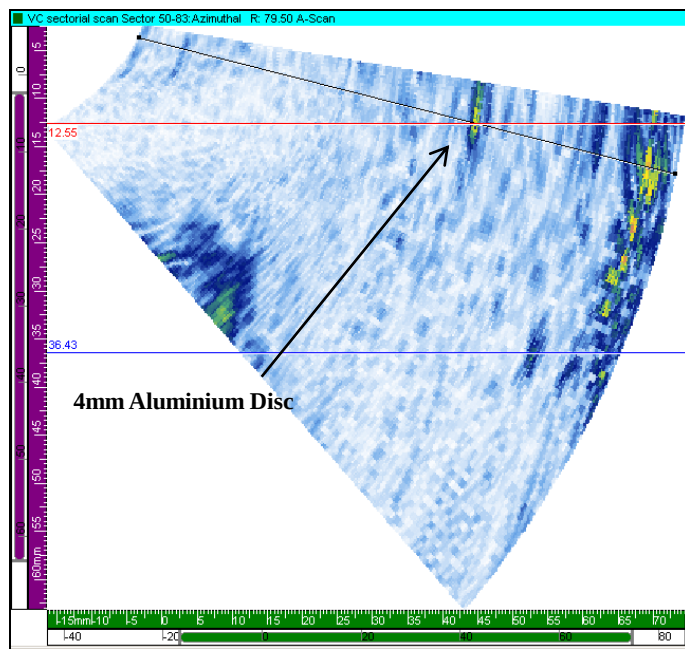


FIG. 17 IMAGEN DE UNA UNIÓN BF EN UNA TUBERÍA DE PE DE 355MM CON UN DISCO DE ALUMINIO DE 4 mm

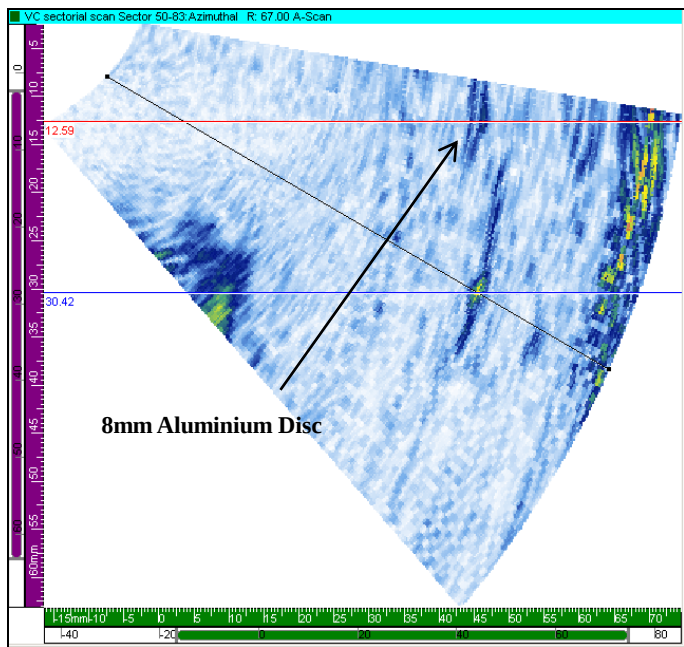


FIG. 16 IMAGEN DE UNA UNIÓN BF EN UNA TUBERÍA DE PE DE 355MM CON UN DISCO DE ALUMINIO DE 8mm

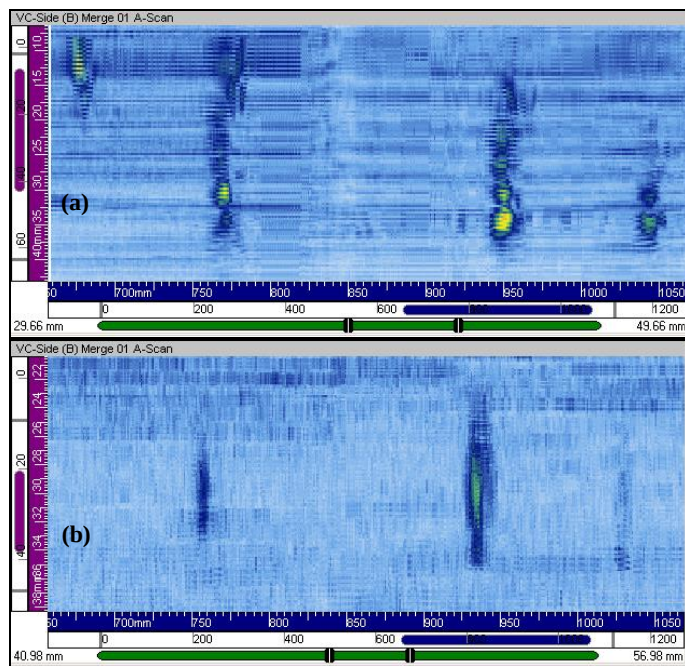


FIG. 18 B-SCAN COMPARTIDO UTILIZANDO (a) PULSO ECO SECTORIAL (b) TANDEM

TABLE 2 RESUMEN DE LOS TAMAÑOS DE LAS UNIONES BF / TIPOS DE DEFECTOS INSPECCIONADOS

	Planos	Part. fines	Part. gruesas	Soldadura fría
180		X		
225		X		
355	X	X		
450				
710	X	X		

El software de reconocimiento automático de defectos (ADR) para la inspección de soldaduras por EF ha progresado bastante. Se han dado tres pasos principales en el algoritmo:

- Detección de las zonas correspondientes a los cables de calentamiento (Figura 19)
- Determinación de la línea de cables (Figura 20)
- Determinación del mapa de los defectos (Figura 21)

