

**INSPECCIÓN DE TUBERIAS DE PRODUCCIÓN DEL SECTOR PETROLERO,  
BASADA EN LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO AVANZADO DE EL EQUIPO  
PHASED ARRAY; OBTENIENDO RESULTADOS EN TIEMPO REAL**

**LAURA JUDITH VERA OVIEDO  
MÓNICA YURANY CIFUENTES BLANCO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

**“INSPECCIÓN DE TUBERIAS DE PRODUCCIÓN DEL SECTOR PETROLERO,  
BASADA EN LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO AVANZADO DE EL EQUIPO  
PHASED ARRAY; OBTENIENDO RESULTADOS EN TIEMPO REAL”**

**LAURA JUDITH VERA OVIEDO  
MÓNICA YURANY CIFUENTES BLANCO**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**Director  
OSCAR REY CASTELLANOS  
M.Sc Ingeniería de Materiales.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **DEDICATORIA**

*A Dios y la virgen por brindarme la sabiduría, paciencia y fuerza necesaria para dar por terminado y con éxito mi carrera.*

*A mis padres y hermana por el apoyo en todo momento y por sus palabras de aliento, que no me permitieron desfallecer ante las diferentes adversidades que se presentaron.*

*A Serghio Duvan Lizcano Parra por escucharme, aconsejarme, apoyarme, motivarme, aterrizarme, ayudarme a levantar de nuevo para seguir adelante, y por todo su amor incondicional.*

**Laura Judith Vera Oviedo**

## DEDICATORIA

*A Dios y la vida por concederme la sabiduría e inteligencia necesaria para culminar con éxito mis estudios.*

*A mis padres por apoyarme en cada decisión que tome para mi vida, por sus esfuerzos y su dedicación para educarme y hacer de mí la mujer que soy.*

*A mis hermanas Diana, Neidy y Tatiana, por sus consejos, colaboración y compañía.*

*A Fabián Leonardo Ramírez Becerra por su apoyo, por escucharme y motivarme, por ser esa voz de aliento cada vez que sentía que no podría lograrlo, por su amor y comprensión.*

**Mónica Yurany Cifuentes Blanco**

## AGRADECIMIENTOS

*Primeramente, agradecemos a Dios por ayudarnos a culminar esta etapa de la vida con éxito, así como a la Universidad Industrial de Santander por habernos permitido ser parte de esta Alma Mater para poder estudiar esta carrera; también a los diferentes docentes que nos brindaron sus conocimientos y en algunas ocasiones apoyo para seguir adelante.*

*Agradecemos también al Director de tesis el Ing. Oscar Rey Castellanos por brindarnos la oportunidad de recurrir a sus conocimientos, así como también habernos tenido toda la paciencia del mundo para guiarnos durante el desarrollo de la tesis.*

*Nuestros agradecimientos también van dirigidos a todos aquellos que nos dedicaron parte de su tiempo con el fin de sacar esta tesis adelante como lo son: el Técnico Oscar Martínez por toda la colaboración en el laboratorio; a el ICP y el Ing. Ludwig López por facilitarnos las muestras de tubería; a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales que de la mano con el Ing. Eduin Yiovanny Lozano hicieron posible el préstamo del equipo Phased Array; por último y no menos importante al Ing. Carlos Andrés Afanador quien nos ayudó con las pruebas de inspección y nos dio sus recomendaciones, así como conocimientos acerca del tema, con el fin de contribuir al desarrollo de la tesis.*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	20
1. MARCO TEÓRICO .....	22
1.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	22
1.2 EQUIPO PHASED ARRAY .....	24
1.2.1 Principio Físico.....	25
1.2.2 Leyes focales. ....	26
1.2.3 Escaneo e imágenes básicas. ....	28
1.2.4 Ventajas del Phased Array.....	29
1.3 PRINCIPALES FÓRMULAS Y DATOS DE REFERENCIA ULTRASÓNICOS.	29
1.3.1 Definiciones físicas de ultrasonidos. ....	30
1.4 TIPOS DE SONDAS DE PHASED ARRAY PARA APLICACIONES INDUSTRIALES.....	32
1.4.1 Sondas Lineales. ....	35
1.4.2 Características del haz. ....	37
1.4.3 Identificación de la sonda.....	39
1.4.4 Exploración helicoidal. ....	40
1.4.5 Escaneo en espiral. ....	41
1.4.6 Direcciones del haz.....	42
1.5 OTROS PATRONES DE EXPLORACIÓN.....	43
1.6 VISTAS ULTRASÓNICAS (SCAN-S). ....	45
1.7 NORMA API 571.....	50
1.7.1 Mecanismos de fallas mecánicas y metalúrgicas .....	51
1.7.1.1 Erosión /Erosión –Corrosión. ....	51
1.7.1.2 Fatiga Mecánica.....	52
1.7.3 Pérdida de espesor uniforme o localizada .....	53

1.7.3.1 Corrosión galvánica .....	53
1.7.3.2 Corrosión atmosférica.....	54
1.7.3.3 Corrosión del agua de refrigeración.....	55
1.7.3.4 Corrosión de CO <sub>2</sub> .....	56
1.7.3.5 Corrosión inducida microbiológicamente (MIC). .....	57
1.7.3.6 Corrosión cáustica. ....	58
1.7.4 Corrosión a alta temperatura [400°F (204°C)].....	59
1.7.4.1 Oxidación .....	59
1.7.4.2 Sulfuración .....	60
1,7.4.3 Carburización.....	61
1.7.4.4 Descarburación.....	62
17.4.5 Nitruración.....	62
1.7.4.5 Agrietamiento.....	63
2. INSPECCIÓN DE LOS TRAMOS DE TUBERÍA.....	65
2.1 MUESTRA 12-082: .....	65
2.2 MUESTRA 13-037 .....	66
2.3 MUESTRA 14 – 057: .....	67
2.4 MUESTRA 1405 – 084 .....	68
2.5 RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN VISUAL .....	70
2.5.1 Fotografías para inspección visual detallada. ....	70
3. RECOPIACIÓN DE IMÁGENES DE LA INSPECCIÓN CON EL EQUIPO PHASED ARRAY.....	76
3.1 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.....	76
3.2 USO DEL EQUIPO PHASED ARRAY PARA LA INSPECCIÓN A LOS TRAMOS DE TUBERÍA. ....	81
4. ANALISIS DE RESULTADOS.....	85
4.1 MUESTRA 12-082 .....	86
4.2 MUESTRA 13-037 .....	88
4.3 MUESTRA 14-057 .....	89
4.4 MUESTRA 1405-084 .....	92

5. CONCLUSIONES .....	94
6. RECOMENDACIONES .....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	97
ANEXOS .....	99

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Equipo Phased Array.....	25
Figura 2. Imagen de un ultrasonido avanzado con el equipo Phased array. ....	26
Figura 3. Detección de cuatro orificios perforados lateralmente (SDH): (a) Principio de escaneo sectorial, (b) Vista de exploración S utilizando $+_{30}^{\circ}$ .....	28
Figura 4. Sondas de matriz en fase circular 1-D (sondas Daisy). ....	34
Figura 5. Sonda de conjunto en fase de grupo para inspección de tubo de diámetro pequeño que muestra ángulos de haz típicos (R/D Tech, patente de los Estados Unidos 2004/0016299AL). ....	34
Figura 6. Sonda Array en fase cónica de matriz 2-D (Patente estadounidense RMD Tech 10-209298).....	35
Figura 7. Sondas Phased Array enfocadas mecánicamente: (a) un convexo toroidal preconfigurado, (b) cóncavo anular, (c) cóncavo lineal, (d) lineal convexo. ....	35
Figura 8. Tipos de enfoque para sonda de Phased Array lineal. ....	36
Figura 9. Apertura activa y pasiva.....	37
Figura 10. Dependencia del ancho del haz con el ángulo y la profundidad refractados.....	38
Figura 11. Ejemplo de identificación de sondas Phased Array. ....	39
Figura 12. Diferentes tipos de sondas de Phased Array proporcionadas por R / D Tech.....	40
Figura 13: Escaneo de superficie helicoidal en partes cilíndricas .....	41
Figura 14. Patrón de escaneo de superficie en espiral. ....	42
Figura 15. Posición de la sonda y dirección del haz relacionadas con el eje de exploración y el índice. ....	43

Figura 16. Inspección electrónica de haz que genera un patrón de escaneo lineal, donde la parte analizada y la sonda no se mueven. ....	44
Figura 17. Generación de una exploración helicoidal mediante una combinación de traslación de partes y rotación de haces.....	44
Figura 18. Representación señal RF y su rectificación según el A-scan. ....	45
Figura 19. Ejemplo de una señal A-scan rectificadas con codificación de color utilizada para crear un B-scan codificado por color. ....	46
Figura 20. Codificación de la amplitud de la señal de RF en niveles de escala de grises. ....	46
Figura 21. B-scan no corregido, vista lateral (izquierda) del componente, que muestra el reflector; Vista lateral (B-scan) corregida para el ángulo refractado (derecha). ....	47
Figura 22. Ejemplo de vista superior (C-scan).....	47
Figura 23. Ejemplo de vista superior D. ....	48
Figura 24. Ejemplo del s-scan.....	48
Figura 25. Ejemplo de vista polar.....	49
Figura 26. Diseño de análisis con cuatro vistas para la inspección de soldadura de metal diferente con sondas de matriz en fase de baja frecuencia (a) Exploración C, (b)Exploración D, (c)Exploración B, (d)Exploración A.....	50
Figura 27. Erosión de una curva de retorno del calentador coker 9cr.....	52
Figura 28. Superficie de fractura por fatiga de una tubería de acero al carbono. ..	53
Figura 29. Corrosión galvánica de un Niple de acero al carbono en un recipiente SS en servicio de agua caliente.....	54
Figura 30. corrosión del agua de refrigeración en el ID de un tubo intercambiador de calor CS que funciona a 86° F (30 °C).....	56
Figura 31: Corrosión con CO <sub>2</sub> de una línea de flujo de producción de petróleo y gas de acero al carbono. Análisis, "McGraw-Hill, Inc., NY, 1991, pp. 259-263.....	57
Figura 32. Corrosión de picadura en el I.D. de una línea de crudo sour CS de 6 pulgadas después de 2,5 años de servicio. ....	58

