

COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL POR RAYOS X, ULTRASONIDO PULSO ECO Y ARREGLO DE FASES (PHASED ARRAY) EN LA INSPECCIÓN DE PROBETAS PROVENIENTES DE LA SOLDADURA LONGITUDINAL DE CODOS DE 26”.

Joan Salazar², José Rodríguez¹, Demian Pereira², Vincenzo Ignoto¹

¹ Universidad Central de Venezuela, Postgrado en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Caracas 1050, Venezuela.

² Universidad Central de Venezuela, Postgrado de Física de los Ensayos No Destructivos, Caracas 1050, Venezuela.

joansalazar27@gmail.com

RESUMEN

En este estudio se comparan las técnicas de radiografía industrial por rayos X, ultrasonido pulso eco convencional y arreglo de fases (*Phased Array*) aplicadas a la inspección de dos probetas provenientes de la soldadura longitudinal de accesorios de tubería (codos) de 26” asociados al manejo de hidrocarburos. La detección de discontinuidades por medio de la técnica de radiografía industrial con rayos X requirió un alto nivel de exposición para inspeccionar todo el espesor de la probeta (29 mm), dificultándose por las deficientes condiciones del equipo. Las técnicas de ultrasonido mediante el barrido A y el barrido sectorial permitieron identificar las discontinuidades con mayor claridad. Las discontinuidades con la técnica de radiografía industrial por rayos X solo se pudieron caracterizar según tipo, ubicación y longitud, en contraste, las discontinuidades inspeccionadas por la técnica de ultrasonido pudieron caracterizarse según tipo, ubicación, longitud y altura. Porosidad y falta de fusión, imperfecciones observadas en el cordón de soldadura inspeccionado, en su mayoría fueron rechazadas de acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo establecidos en ASME B 31.3, Sección VIII, División I y API 1104. En la comparación de las técnicas se consideraron aspectos como sensibilidad, registro de resultados, rendimiento, pericia, versatilidad, costo, seguridad industrial e impacto ambiental, resultando las técnicas de ultrasonido con más beneficio que la técnica de radiografía industrial por rayos X. Significativas ventajas ofrece la técnica de ultrasonido *Phased Array* sobre las técnicas de radiografía industrial y ultrasonido convencional, destacando su velocidad, capacidad de exploración, tipos de barrido, confiabilidad y sensibilidad.

Palabras Clave: Radiografía, Ultrasonido, Discontinuidades, Detección, Caracterización.

ABSTRACT

In this study, the techniques of industrial X-ray radiography, conventional echo pulse ultrasound and phase fixation applied to the inspection of two specimens from the longitudinal welding of 26" pipe fittings associated with the handling of hydrocarbons are compared. discontinuities in the middle of the industrial radiography technique with X-rays requires a high level of exposure to inspect the entire thickness of the specimen (29 mm), making the deficiencies in the equipment conditions difficult. Sectorial sweep allows to identify discontinuities with greater clarity The discontinuities with the X-ray industrial radiography technique are only characterized according to

type, location and length, in contrast, the discontinuities inspected by the ultrasound technique characterize according to type, location, length and height, porosity and lack of fusion, imperfections or They were rejected in the weld seam inspected, mostly rejected in the agreement by ASME B 31.3, Section VIII, Division I and API 1104. In the comparison of the techniques are considered aspects related to information supplied, record of results, experience of the operator, performance, industrial safety, environmental impact and cost of inspection, result of ultrasound techniques with more benefits than the technique of industrial radiography. Significant advantages offered by the technique of ultrasound Phase set on the techniques of industrial radiography and conventional ultrasound, highlighting its speed, scanning capacity, types of scanning, reliability and sensitivity.

INTRODUCCIÓN

Los Ensayos No Destructivos (END) son métodos de gran interés dentro del campo de la ingeniería, por su cualidad de no alterar en forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de los materiales o piezas sometidas a ensayo.

En la construcción de sistemas de tuberías en plantas de manejo de hidrocarburos es fundamental garantizar la integridad mecánica de las uniones soldadas, siendo la radiografía industrial uno de los END más utilizado para detectar discontinuidades en los sistemas de transporte de fluidos.