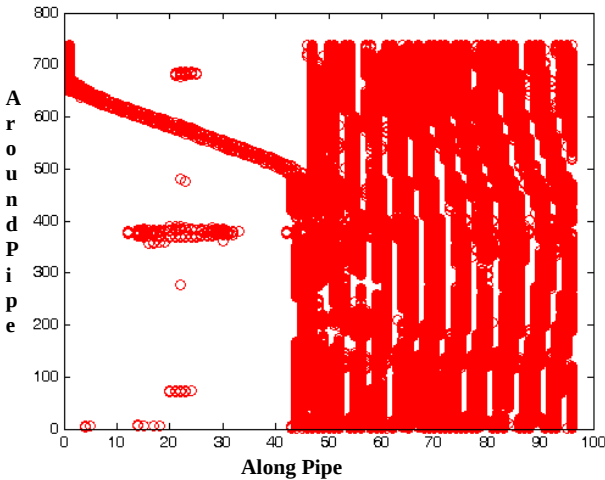


FIG. 19 DETECCIÓN DE LAS ZONAS CORRESPONDIENTES A LOS CABLES DE CALENTAMIENTO

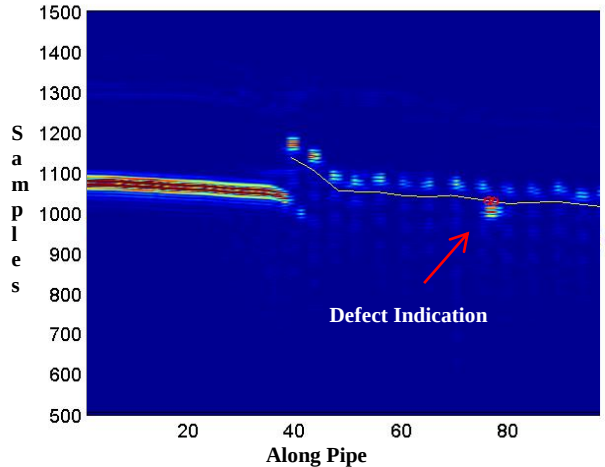


FIG. 20 DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE CABLES

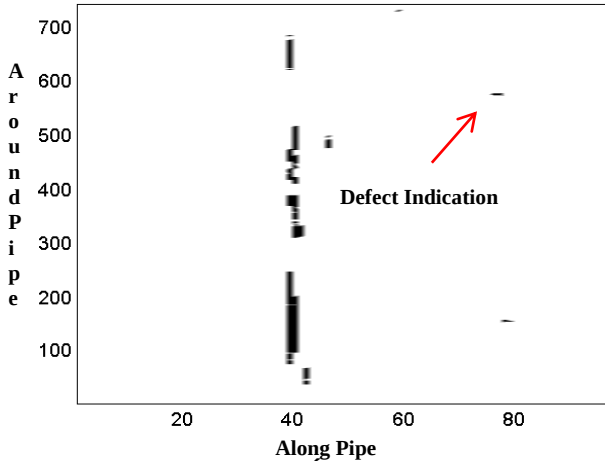


FIG. 21 DETERMINACIÓN DEL MAPA DE LOS DEFECTOS

DESARROLLO DEL CRITERIO DE ACEPTACIÓN

las soldaduras inspeccionadas en el proyecto se están ensayando mecánicamente tanto a corto como a largo plazo. Los resultados de estas pruebas se analizarán para cada uno de los diferentes tipos de defectos y se compararán con los resultados de las pruebas en soldaduras que no contengan defectos forzados. Los niveles reales de contaminación de partículas se determinarán usando técnicas de análisis de superficie en las interfaces de soldadura. Se generarán gráficos del tamaño del defecto / nivel de contaminación de partículas frente al rendimiento mecánico para calcular los tamaños / niveles críticos de defectos que reducen la integridad de la soldadura, para cada material de tubería, tamaño de tubería y tipo de unión [10].

Las pruebas mecánicas que se utilizarán para evaluar la integridad de las uniones soldadas son:

- Soldaduras BF:

- Ensayos de tracción con probetas con entalla según EN 12814-7 [12]
- Ensayo de fluencia en tracción según EN 12814-3 [13]