Figura 33. I.D. depósitos en el tubo de la caldera CS con daños por corrosión cáustica.....	59
Figura 34. Oxidación del O.D. de una línea de transferencia de acero al carbono. ....	60
Figura 35. Fallo de sulfidación del codo de la tubería.....	61
Figura 36. Nitrurada termopozo 5Cr-0,5Mo de una planta de síntesis de amoníaco con agrietamiento de la superficie. ....	63
Figura 37. Carbonato de grietas en y adyacente a la soldadura en una soldadura de tuberías no PWHT en una planta de gas FCC después de 15 años de servicio. ....	64
Figura 38. Muestra 12-082.....	66
Figura 39 Muestra 13-037.....	67
Figura 40: Muestra 14-057.....	68
Figura 41. Muestra 1405-084.....	69
Figura 42. Fotografías de la 1 a la 6 correspondientes a la muestra 12-082. ....	71
Figura 43: Fotografías de la 1 a la 6 correspondientes a la muestra 13-037. ....	72
Figura 44. Fotografías de la 1 a la 4 correspondientes a la muestra 14-057. ....	73
Figura 45. Fotografías de la 1 a la 10 correspondientes a la muestra 1405-084. ...	74
Figura 46. Palpador 5L64 A12 .....	77
Figura 47. Suela SA10- OL.....	77
Figura 48. Escalerilla de calibración .....	78
Figura 49. Visualización de colores con el equipo en operación.....	80
Figura 50. Reglilla de colores.....	81
Figura 51. Resultados muestra 12-082.....	82
Figura 52. Resultados muestra 13-037.....	82
Figura 53. Resultados muestra 14-057.....	83
Figura 54. Resultados de muestra 1405-084.....	84
Figura 55. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de espesor promedio	86
Figura 56. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de menor espesor. ...	87

Figura 57. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de espesor promedio. .....	88
Figura 58. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de menor espesor. ...	89
Figura 59. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de espesor promedio	90
Figura 60. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de menor espesor. ...	91
Figura 61. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de espesor promedio. .....	92
Figura 62. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de menor espesor. ...	93

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Velocidades he impedancia acústica para materiales utilizados con frecuencia a 20 ° C. ....	31
Tabla 2. Longitudes de onda para los acopladores, cuñas y materiales más utilizados en la inspección industrial por ultrasonidos a 20 ° C.....	32
Tabla 3. Sondas típicas de Phased Array ampliamente disponibles.....	33
Tabla 4. Dependencia de secuencia de inspección en parte, escáner de haz. ....	43
Tabla 5. Información del campo.....	66
Tabla 6. Información del campo.....	67
Tabla 7. Información del campo.....	68
Tabla 8. Información del campo.....	69
Tabla 9. Tabla de resultados obtenidos de la inspección visual. ....	70

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Muestra 12-082 .....	99
Anexo B: Muestra 13-037. ....	104
Anexo C: Muestra 14-057. ....	108
Anexo D: Muestra 1405-084. ....	113

## RESUMEN

**TITULO:** “INSPECCIÓN DE TUBERIAS DE PRODUCCIÓN DEL SECTOR PETROLERO, BASADA EN LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO AVANZADO DE EL EQUIPO PHASED ARRAY OBTENIENDO RESULTADOS EN TIEMPO REAL”

**AUTORES:** LAURA JUDITH VERA OVIEDO  
MONICA YURANY CIFUENTES BALNCO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Inspección, tuberías de producción, Phased Array, ultrasonido avanzado.

Desde sus inicios, la industria del petróleo ha dedicado parte del tiempo para a minimizar cualquier tipo de daño que se pueda presentar y que ponga en riesgo la integridad del equipo de trabajo, uno de los problemas más frecuentes en la industria de los hidrocarburos es lograr que las tuberías de producción y en general toda su infraestructura este en óptimas condiciones para poder desarrollar las operaciones para las cuales fueron diseñadas, pensadas y fabricadas. Que en una operación petrolera se presenten inconvenientes relacionados con este tipo de tuberías, no solo afecta notoriamente la integridad de las mismas, a su vez, conlleva a pérdidas considerables de tipo económico, ambiental y social, lo que puede conducir incluso a la suspensión temporal y/o definitiva de los permisos ambientales.

Debido a la importancia de estos equipos y de los daños que se podrían generar gracias a su deterioro, el objetivo de este proyecto fue realizar una inspección a diferentes tramos de tubería de producción, de los cuales se seleccionan puntos específicos por medio de un respectivo chequeo visual, de donde se pueden dimensionar y conocer los daños que en ellas se suelen presentar, tales como lo son la corrosión, picaduras, perdidas de espesor, abolladuras y fracturas o fisuras. Para llevar acabo dichas inspecciones, se empleó el quipo PHASED ARRAY, basado en la técnica de ultrasonido avanzado, el cual permite tener una información más precisa de los daños ya mencionados y en tiempos más cortos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico- Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Oscar Rey Castellanos. Ingeniero Metalúrgico.

## ABSTRACT

**TITLE:** “INSPECTION OF PRODUCTION PIPES OF THE OIL SECTOR, BASED ON THE ADVANCED ULTRASOUND TECHNIQUE OF THE PHASED ARRAY EQUIPMENT, OBTAINING REAL-TIME RESULTS” \*

**AUTHORS:** LAURA JUDITH VERA OVIEDO  
MONICA YURANY CIFUENTES BLANCO\*\*

**KEY WORDS:** Inspection, production pipes, Phased Array, advanced ultrasound.

Since its inception, the oil industry has devoted part of its time to minimize any type of damage that may occur and put at risk the integrity of the work team, one of the most frequent problems in the hydrocarbon industry is to achieve that the pipes of production and in general all its infrastructure is in optimal conditions to be able to develop the operations for which they were designed, thought and manufactured. That in an oil operation there are inconveniences related to this type of pipes, not only it affects notoriously the integrity of them, in turn, it leads to considerable losses of economic, environmental and social type, which can even lead to temporary suspension and / or final environmental permits.

Due to the importance of these equipment's and the damages that could be generated due to their deterioration, the objective of this project was to carry out an inspection to different sections of production pipeline, from which specific points are selected by means of a respective check visual, where they can be dimensioned and know the damage that they usually present, such as corrosion, pitting, loss of thickness, dents and fractures or fissures. To carry out these inspections, the PHASED ARRAY equipment was used, based on the advanced ultrasound technique, which allows to have a more precise information of the damages already mentioned and in shorter times.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de ingenierías físico-químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Oscar Rey Castellanos. Ingeniero Metalúrgico.

## INTRODUCCIÓN

En el proceso de producción de hidrocarburos se requiere que las tuberías utilizadas estén en perfectas condiciones para que el trabajo a realizar sea desarrollado de manera óptima; por lo cual se hace necesario llevar a cabo la inspección de tuberías con equipos que permitan identificar posibles defectos, fallas o alteraciones en las mismas, y que a su vez puedan generar algún tipo de peligro y/o riesgo en el buen funcionamiento, tanto de los equipos como de la operación en general.

Por lo anterior, se requiere que estas inspecciones sean realizadas por personal altamente calificado, puesto que el deterioro de las tuberías puede llegar a generar grandes daños en la locación, plataforma, ambiente e integridad física de quienes estén desarrollando la actividad y operando el campo.

El equipo PHASED ARRAY está basado en la tecnología de ultrasonido que permite obtener datos en un lapso de tiempo real; lo cual trae consigo beneficios al sector de los hidrocarburos; puesto que, al poder desarrollar de forma correcta y exitosa los objetivos propuestos, esto genera un aporte tecnológico de gran importancia. Sin embargo, y aunque este equipo ya es implementado principalmente en la inspección de soldaduras, ya cuenta con algunos avances en el área de facilidades de superficie, en laboratorio y refinería.

Es por esta razón que este tipo de inspección y uso del equipo se ha convertido en el objetivo principal de este proyecto, todo con el fin de poder desarrollar un análisis de factibilidad y viabilidad del uso del mismo; y porque no, llegar a generar un aporte que pueda facilitar inspecciones futuras en otras áreas de la industria petrolera.

De igual manera, para generar un análisis detallado he implementar y hacer uso de este equipo se hace necesario tener tuberías de producción. Ahora bien, como estas tuberías son costosas y para este caso no fue factible desplazar el equipo al campo de operación, se dio lugar a la búsqueda de algunos tramos expuestos a fluidos y condiciones diferentes; que permitan evidenciar y obtener una vista de los daños que se presentan en estas. También es de gran relevancia saber cómo se opera de manera apropiada el equipo, ya que este es bastante versátil y permite ser usado según la necesidad de quien lo emplea; así como las medidas, datos y las condiciones que se tengan para su operación.