La radiografía industrial tiene la bondad de ofrecer un registro de los ensayos realizados y facilidad en la interpretación de los resultados, sin embargo, presenta considerables desventajas, requiriendo altas medidas de seguridad, personal capacitado y con experiencia, así como geometrías de escaza complejidad en su aplicación.

Los avances tecnológicos que ha experimentado el ultrasonido industrial en los últimos años en lo concerniente al registro de los ensayos y versatilidad de los equipos, a pesar de desventajas, como el alto grado de pericia del inspector y la elevada inversión inicial, lo han posicionado como un método de END seguro y económicamente viable para la inspección de soldaduras.

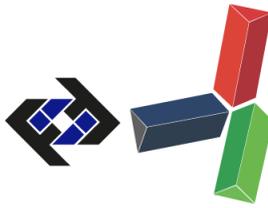
METODOLOGÍA

La metodología desarrollada se realizó en diferentes etapas: selección de piezas, preparación de las probetas, detección y caracterización de discontinuidades por las técnicas de Radiografía Industrial con rayos X (RX), Ultrasonido Pulso Eco (UT) convencional, Ultrasonido *Phased Array* (UTPA), interpretación de discontinuidades, y comparación de resultados de las inspecciones realizadas.

Las probetas fueron seleccionadas en función de discontinuidades (falta de fusión y porosidad), reflejadas en informe de inspección al cordón de soldadura en estudio por la técnica de gammagrafía industrial. Se extrajeron dos probetas de 40 cm de largo, 40 cm de ancho y 29 mm de espesor, mediante corte por oxiacetileno. La preparación de las probetas se realizó mediante limpieza mecánica de la superficie.

En la técnica de radiografía industrial por rayos X se dispuso de una fuente marca *ANDREX* 1652 *Holger Andreasen* y una película marca *AGFA* Tipo *Structurix* D4. Para la realización del ensayo se consideró un voltaje de 220 kV estimándose una exposición de 64 mA.min aplicada a las probetas en dos disparos de 4 mA y 8 min.

Para las técnicas de ultrasonido industrial, convencional y *Phased Array*, se efectuó la calibración



del rango de barrido usando los bloques IIW Tipo I y II, y el trazado de la curva DAC/TCG utilizando un bloque básico ASME para productos planos [1]. La inspección se realizó desplazando el palpador de manera oscilatoria (barrido tipo zig-zag), y orbitando sobre el área de interés girando el transductor 180° cuando lo requirió la detección y caracterización de las discontinuidades.

Tabla 1. Equipos y materiales usados en la inspección por la técnica de ultrasonido Pulso Eco convencional y *Phased Array*.

	Ultrasonido Pulso Eco	Ultrasonido <i>Phased Array</i>
Equipo	<i>General Electric</i> modelo USN 60 con barrido A	<i>Phasor XS</i> con barrido A, sectorial y lineal
Transductor	Espesor 0,25" y Frecuencia 3,5 MHz	Frecuencia 5 MHz; Número de Elementos 16; Pitch 0,50 mm y Elevación 6,00 mm
Zapata	45° y 60°, X = 9,02 mm y 10 mm	Velocidad 2337 m/s; wedge Front 17,77 mm; Offset Z 10,31 mm y Ángulo 36°
Medio acoplante	Grasa y gel	Grasa y gel
Bloques de referencia [1]	IIW Tipo I, bloque básico ASME para productos planos de 34 mm	IIW Tipo II, bloque básico ASME para productos planos de 34 mm

La caracterización con la técnica de radiografía industrial por rayos X se efectuó por observación y dimensionamiento de las discontinuidades en la película radiográfica. En las técnicas de ultrasonido Pulso Eco convencional y *Phased Array*, se empleó el método de la caída de los 6 dB para la caracterización de imperfecciones [2, 3]

Para la interpretación de las discontinuidades se consideraron los criterios de aceptación y rechazo establecidos en ASME B31.3, Sección VIII División I y API 1104.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la probeta 1 la técnica de radiografía industrial por rayos X reveló pequeñas discontinuidades a lo largo del centro de la soldadura y en la probeta 2 un reflector volumétrico de gran tamaño. La aplicación de esta técnica se dificultó por el alto valor de exposición necesario para inspeccionar la totalidad del espesor de las probetas (29 mm) y las deficientes condiciones del equipo.