- Ensayo de rotura por fluencia a la tracción en tubos enteros [14]
- Soldaduras por EF:
 - Ensayo de pelado según EN 12814-4 [15]
 - Ensayo destructivo de pelado según ISO 13955 [16]
 - Ensayo de fluencia en tracción según Anexo C de EN 12814-3
 - Ensayo de presión hidrostática a 80 ° C como se especifica en BS EN 12201-3 [17]
 - Ensayo de rotura por fluencia a la tracción en tubos enteros

La Figura 22 muestra una probeta para ensayo de tracción de una soldadura BF y la Figura 23 muestra la superficie de fractura de probetas para ensayo de tracción de un tubo de PE de 225 mm; en el caso de tuberías sin defectos se trata de un modo de fallo completamente dúctil (Figura 23a), mientras que la unión de la tubería con alta contaminación de talco es un modo de fallo completamente frágil (Figura 23b). La Figura 24 muestra las superficies de fractura de muestras en el ensayo de pelado para soldaduras por EF en tubo de 225 mm. La figura 24a muestra la superficie de fractura de una unión sin defectos, siendo una fractura dúctil a lo largo del plano de los alambres de calentamiento. La figura 24b muestra la superficie de fractura de una soldadura fría y muestra una fractura frágil en la interfaz de soldadura.

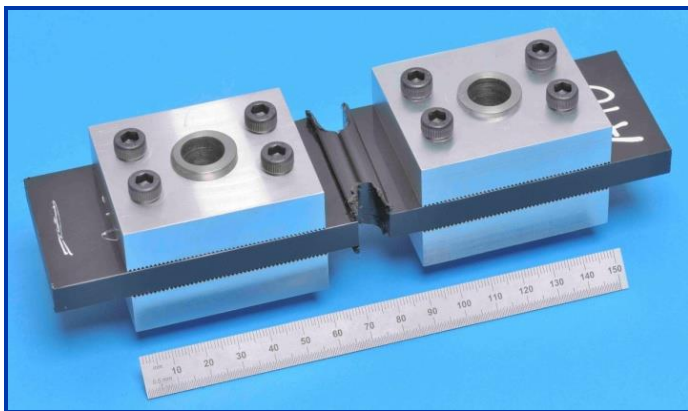


FIG. 22 PROBETA DE UN ENSAYO DE TRACCIÓN EN SOLDADURAS BF.