Sin embargo y aunque el equipo PHASED ARRAY no es implementado en esta área como se mencionó anteriormente; se espera que los resultados y análisis obtenidos durante el desarrollo de la tesis, sean exitosos, y se pueda llegar a corroborar la presencia de daños con esta tecnología. Buscando también de algún modo llegar a generar un aporte a la industria de los hidrocarburos.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos son la evaluación de los materiales de ingeniería sin perjudicar su utilidad; es decir, no se afecta la forma y composición del objeto a estudiar. Un objetivo fundamental es la identificación de defectos potencialmente críticos como grietas internas y superficiales; estos ensayos pueden servir para analizar una falla existente o para evitar fallas futuras.

Las técnicas de inspección dominantes en este campo son:

- **Inspección visual:** Es la técnica más antigua entre los ensayos no destructivos y la más usada por su versatilidad, bajo costo y excelencia. Además de esto es la primera medida de inspección que se realiza a cualquier tipo de material. Sin embargo, cabe resaltar que esta debe ser llevada a cabo por el ingeniero más experto en el tema.

Este tipo de ensayos es aplicado para:

- a) Detección de fracturas, porosidad y corrosión que se encuentren en la superficie externa del material.
  - b) Comprobar dimensiones.
- **Tintas penetrantes:** También conocido con el nombre de líquidos penetrantes, la cual es empleada generalmente para evidenciar discontinuidades superficiales sobre casi todos los materiales no porosos.
  - **Corrientes de Eddy:** La generación de corrientes de Eddy se basa en el principio de inducción electromecánica. La técnica consiste en aplicar un campo

magnético (primario), generando al hacer circular corriente alterna a través de una bobina. Cuando este campo es aproximado a un material conductor, inducirá corrientes eléctricas circulares (ley inducción de Faraday).

Este tipo de ensayos es aplicado para:

- a) Control de espesores.
- b) Detección de fallas: grietas, picaduras y corrosión.

- **Ultrasonido convencional:** Está basado en un fenómeno que provoca la reflexión de ondas acústicas; permitiendo medir las mismas, que se produce cuando estas ondas encuentran discontinuidades durante su propagación, permitiendo conocer el punto exacto donde se localizan.

Este tipo de ensayos es aplicado para:

- a) Identificar discontinuidades.
- b) Medir espesores.
- c) verificar los puntos de soldaduras y/o corrosión presente en el material.

- **Radiografía industrial:** Es un método de inspección no destructiva, que utiliza radiación para atravesar un objeto y registrar la imagen en una película.

Este tipo de ensayos es aplicado para:

- a) Identificar discontinuidades tales como: grietas, porosidades, inclusiones metálicas o no metálicas, falta de fusión.
- b) Se emplea ampliamente a la inspección de piezas moldeadas y en soldadura.

- **Ultrasonido avanzado:** Conocido también como ensayo automático. Es un ensayo que aporta grandes ventajas ya que permite realizar un análisis más rápido y preciso, lo cual ayuda a identificar de una forma más exacta los defectos y/o discontinuidades. Este tipo de ensayo se puede realizar siguiendo varias

técnicas, entre las cuales se encuentra la técnica Phased Array, la cual será la empleada para el desarrollo de este trabajo.

Este tipo de ensayos es aplicado para:

- a) Inspección de piezas de forja pesada.
- b) Inspección de soldaduras por fricción.
- c) Sistemas de inspección automático para piezas de materiales compuestos.
- d) Defectos transversales, longitudinales y oblicuos.
- e) Discontinuidades en la superficie y en el interior del material.
- f) Determinación de espesores.

## **1.2 EQUIPO PHASED ARRAY**

El ultrasonido Phased Array es una técnica de inspección computarizada de última generación portátil y de uso manual (ver figura 1) que deja registro y tiene una alta probabilidad de detección. Además de esto, el principio físico de funcionamiento es muy similar al ultrasonido convencional pulso eco; con la diferencia que se pueden controlar mediante software diferentes parámetros como ángulo de refracción, punto de salida del haz, enfoque en una zona determinada, entre otras.

De igual manera una de las características que tiene este novedoso equipo es que permite llegar a remplazar los Rayos X y Gamma evitando así los inconvenientes presentes a la hora de su importación, manipulación, exportación y legalización de las fuentes radioactivas y operadoras de las mismas. Así mismo, otras de las fortalezas con las que cuenta es que no contamina el planeta con residuos radiactivos y por ende no requiere zonas de exclusión, lo que a su vez ayuda a economizar gastos; puesto que no necesita de espacios confinados y placas radiográficas, también evitando así posibles enfermedades.

**Figura 1. Equipo Phased Array.**

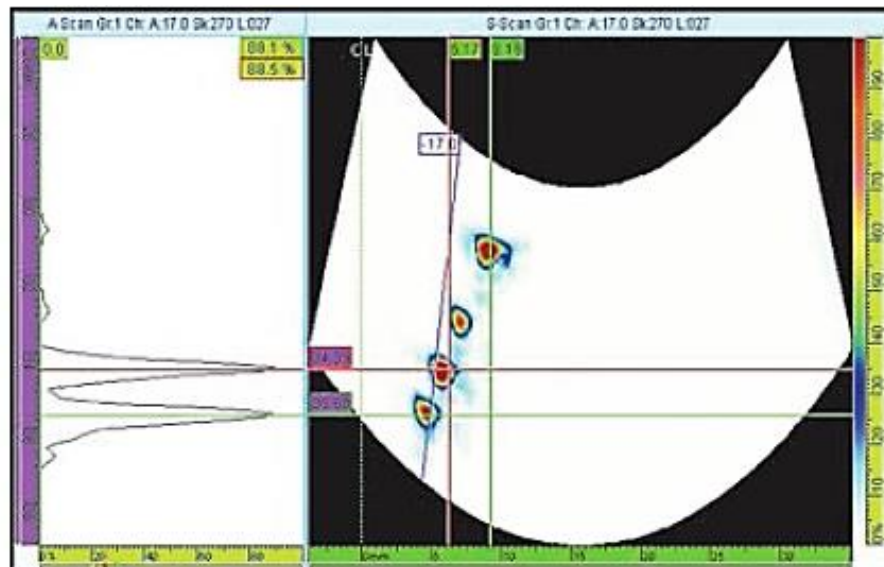


**1.2.1 Principio Físico.** Phased Array es un equipo que se basa en la tecnología de ultrasonido, por lo cual, al hablar de inspecciones ultrasónicas convencionales; es necesario hacer referencia a que estas utilizan sondas monocristales con haces divergentes en donde la frecuencia a emplear en la mayoría de las aplicaciones industriales es entre los 0,5 MHz y los 15 MHz. Además de esto, la propagación del campo acústico genera una divergencia en el haz que ayuda a la detección y dimensionamiento de las grietas.

Lo que hace que se puedan llegar a detectar los defectos en el material son aquellas señales que son enviadas por el haz que se transforman a lo largo en una especie de impulso de alto voltaje. La cual al encontrar la falla en el material choca y se devuelve dejando una señal para ser recibida y desplazada de acuerdo a la ley focal receptora que se encarga de agrupar todas esas pequeñas señales para generar un único impulso. Ahora bien, el tiempo que demora en llegar esta señal depende de la apertura del elemento activo de la sonda del Phased Array, el tipo de onda, el ángulo refractado y la profundidad focal.

Así mismo este equipo tan avanzado permite la producción de imágenes transversales, precisas y detalladas en la estructura interna a altas velocidades de inspección. Basándose en el uso de elementos de ultrasonido múltiples y retardos electrónicos para crear haces que pueden dirigir, escanear, barrer y enfocar de manera electrónica para lograr una inspección más rápida y en ángulos múltiples (Ver figura 2). Además, este equipo es una herramienta portátil de uso manual lo cual facilita su transporte e implementación. Permitiendo así obtener imágenes más precisas y exactas en tiempo real del daño presente en el material que se está inspeccionando, con el fin de determinar el punto exacto donde se encuentra ubicado gracias a las altas velocidades que maneja este equipo.

**Figura 2. Imagen de un ultrasonido avanzado con el equipo Phased array.**



Fuente: Tomada de Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

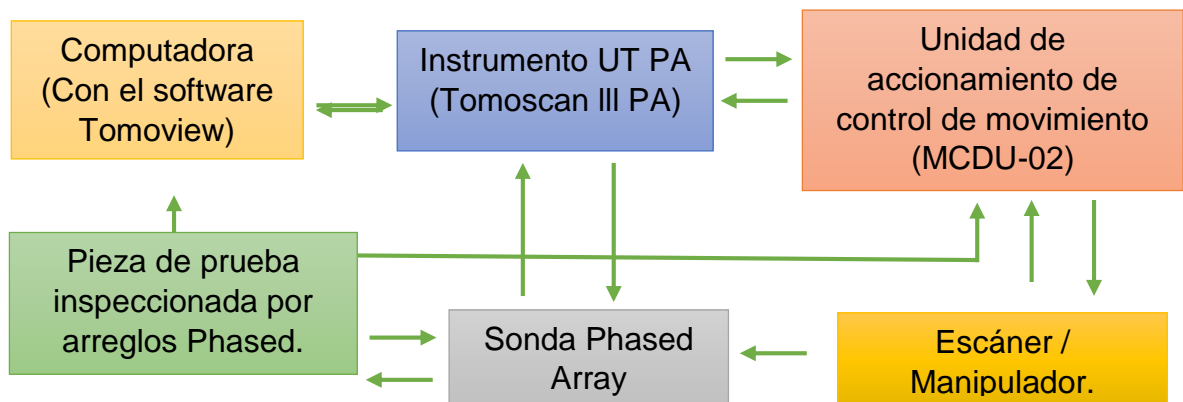
**1.2.2 Leyes focales.** Las leyes focales son la excitación controlada de los elementos individuales presentes en un transductor que se genera a través de un equipo de cómputo, (Amplitud y retraso); una cantidad adecuada de estas leyes focales nos brindan un balance entre la velocidad de rastreo y la resolución de la imagen.