Las técnicas de ultrasonido pulso eco convencional y *Phased Array* con el barrido A presentaron ecos dentados de poca altura y lisos de gran amplitud. La técnica de *Phased Array* con el barrido sectorial mostró indicaciones agrupadas de baja intensidad y aisladas de alta y media amplitud de acuerdo al código de colores ubicado a la derecha de la pantalla del equipo.

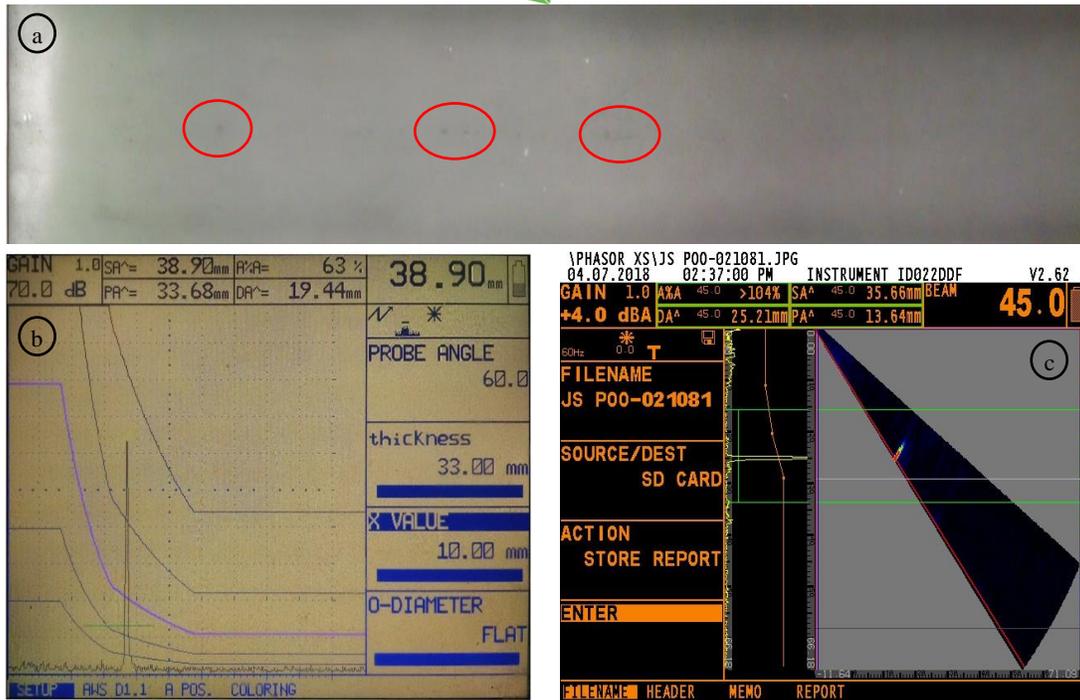


Figura 1. Inspección al punto 1.4 en la probeta 1, (a) radiografía industrial con rayos X, (b) ultrasonido pulso eco convencional y (c) *Phased Array*. **Fuente:** Elaboración Propia.

En la caracterización por la técnica de radiografía industrial se determinó longitud y tipo de la discontinuidad. Las técnicas de ultrasonido pulso eco convencional y *Phased Array* permitieron caracterizar longitud, altura y tipo de discontinuidad. En la técnica de ultrasonido *Phased Array* con barrido sectorial, las indicaciones con extremo inferior ubicado a ángulos menores de 45 grados se observaron parcialmente (Figura 1c), dificultándose la aplicación del método de caída de los 6 db en estos casos. Las discontinuidades pequeñas como porosidad agrupada presentan buena resolución en los registros asociados a la técnica de *Phased Array*.