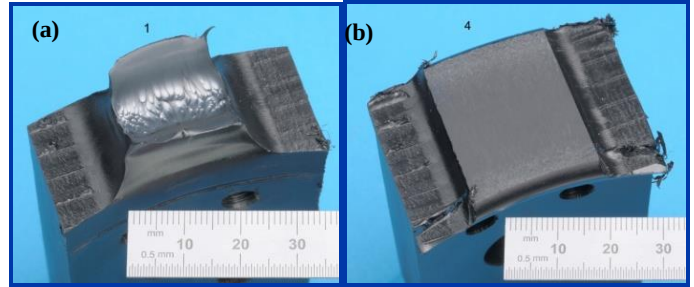


FIG. 23 SUPERFICIE DE FRACTURA DE LAS PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACCIÓN EN UNA TUBERÍA DE PE DE 225MM CON (A) UNA MODEO DE FALLO COMPLETAMENTE DÚCTIL, Y (B) UN MODO DE FALLO COMPLETAMENTE FRÁGIL.

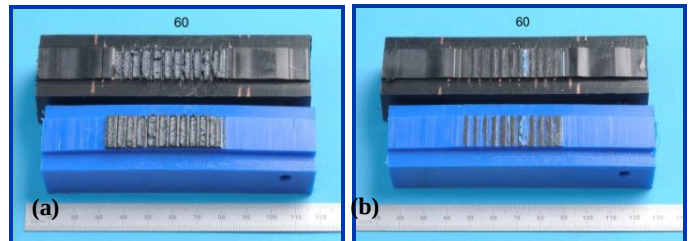


FIG. 24 SUPERFICIES DE FRACTURA DE LAS PROBETAS EN UN ENSAYO DE PELADO DE SOLDADURAS POR EF EN TUBERÍAS DE 225 MM CON (A) FRACTURA DÚCTIL A LO LARGO DEL PLANO DE LOS ALAMBRES DE CALEFACCIÓN, Y (B) FRACTURA FRÁGIL EN LA INTERFAZ DE SOLDADURA

DESARROLLO DE SISTEMAS DE END

Se ha diseñado un nuevo sistema phased array compacto de detección de defectos con la capacidad de operar en un entorno hostil (Figura 25). En este proyecto también se están desarrollando un prototipo de un sistema ultrasónico PA de adquisición y análisis de datos. Se está llevando a cabo un amplio diseño de la electrónica de control del haz ultrasónico y el procesamiento de datos en el sistema. A su debido tiempo se llevará a cabo la implementación en el propio equipo de los algoritmos ADR.



FIG. 25 IMAGEN DE LA IDEA DEL SISTEMA DE END TESTPEP

El equipo, que se muestra en la Figura 25, tiene las siguientes características:

- Hardware UT integrado y placa de circuito impreso
- Acceso remoto a la aplicación de software (Ethernet o WiFi)
- 64 x 64 canales PA
- 4 canales convencionales
- Caja compacta con protección IP67 para inmersión total (<0,5 m).
- Tarjeta SSD para almacenamiento de datos (100GB).
- Dos baterías extraíbles que permiten hasta 4 horas de funcionamiento continuo.
- Peso: 5 kg.
- Tamaño: 320 x 240 x 100 mm.

DESARROLLO DEL SISTEMA DE BARRIDO

Se ha diseñado y fabricado un sistema de barrido flexible que permitirá la rotación completa de 360 ° alrededor de las uniones BF y por EF en tamaños de tubería de 90 mm a 1000 mm (Figura 26). Comprende una placa principal que se posiciona alrededor de la tubería mediante varios enlaces y un mecanismo de ajuste. La placa contiene un encoder y también el soporte para el cabezal de la sonda para las soldaduras BF y por EF.