La sonda de Phased Array empleada para realizar el barrido en el objeto a inspeccionar emite leyes de retardo (leyes focales) con diferentes formas, que permiten analizar el tiempo mínimo de llegada de la onda a través de una trayectoria conocida; esto se consigue basándonos en el principio de FERMAT, el cual expresa que “Cuando un rayo de luz se desplaza entre cualesquiera dos puntos, su trayectoria es la que requiere menor intervalo”<sup>1</sup>.

Cuando la deflexión del haz azimutal (sectorial) y la sonda no tiene cuña el retardo depende de la posición del elemento en la abertura activa, así como del ángulo generado entre estas; sin embargo, si la sonda tiene cuña este valor va a depender de la posición del elemento y de un ángulo de refracción ya programado.

A continuación, se muestran los principales componentes para un sistema de escaneo básico con instrumentos de Phased Array.

### instrumentos de Phased Array



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

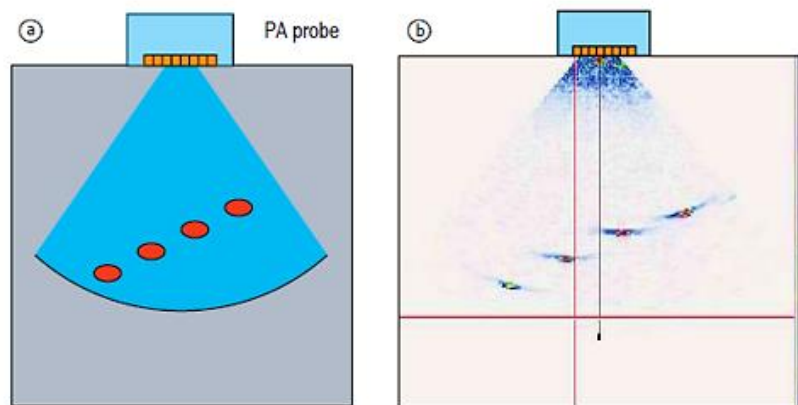
<sup>1</sup> SERWAY, Raymond A. GEWEDTT JR, John W. Física para ciencia e ingeniería con física moderna. Latinoamérica: Editora de producción CENGAGE Learning 2005. P. 678 (Naturaleza de la luz y leyes de óptica geométrica). ISBN: 0-495-11244-0

**1.2.3 Escaneo e imágenes básicas.** Para realizar el escaneo con el dispositivo y obtener vistas de la inspección que faciliten la interpretación de los resultados; se debe de establecer un recorrido de acuerdo a la posición del encoder. Así mismo los matrices típicos usan Scan A empiladas con diferentes ángulos, tiempo de vuelo y retrasos de tiempo en cada pequeño cristal piezocompuesto de la sonda Phased Array.

Un recorrido de los datos en 2D de la parte inspeccionada, nos permite tener una mejor interpretación y análisis de los resultados, lo cual nos ofrece beneficios como:

- Visualización de imagen durante el escaneo.
- Representación de profundidad real.
- Reconstrucción volumétrica en 2D.

**Figura 3. Detección de cuatro orificios perforados lateralmente (SDH): (a) Principio de escaneo sectorial, (b) Vista de exploración S utilizando +\_30°.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

La detección de los defectos se puede ver más fácilmente si se hace una combinación de vistas e imágenes durante el recorrido de la sonda. Así mismo una combinación de ondas longitudinales y ondas de corte puede ser muy útil para la detección y dimensionamiento, para tener una vista más amplia del defecto se

puede configurar el haz. La exploración en tiempo real se puede combinar con el movimiento de la sonda y la fusión en una sola vista; ofreciendo así efectos como:

- Redundancia alta.
- Ubicación de defectos.
- Trazado preciso.
- Detección de imagen.

#### **1.2.4 Ventajas del Phased Array.**

- Controla de manera oportuna el proceso de soldadura contribuyendo así a la disminución de errores que se puedan presentar en el desarrollo del mismo.
- Tiene un alto rendimiento que permite inspeccionar grandes espesores en tiempos cortos.
- Contribuye a la conservación del medio ambiente puesto que no genera residuos químicos ni radioactivos; disminuyendo así el riesgo y evitando posibles accidentes a la población.
- Minimiza costos y hace posible la repetición de las pruebas.
- Permite tener un registro físico y digital del volumen total de la soldadura.
- La normatividad vigente permite el empleo de la técnica como reemplazo a la radiografía.

### **1.3 PRINCIPALES FÓRMULAS Y DATOS DE REFERENCIA ULTRASÓNICOS.**

Muchas de las tablas y gráficas son útiles para el conjunto de fases, puesto que facilita la detección del rango de exploración sectorial de ley focal, ubicación de señales convertidas en modo, pérdida de ganancia, compensación de ganancia con ángulo, resolución de la sonda axial y lateral y las características de haz.

**1.3.1 Definiciones físicas de ultrasonidos.** La caracterización de las ondas ultrasónicas está definida por la nomenclatura:

- Desviación de la partícula,  $\epsilon$  (m)
- Frecuencia,  $f$  (MHZ= $10^6\text{S}^{-1}$ )
- Velocidad (velocidad),  $v$  (véase la Tabla 2-1) (Km/S; mm/ $\mu\text{s}$ )
- Longitud de onda,  $\lambda = v/f$  (ver Tabla 2-2) (mm)
- Velocidad angular,  $\omega$  ( $\text{rad}/\text{S}^{-1}$ )
- Impedancia acústica,  $Z = v \cdot \rho$  (Km/ $\text{m}^2\text{s} = \text{ray1}$ )
- Intensidad de la potencia acústica,  $J = 0.5Zv^2\xi^2$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- Intensidad (amplitud) radio (dB)
- Presión sonora,  $P$  ( $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ )
- Coeficiente de atenuación,  $\alpha_{\text{atenuación}}$ . (dB/mm)

Algunos de los tipos de ondas generados en un sólido pueden ser:

- Longitudinal (compresión).
- Transversal (cizallamiento).
- Superficie (Rayleigh).
- Ondas guiadas (Cualitativo).
- TOFD (difracción).

De igual forma es importante tener en cuenta que la onda longitudinal es el único modo que generalmente se puede propagar a través de líquidos y gases.

Analizando que la detección de las fallas y problemas en el material inspeccionado depende también de la velocidad con que la onda se propaga en el medio y su tiempo de trayectoria. Las velocidades y la impedancia acústica de los materiales más utilizados se presentan en la Tabla 1 y 2.

**Tabla 1. Velocidades he impedancia acústica para materiales utilizados con frecuencia a 20 ° C.**

Material	Densidad de masa	Velocidad (LW)	Velocidad (SW)	Impedancia acústica
	Km/m3	m/s	m/s	106 Kg/m2s
<b>Material liquido de acoplamiento / cuña.</b>				
Agua (20 °C)	1000	1480	-	1,48
Agua pesada	1104	1400	-	1,55
Glicerina ( Hamikleer® )	1260	1920	-	2,42
Aceite de motor	870	1740	-	1,51
Resina acilrica	1180	2730	1430 1260	3,22
Lucite®	1180	2680		3,16
Plexiglas®	1270	2730		3,51
Poliestireno (Rexolite®)	1056	2340	-	2,47
<b>Componentes del material.</b>				
Aluminio	2700	6320	3130	17,06
Latón	8560	4280	2030	36,64
Cobre	8930	4660	2260	41,61
Oro	19320	3240	1200	62,60
Inconel®	8500	5820	3020	49,47
Yeso de hierro	6950	3500	2200	25
Hierro fundido rápido	7350	3600	3200	40
Monel®	8830	5350	2720	47,24
Acero 1020	7710	5890	3240	45,41
Acero austenítico	7910	5740	3090	45,40
Titanio	4500	6070	3110	27,32
Tungsteno	19250	5180	2870	99,72
Zircaloy™	6500	4686	2360	30,46

Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

**Tabla 2. Longitudes de onda para los acopladores, cuñas y materiales más utilizados en la inspección industrial por ultrasonidos a 20 ° C.**