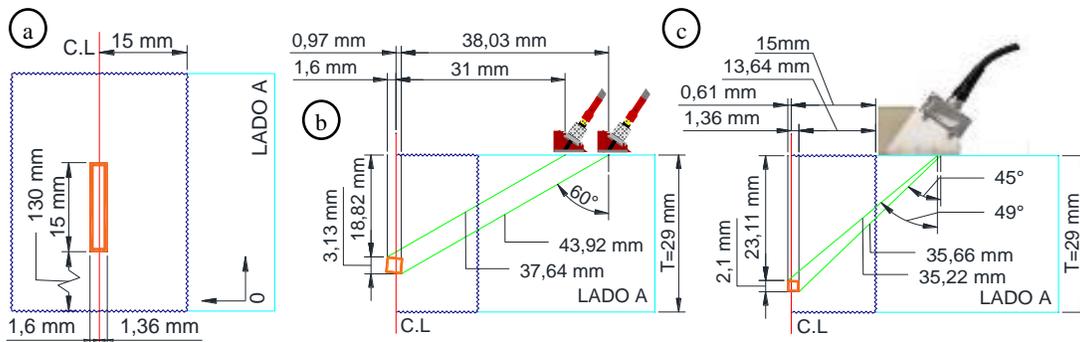


Figura 2. Caracterización de las discontinuidades en el punto 1.4 (a) Vista de planta (b) Corte (pulso eco). (c) Corte (*phased array*). **Fuente:** Elaboración Propia.

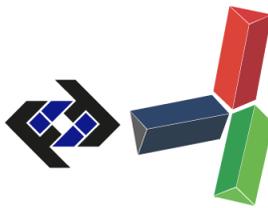


Tabla 2. Caracterización de discontinuidades en ubicación, longitud, altura y tipo.

	Técnica	Ubicación	Longitud (mm)	Profundidad (mm)	Altura (mm)	Discontinuidad
Probeta 1						
Punto 1.1	RX	-	-	-	-	-
	UT	0-18	18	18,29	2,78	Falta de fusión
	UTPA	0-23	23	20,23	2,97	Falta de fusión
Punto 1.2	RX	-	-	-	-	-
	UT	0-23	23	17,75	3,09	Falta de fusión
	UTPA	0-18	18	20,98	2,5	Falta de fusión
Punto 1.3	RX	45-50	5	N/A	N/A	Falta de fusión
	UT	30-47	17	18,04	3,01	Falta de fusión
	UTPA	30-51	21	17,88	3,59	Falta de fusión
Punto 1.4	RX	130-135	5	N/A	N/A	Falta de fusión
	UT	130-145	15	18,82	3,13	Falta de fusión
	UTPA	130-142	12	23,11	2,1	Falta de fusión
Punto 1.5	RX	-	-	-	-	-
	UT	130-145	15	14,61	-	Poros agrupados
	UTPA	130-132	12	19,81	-	Poros agrupados
Probeta 2						
Punto 2.1.1	RX	190-194	4	N/A	N/A	Poros aislados
	UT	190-200	10	10,54	2,45	Poros aislados
	UTPA	190-198	8	12,43	1,78	Poros aislados
Punto 2.1.2	RX	190-194	4	N/A	N/A	Poros aislados
	UT	190-200	10	15,56	2,12	Poros aislados
	UTPA	190-198	8	21,79	1,43	Poros aislados
Punto 2.2	RX	190-194	4	N/A	N/A	Poros aislados
	UT	190-200	10	19,08	3,32	Poros aislados
	UTPA	190-198	8	23,35	1,4	Poros aislados

Fuente: Elaboración Propia.

La interpretación de las discontinuidades se realizó considerando los criterios de aceptación y rechazo pautados en el código ASME B 31.3 y sección VIII División I, y API 1104. [4,5,6]

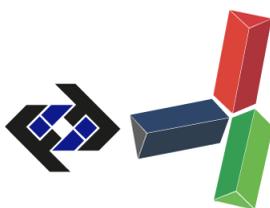


Tabla 3. Interpretación de las discontinuidades.