FIG. 26 ESCANER CON CADENA FLEXIBLE Y CABEZAL DE LA Sonda BF

MONTAJE Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO COMPLETO DEL SISTEMA

El sistema completo de END, que incluye equipo, sonda (s) y sistema de escaneo se ha ensamblado y evaluado mediante una serie de ensayos para analizar la sensibilidad, la reproducibilidad y la facilidad de uso del sistema. Se realizó una prueba en varias uniones por EF que se habían cortado de la tubería y, por lo tanto, no se pudo emplear el sistema de escáner. Sin embargo, manipulando manualmente la sonda (Figura 27), las uniones se inspeccionaron con éxito y un resultado típico, que indica un vacío alrededor de uno de los cables, se muestra en la Figura 28. En otra prueba, una pequeña selección de uniones destinadas a la industria de generación de energía del Reino Unido fue examinada por este sistema en paralelo con otro sistema PAUT. Solo una pequeña indicación fue detectada por ambos sistemas en una unión (Figura 29). Esta unión se está analizando para determinar la causa de la indicación. Se plantean nuevos ensayos en campo en nuevas instalaciones de tuberías de servicios públicos en Gales y la región central de Inglaterra..



FIG. 27 MANIPULACIÓN MANUAL DE LA SONDA PARA INSPECCIONAR UN CORTE DE UNA MUESTRA DE UNIÓN POR EF

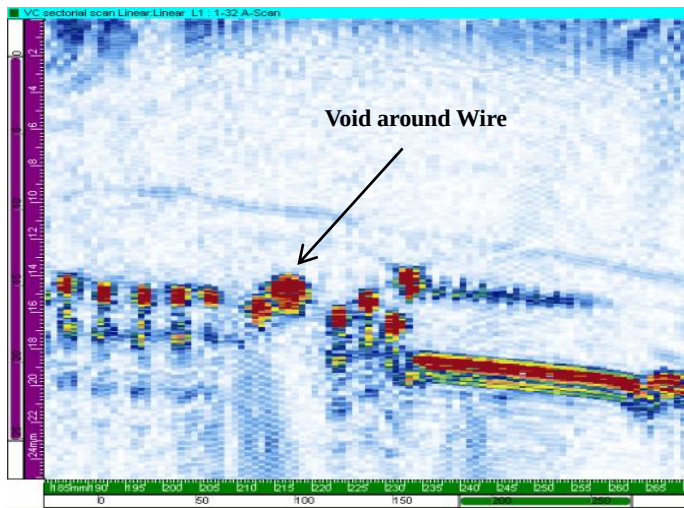


FIG. 28 RESULTADO DEL ENSAYO MANUAL

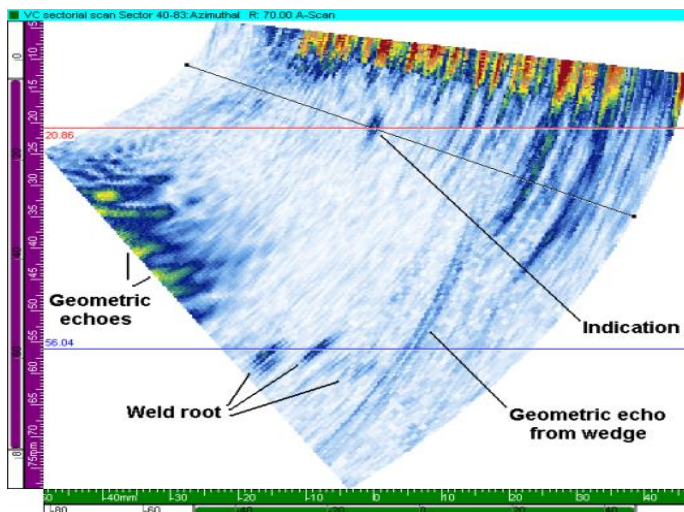


FIG. 29 PEQUEÑA INDICACIÓN EN LA UNIÓN DE TUBERÍAS DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA

TRABAJO RESTANTE

Se indica a continuación un resumen del trabajo restante en este proyecto:

- Completar la fabricación de las soldaduras BF y por EF que contengan defectos provocados.
- Completar la inspección de las soldaduras que contienen defectos provocados para determinar los límites de detección para el rango de tamaños de tubería investigados.
- Completar los ensayos mecánicos de las soldaduras que contienen defectos provocados para determinar los tamaños críticos de los defectos y los niveles de contaminación.

- Fabricar el nuevo instrumento de END.
- Finalizar el desarrollo del software de reconocimiento y clasificación automática de defectos.
- Continuar evaluando el prototipo completo del sistema de END y realizar pruebas de campo.