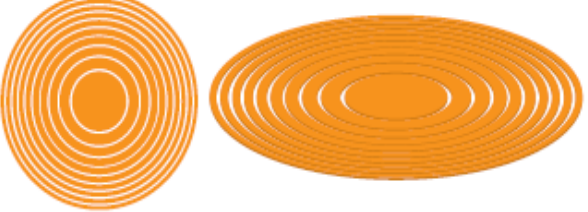

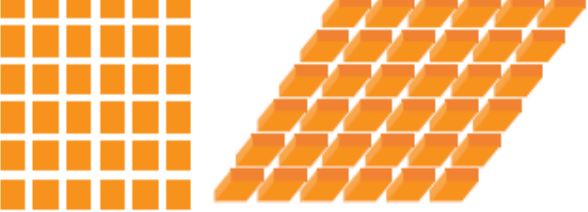

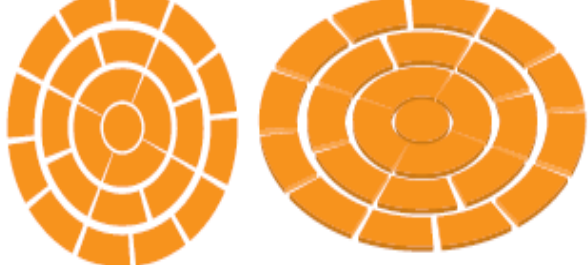
Frecuencia (MHz)	Longitud de onda (mm)		Frecuencia (MHz)	Longitud de onda (mm)	
	Ondas Longitudinales	Ondas de corte		Ondas Longitudinales	Ondas de corte
<b>Agua</b>			<b>Rexolite®</b>		
1	1.5	-	1	2.3	-
2	0.75	-	2	1.15	-
4	0.4	-	4	0.58	-
5	0.3	-	5	0.46	-
10	0.15	-	10	0.23	-
<b>Glicerina (Hamikleer®)</b>			<b>Acero</b>		
1	1.9	-	1	5.9	3.2
2	0.95	-	2	3	1.6
4	0.48	-	4	1.5	0.8
5	0.38	-	5	1.2	0.6
10	0.19	-	10	0.6	0.3
<b>Plexiglas®</b>			<b>Aluminio</b>		
1	2.7	-	1	6.1	3
2	1.35	-	2	3	1.5
4	0.75	-	4	1.5	0.8
5	0.54	-	5	1.2	0.6
10	0.27	-	10	0.6	0.3

Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

#### **1.4 TIPOS DE SONDAS DE PHASED ARRAY PARA APLICACIONES INDUSTRIALES.**

En la tabla 3, se muestran algunas aplicaciones industriales de las sondas de ensayos en fase, al igual que sus tipos de deflexión de enfoque y haz.

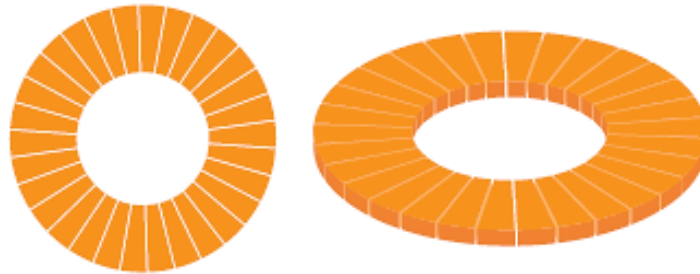
**Tabla 3. Sondas típicas de Phased Array ampliamente disponibles.**

Tipo	Deflexión	Forma de haz	Imagen	
Anular	Profundidad z	Esférico		
1-D Lineal	Profundidad, ángulo	Elíptico		
2-D Matriz	Profundidad, ángulo sólido.	Elíptico		
2-D Segmentado anular.	Profundidad, ángulo sólido.	Esférico /elíptico		
1.5-D Matriz	Profundidad, ángulo sólido pequeño.	Elíptico		

Fuente: Modificada por los autores, imágenes tomadas de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

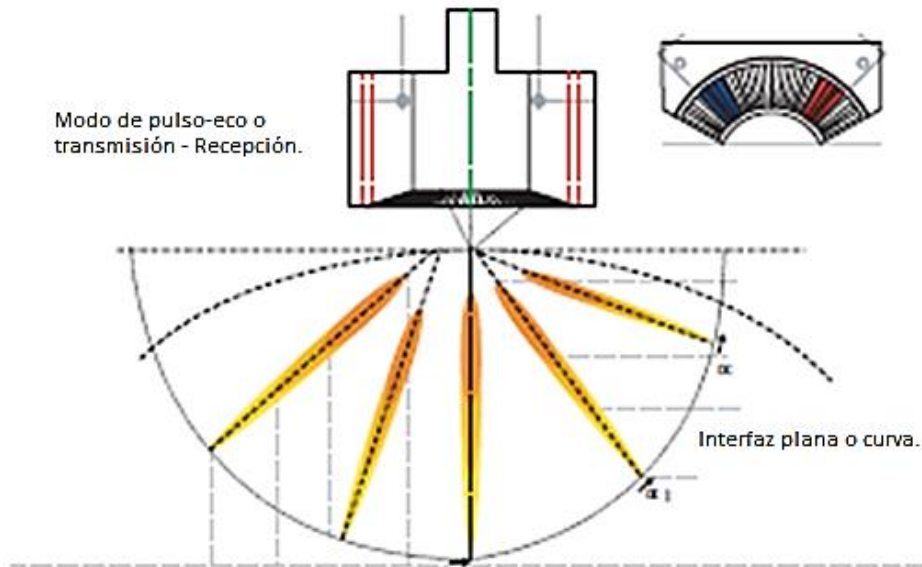
De igual manera existen otros tipos de sondas Phased Array que se verán en las siguientes imágenes.

**Figura 4. Sondas de matriz en fase circular 1-D (sondas Daisy).**



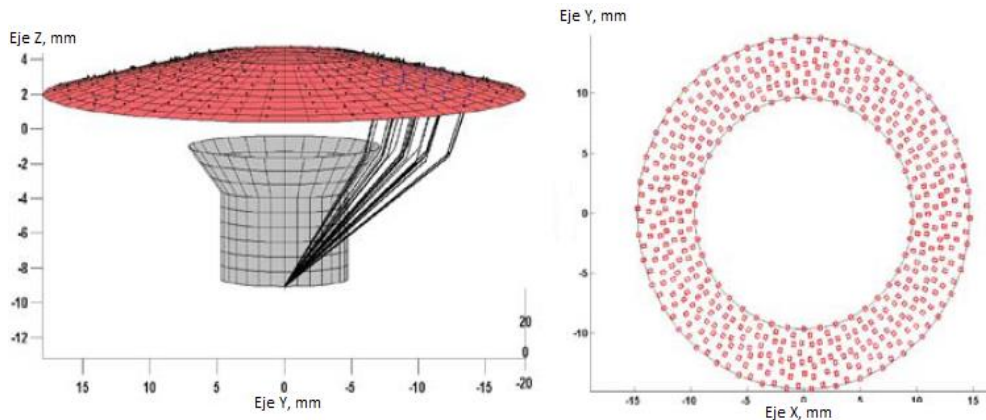
Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

**Figura 5. Sonda de conjunto en fase de grupo para inspección de tubo de diámetro pequeño que muestra ángulos de haz típicos (R/D Tech, patente de los Estados Unidos 2004/0016299AL).**



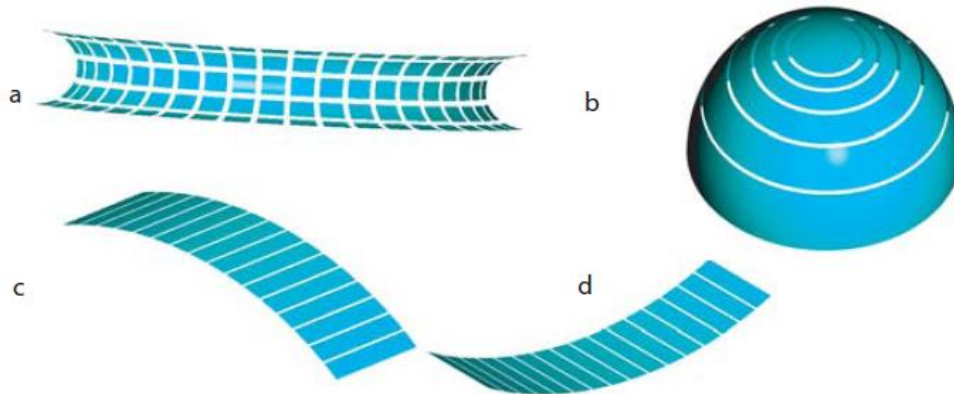
Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

**Figura 6. Sonda Array en fase cónica de matriz 2-D (Patente estadounidense RMD Tech 10-209298).**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

**Figura 7. Sondas Phased Array enfocadas mecánicamente: (a) un convexo toroidal preconfigurado, (b) cóncavo anular, (c) cóncavo lineal, (d) lineal convexo.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

**1.4.1 Sondas Lineales.** Las sondas más usadas en las aplicaciones industriales son las Arrays lineales cuyas ventajas son:

- Fácil diseño y fabricación.
- Fácil simulación y programación

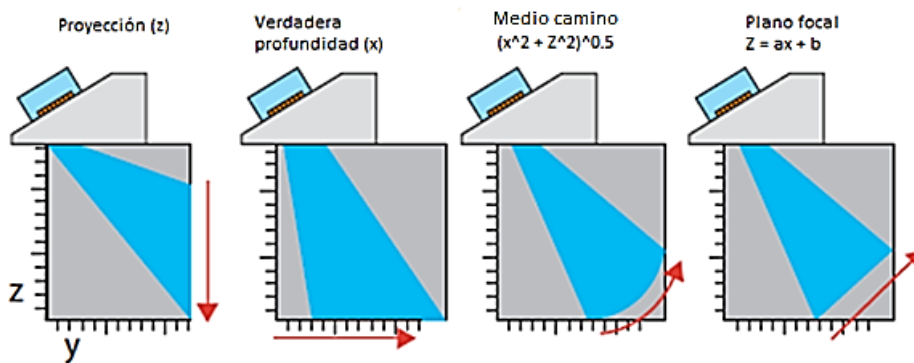
- Fáciles aplicaciones con cuñas, contacto directo e inmersión.
- Costo relativamente bajo y gran versatilidad.