	Técnica	Longitud (mm)	Altura (mm)	Discontinuidad	Interpretación
Probeta 1					
Punto 1.1	RX	-	-	-	-
	UT	18	2,78	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
	UTPA	23	2,97	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
Punto 1.2	RX	-	-	-	-
	UT	23	3,09	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
	UTPA	18	2,5	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
Punto 1.3	RX	5	N/A	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
	UT	17	3,01	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
	UTPA	21	3,59	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
Punto 1.4	RX	5	N/A	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
	UT	15	3,13	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
	UTPA	12	2,1	Falta de fusión	Rechazado por ASME B31.3
Punto 1.5	RX	-	-	-	-
	UT	15	-	Poros agrupados	Acceptado por ASME SECCION VIII, DIV I Rechazado por API 1104
	UTPA	12	-	Poros agrupados	Acceptada por ASME SECCION VIII, DIV I Rechazado por API 1104
Probeta 2					
Punto 2.1.1	RX	4	N/A	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3
	UT	10	2,45	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3
	UTPA	8	1,78	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3
Punto 2.1.2	RX	4	N/A	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3
	UT	10	2,12	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3
	UTPA	8	1,43	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3
Punto 2.2	RX	4	N/A	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3
	UT	10	3,32	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3 Rechazado por ASME B31.8/API 1104
	UTPA	8	1,4	Poros aislado	Acceptado por ASME B31.3

Fuente: Elaboracion Propia.

Para realizar la comparación de las técnicas de radiografía industrial por rayos X y ultrasonido, convencional y *Phased Array*, se utilizó un análisis ponderado para determinar el método más adecuado para este tipo de inspección. Modelo fundamentado en la asignación de valores entre 1 a 10 para los aspectos más relevantes que ofrecen estas técnicas de inspección, expresando el resultado en porcentaje [4]. La técnica de ultrasonido por *Phased Array* resulto ser la que ofrece mas ventajas, primordialmente debido a su sensibilidad, registro de resultados y costo.

Tabla 4. Comparación ponderada de técnicas de inspección

	Ponderación	RX		UT		UTPA	
Sensibilidad	20	5	100,00	7	140	9	180
Registro de resultados	15	9	135,00	7	105	9	135
Rendimiento	15	6	90,00	8	120	8	120
Pericia	10	7	70,00	8	80	9	90
Versatilidad	5	4	20,00	8	40	9	45
Costo	15	9	135,00	6	90	7	105
Seguridad Industrial	10	2	20,00	10	100	10	100
Impacto Ambiental	10	2	20,00	10	100	10	100
Porcentaje	100		59%		77,5%		87,5%

Fuente: Elaboracion Propia.

CONCLUSIONES

La técnica de radiografía industrial por rayos X proporciono buenos resultados en la detección de discontinuidades volumétricas de gran tamaño, poros aislados. Las imperfecciones pequeñas detectadas, falta de fusión, se observaron con escasa nitidez. La inspección de altos espesores con un tubo portátil de rayos X no fue eficaz, por las deficientes condiciones del equipo. Alternativas más seguras, versátiles y económicas como el ultrasonido industrial son más viables para piezas de gran espesor.

Las técnicas de ultrasonido detectaron imperfecciones como porosidad y falta de fusión, presentadas mostrando ecos dentados de poca altura y lisos bien definidos de gran amplitud. *Phased Array* mediante el barrido sectorial permitió observar discontinuidades pequeñas, porosidad agrupada, con buena resolución. Adicionalmente, los ecos generados por estas imperfecciones estuvieron más próximos al nivel de referencia (TCG) que en la técnica de ultrasonido pulso eco convencional (DAC), lo que indica mayor sensibilidad en los resultados.

REFERENCIAS

- [1] American Society of Mechanical Engineers (2015). ASME Boiler & Pressure Vessel Code. Ney York, Estados Unidos.
- [2] American Society for Testing and Materials (2003). Standard Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments. West Conshohocken, Estados Unidos.
- [3] American Society for Testing and Materials (2009). Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays. West Conshohocken, Estados Unidos.
- [4] Yanchapaxi, O. (2017). Aplicación del método ultrasonido arreglo de fases en lugar de radiografía para inspección de soldaduras de tubería de presión. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.