AGRADECIMIENTOS

La investigación que ha llevado a la obtención de estos resultados ha recibido financiación del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea gestionado por la Agencia Ejecutiva de Investigación REA [PF7 / 2007-2013] en virtud del acuerdo de subvención no [243791-2].

El consorcio del proyecto está formado por the European Federation for Welding, Joining and Cutting (EWF), Asociación española de ensayos no destructivos (AEND), Surface Mount and Related Technologies (SMART Group), Pipeline Industries Guild, Associazione Italiana Prove non Distruttive (AIPnD), Vernon, M2M, Plasflow, Isotest Engineering, E.ON Ruhrgas, British Energy, Hessel Ingenieuretechnik, Kaunas University of Technology, Consorzio Catania Ricerche Y TWI.

La información en este documento se proporciona tal cual y no se otorga garantía alguna de que la información sea adecuada para un propósito particular. El usuario de la misma utiliza la información bajo su exclusivo riesgo y responsabilidad.

REFERENCES

1. ASME, 2008, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-755*, American Society of Mechanical Engineers, New York.
2. Munns, I.J., and Georgiou, G.A., 1999, "Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes", *Insight*, 41(5), British Institute of Non-Destructive Testing, Northampton, UK.
3. Troughton, M.J., 2001, "Welding with integrated non-destructive examination of polyethylene pipes", *Plastics Pipes XI Conference*, Institute of Materials, London.
4. Messer, B., Yarmuch, M., and den Boer, P., 2003, "Novel high resolution defect detection for thermoplastic butt welds", *Pipeline and Gas Journal*, March, Oildom Publishing Company of Texas, Houston.
5. Crawford, S.L., Doctor, S.R., Cinson, A.D., Cumblidge, S.E., and Anderson, M.T., 2009, "Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion", *PVP2009-77958, ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference*, ASME, New York.
6. Frederick, C., Porter, A., and Zimmerman, D., 2009, "High-density polyethylene piping butt-fusion joint examination using ultrasonic phased array", *PVP2009-77783, ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference*, ASME, New York.
7. Shin, H.J., Jang, Y.H., Kwon, J.R., and Lee, E.J., 2004, "Nondestructive testing of fusion joints of polyethylene piping by real time ultrasonic imaging", *Plastics Pipes XII Conference*, Plastics Pipes Conferences Association.

8. Bird, C., Caravaca, D., and Raude, A., 2006, "The inspection of cold welds in electrofusion joints", *Plastics Pipes XIII Conference*, Plastics Pipes Conferences Association.
9. Caravaca, D.S., Bird, C., and Kleiner, D., 2007, "Ultrasonic phased array inspection of electrofusion joints in polyethylene pipes", *Insight*, 49(2), British Institute of Non-Destructive Testing, Northampton, UK.
10. Troughton, M., Spicer, M., and Hagglund, F., 2012, "Development of Ultrasonic Phased Array Inspection of Polyethylene Pipe Joints", PVP2012-78860, *ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Conference*, ASME, Toronto.
11. Mazeika, L., Sliteris, R., and Vladisauskas, A., 2010, "Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples", *Ultragarsas*, 65(4), Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania.
12. BS EN 12814-7, 2002, "Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products – Part 7: Tensile test with a waisted test specimen", British Standards Institution, London, UK.
13. BS EN 12814-3, 2000, "Testing of welded joints of thermoplastic semi-finished products – Part 3: Tensile creep test", British Standards Institution, London, UK.
14. Brown, C.I., and Troughton, M.J., 2004, "Qualifying longterm performance of butt fusion welds in PE pipes from short-term tests", *Plastics Pipes XII Conference*, Plastics Pipes Conferences Association.
15. BS EN 12814-4, 2001, "Testing of welded joints of thermoplastic semi-finished products – Part 4: Peel test", British Standards Institution, London, UK.
16. ISO 13955, 1997, "Plastics pipe and fittings – Crushing decohesion test for polyethylene (PE) electrofusion assemblies, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
17. BS EN 12201-3, 2003, "Plastics piping systems for water supply – Polyethylene (PE) – Part 3: Fittings", British Standards Institution, London, UK.