Sin embargo, un tema importante a tener en cuenta en los Arrays lineales es la profundidad focal, que se define como la distancia a lo largo del eje acústico para la respuesta de amplitud máxima.

Hay cuatro tipos de opciones de enfoque (vea la figura 8):

- |   |                       |
|---|-----------------------|
| • En el eje z (profundidad variable).                 | Proyección            |
| • En el eje x (profundidad constante, angular).       | Profundidad verdadera |
| • En la trayectoria UT (plano xz).                    | Media trayectoria     |
| • En una ecuación de línea específica en el plano xz. | Plano focal           |

**Figura 8. Tipos de enfoque para sonda de Phased Array lineal.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

Las principales características de estas matrices se explican detalladamente a continuación:

- Abertura activa: Se define como la longitud activa de la sonda (A), la cual está dada por la siguiente formula.

$$A = n * e + g * (n + 1) \tag{1}$$

Donde:

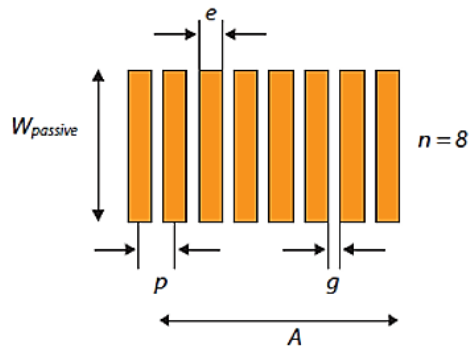
A=Abertura de apertura activa.

g= Espacio entre dos elementos adyacentes  $e < \lambda < 2$ .

n= Número de elementos.

$\lambda$ = Longitud de onda.

**Figura 9. Apertura activa y pasiva.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

Abertura activa efectiva: Es la abertura proyectada vista a lo largo de los rayos

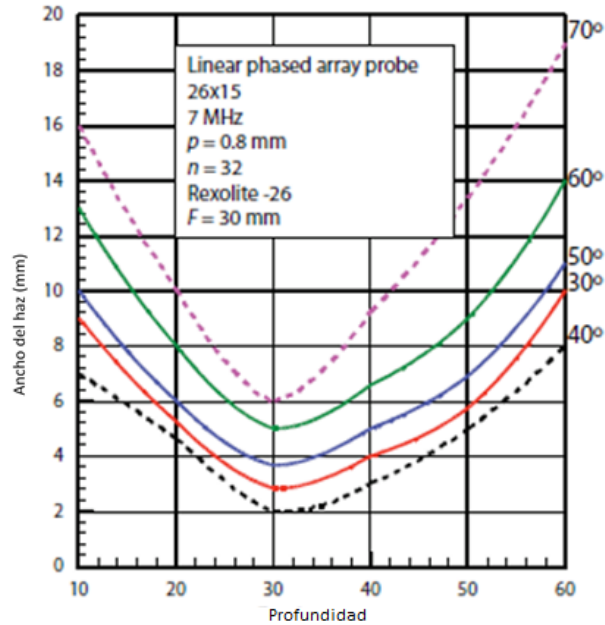
$$A_{eff} = \frac{A * \cos \beta_R}{\cos \alpha_I} \quad (2)$$

#### 1.4.2 Características del haz.

- Longitud del haz: ( $\Delta Y_{-6 \text{ dB}}$ ) Es la longitud del haz en una pantalla C-scan a una profundidad específica ( $z$ ) en un plano perpendicular al plano incidente, es decir paralelo con la apertura pasiva como se ilustra en la imagen anterior.
- Ancho del haz: El ancho del haz ( $\Delta X_{-6 \text{ dB}}$ ) es la longitud del haz en una pantalla c-scan a una profundidad  $-6$  específica ( $z$ ) en el plano incidente (paralelo a la abertura activa), ver figura 10.

El ancho del haz es de gran importancia para el tamaño de la altura y la detección de los defectos pequeños; además de que depende de la profundidad focal y el ángulo refractado. (Ver figura 10).

**Figura 10. Dependencia del ancho del haz con el ángulo y la profundidad refractados.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

Sin embargo, se puede llegar a observar que la sonda Phased Array está en movimiento para la **resolución lateral** y está en estado estático para una **resolución axial**. Cuando se tiene una corta duración de pulso y la longitud de haz es pequeña, este puede aumentar las dos resoluciones mencionadas anteriormente.

También se puede hablar de una **resolución angular**; que está definida como el valor angular mínimo entre dos barridos A, donde se pueden resolver defectos a una misma profundidad.

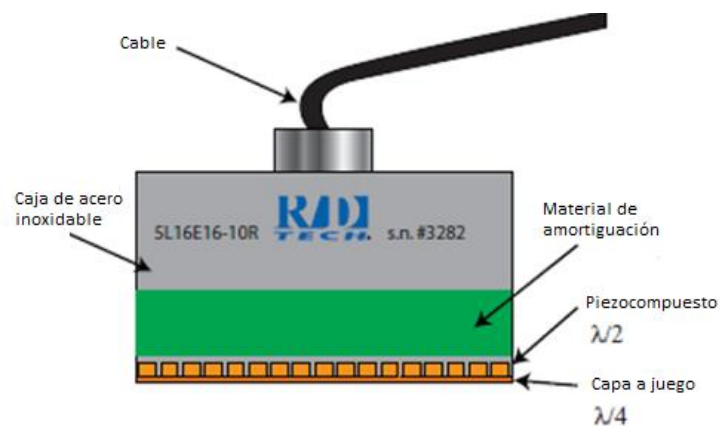
**1.4.3 Identificación de la sonda.** Las características mínimas para la identificación de la sonda (ID), véase la figura 13 son:

- Frecuencia Tipo de sonda lineal, anular, matriz, rho-theta).
- Número de elementos.
- Tamaño de apertura pasiva.
- Tamaño de paso.
- Tamaño de serie.

Otras características etiquetado opcional que pueden llegar a darse son las siguientes:

- Altura del primer elemento.
- Ángulo de cuña.
- Velocidad de cuña (material).
- Ángulo del techo (si existe).

**Figura 11. Ejemplo de identificación de sondas Phased Array.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

Diferentes tipos de sondas de Phased Array se presentan en la figura 12.

**Figura 12. Diferentes tipos de sondas de Phased Array proporcionadas por R / D Tech.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

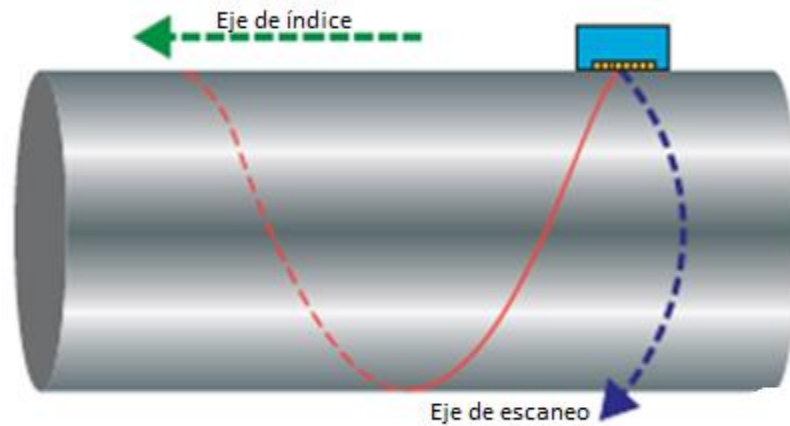
**1.4.4 Exploración helicoidal.** La exploración helicoidal se usa para inspeccionar principalmente superficies cilíndricas. El escáner realiza un movimiento helicoidal alrededor del cilindro con el fin de crear una relación entre dos codificadores independientes encargados de controlar la secuencia.

El codificador del eje de escaneo es el responsable de vigilar que la rotación sea continua a lo largo del cilindro; mientras que el codificador controla el movimiento continuo a lo largo del mismo. También se puede hacer uso de una señal de sincronización para restablecer el codificador del eje de escaneo a la posición cero al finalizar cada rotación a lo largo de la muestra a inspeccionar.

A lo que se conoce entonces con el nombre de exploración helicoidal es a la combinación de los movimientos generados entre el codificador y el codificador del eje de escaneo (ver Figura 13).

### Figura 13: Escaneo de superficie helicoidal en partes cilíndricas

(La línea roja es la ruta de adquisición).



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

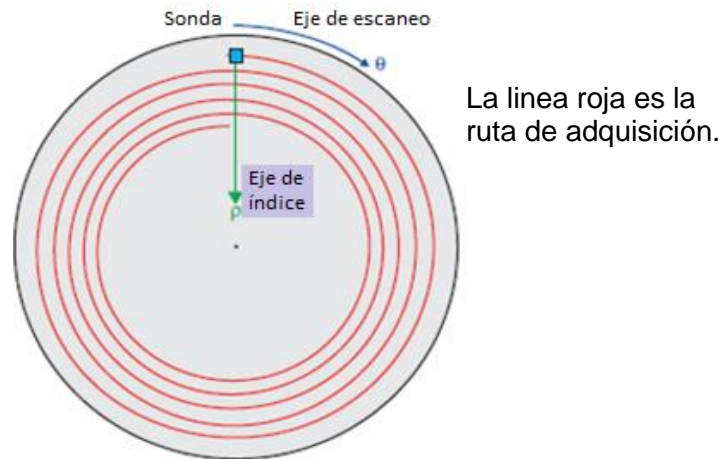
Este tipo de exploraciones se suelen utilizar si lo que se requiere es inspeccionar tuberías de gran tamaño o en su totalidad, es decir, si se desea inspeccionar el cuerpo completo de dicha muestra. Las exploraciones helicoidales se pueden realizar de dos maneras, en una se mueve y gira la tubería; mientras que en la otra se mueve el cabezal de exploración y se gira la tubería.

**1.4.5 Escaneo en espiral.** El escaneo espiral está diseñado para realizar la inspección a superficies circulares como lo son los discos, para la toma de la muestra se procede a realizar un movimiento en forma de espiral sobre la superficie del material a probar (Ver figura 14).

Dos codificadores independientes controlan la secuencia. El codificador del eje de escaneo es el encargado de controlar el ángulo ( $\theta$ ) en la rotación continua alrededor del centro de la superficie; mientras que el codificador del eje índice controla la posición ( $\rho$ ) durante el movimiento continuo a lo largo del radio.

También se puede usar una señal para reestablecer el codificador del eje de escaneo a la posición cero después de cada rotación.

**Figura 14. Patrón de escaneo de superficie en espiral.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

**1.4.6 Direcciones del haz.** La dirección del haz de la sonda de matriz en fase puede tener una dirección diferente a la del escáner y las direcciones del eje índice. Las definiciones y el valor del ángulo de estas direcciones dependen del instrumento específico a emplear y las opciones de escaneo del software (Tomoview u Omniscan). Estas direcciones están definidas por el ángulo de posición de la sonda<sup>2</sup>.

Como se puede ver en la figura 15 el conjunto de fases puede tener las direcciones mostradas en comparación con los ejes de exploración e índice. Estas direcciones se definen por el ángulo de inclinación de la sonda<sup>3</sup>.

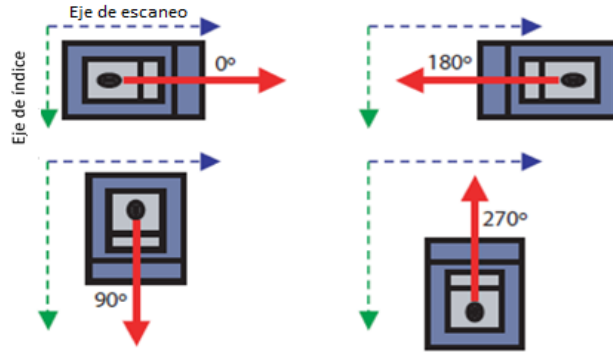
---

<sup>2</sup> OLYMPUS; scientific solutions Americas, PHASED ARRAY TESTING, Basic Theory For Industrial Applications. México. 2014

<sup>3</sup> Ibíd.

**Figura 15. Posición de la sonda y dirección del haz relacionadas con el eje de exploración y el índice.**

(El ángulo de inclinación debe ser ingresado en la calculadora de ley focal).



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

La superficie de escaneo y el tamaño de pixel de los datos de ultrasonido se pueden determinar a través de los límites de la superficie a inspeccionar y el espaciado entre las resoluciones de cada eje.

### 1.5 OTROS PATRONES DE EXPLORACIÓN

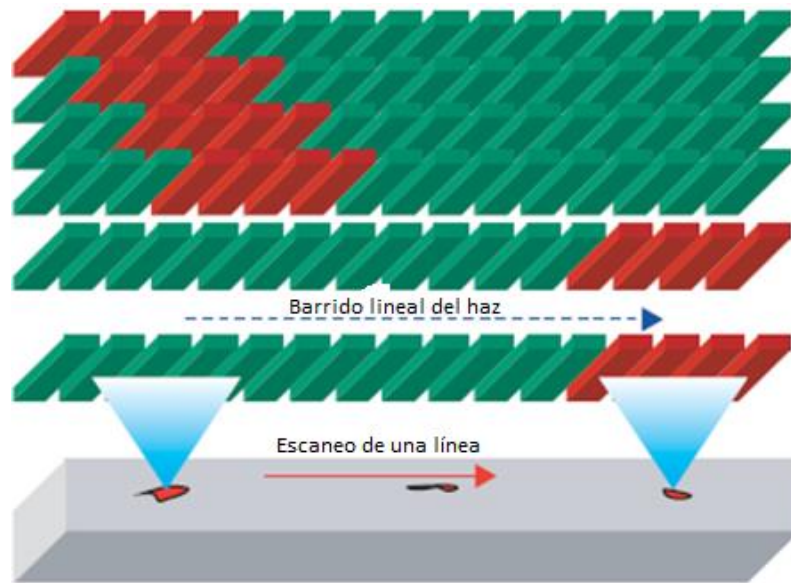
A través del movimiento de la sonda y la dirección del haz, se pueden obtener algunas variaciones en los patrones de exploración; los cuales se presentan en la siguiente tabla y se pueden observar en las figuras 16 y 17.

**Tabla 4. Dependencia de secuencia de inspección en parte, escáner de haz.**

PARTE	ESCANER	HAZ	SECUENCIA
<b>Fijo</b>	Fijo	Lineal (traslación)	Escaneo lineal
<b>Fijo</b>	Eje de índice	Lineal (rotación)	Helicoidal
<b>Traslación</b>	Fijo	Lineal (rotación)	Helicoidal
<b>Fijo</b>	Eje de escaneo	Lineal (90°)	Unidimensional

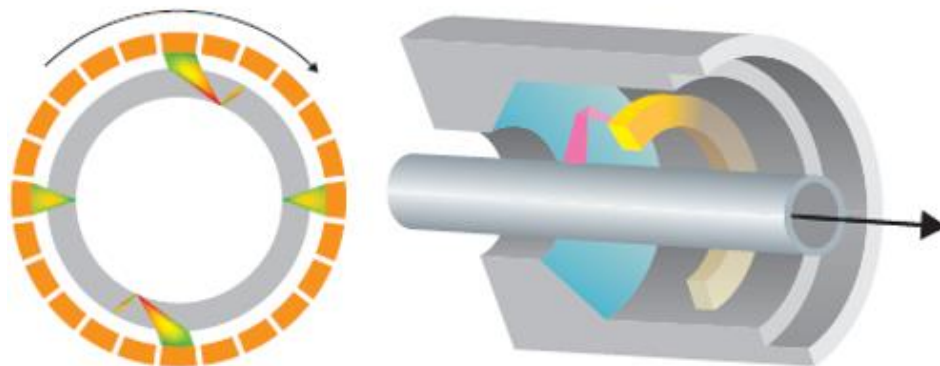
Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

**Figura 16. Inspección electrónica de haz que genera un patrón de escaneo lineal, donde la parte analizada y la sonda no se mueven.**



Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

**Figura 17. Generación de una exploración helicoidal mediante una combinación de traslación de partes y rotación de haces.**



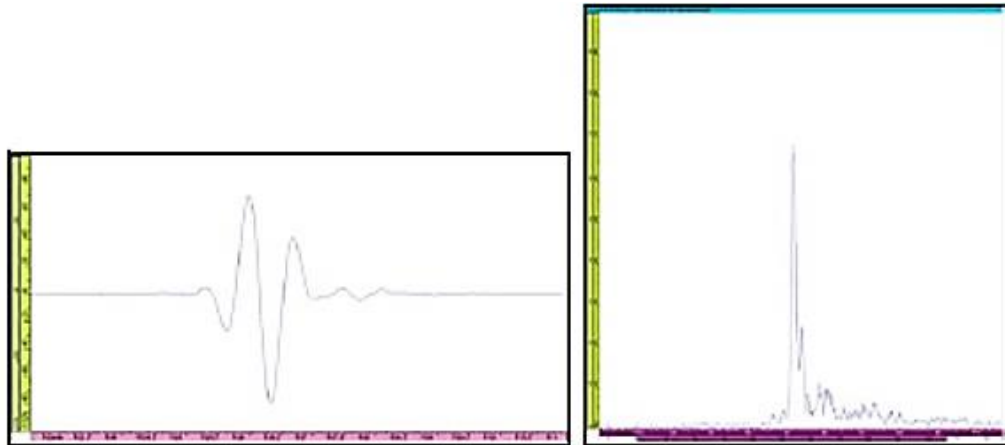
Fuente: Tomada de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

## 1.6 VISTAS ULTRASÓNICAS (SCAN-S).

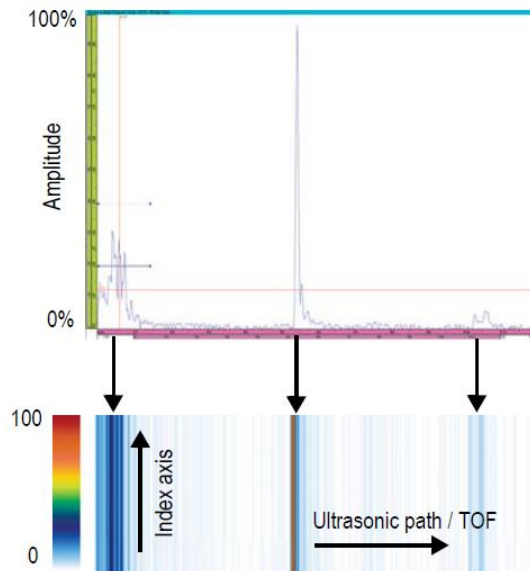
Son imágenes que están delimitadas por las diferentes vistas que se tienen entre la trayectoria de ultrasonido y los parámetros de exploración. Las vistas más relevantes se presentan a continuación con sus respectivas imágenes.

**a) SCAN A:** Forma de onda que representa la amplitud del pulso en función del tiempo de vuelo. Se puede observar como una señal de radiofrecuencia o una rectificadora.

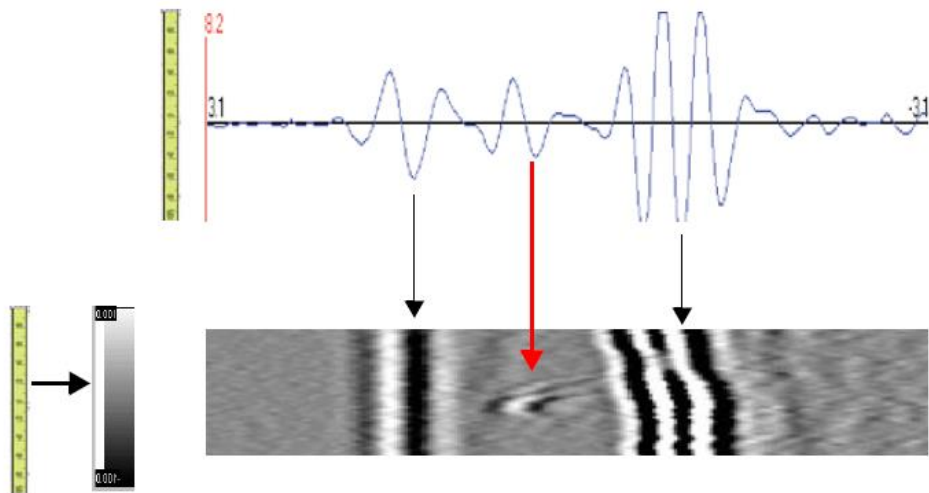
**Figura 18. Representación señal RF y su rectificación según el A-scan.**



**Figura 19. Ejemplo de una señal A-scan rectificada con codificación de color utilizada para crear un B-scan codificado por color.**

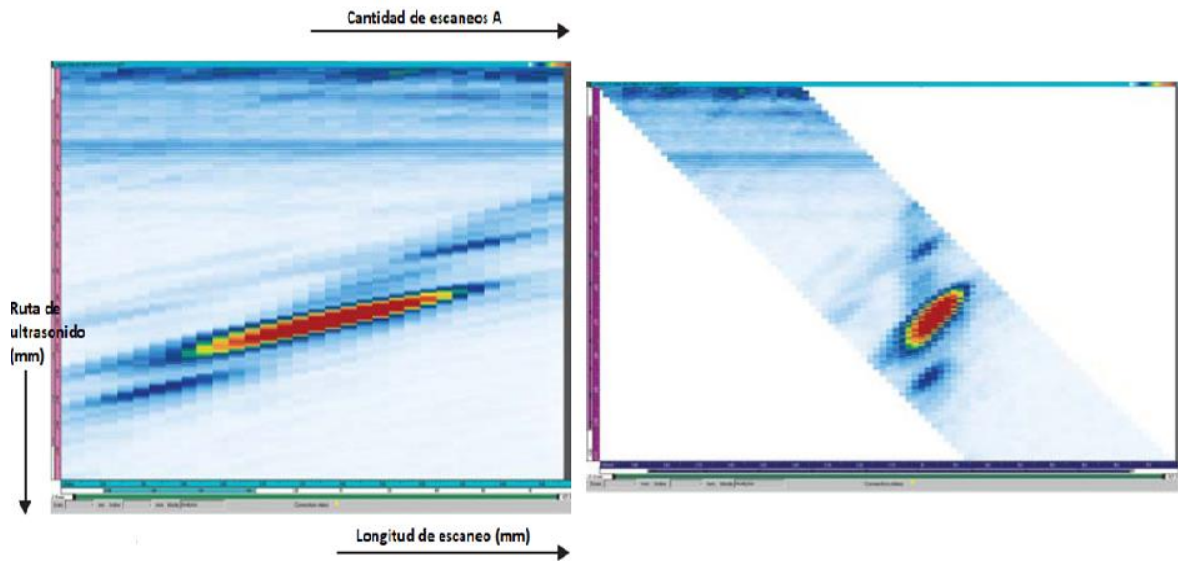


**Figura 20. Codificación de la amplitud de la señal de RF en niveles de escala de grises.**



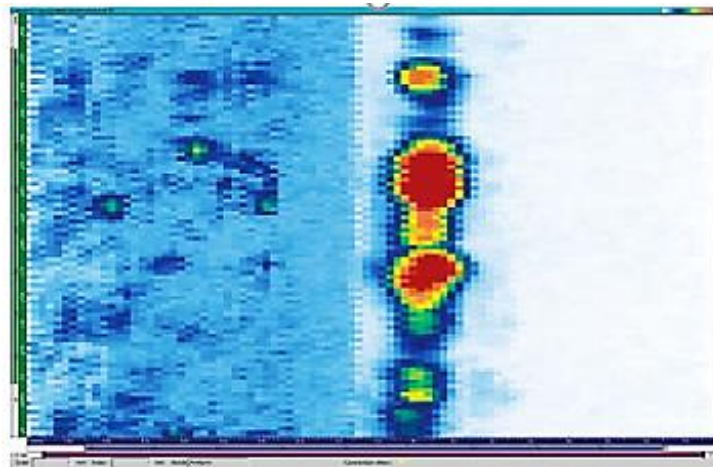
**b) SCAN B:** Vista 2-D de los datos de ultrasonidos registrados. Es una serie o forma de ondas agrupadas. Muestra el eje de exploración en función del tiempo.

**Figura 21. B-scan no corregido, vista lateral (izquierda) del componente, que muestra el reflector; Vista lateral (B-scan) corregida para el ángulo refractado (derecha).**



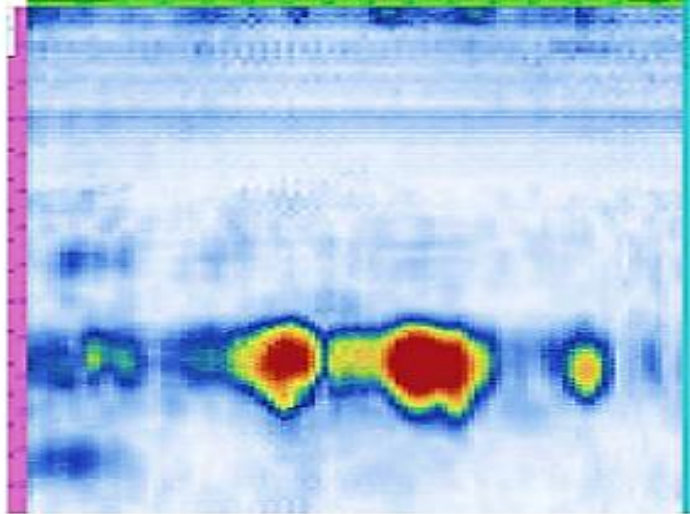
**c) SCAN C:** Es una vista 2-D superior o en plata de los datos ultrasónicos de la muestra de prueba.

**Figura 22. Ejemplo de vista superior (C-scan).**



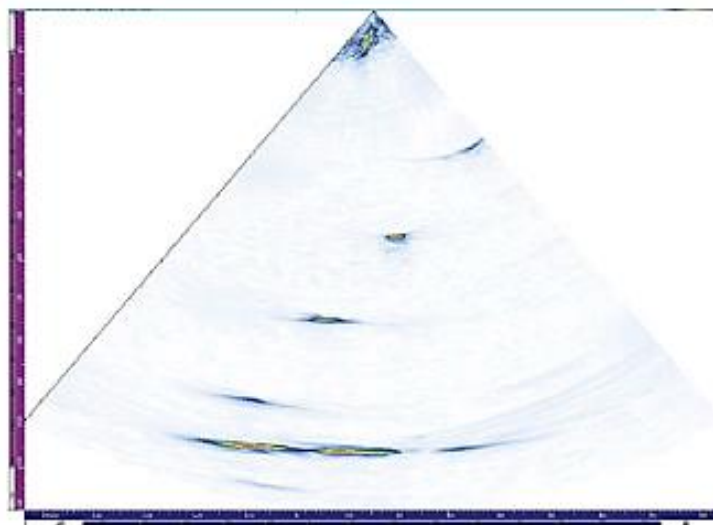
d) **SCAN D:** Es la representación gráfica en un plano 2-D de los datos. Muestra el eje del índice en función del tiempo.

**Figura 23. Ejemplo de vista superior D.**



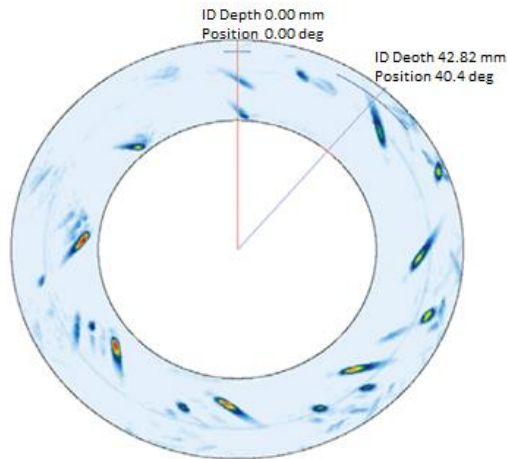
e) **SCAN S:** Representación en una vista 2-D de todas las exploraciones que se tienen desde un canal específico corregido para el retardo y el ángulo refractado.

**Figura 24. Ejemplo del s-scan**



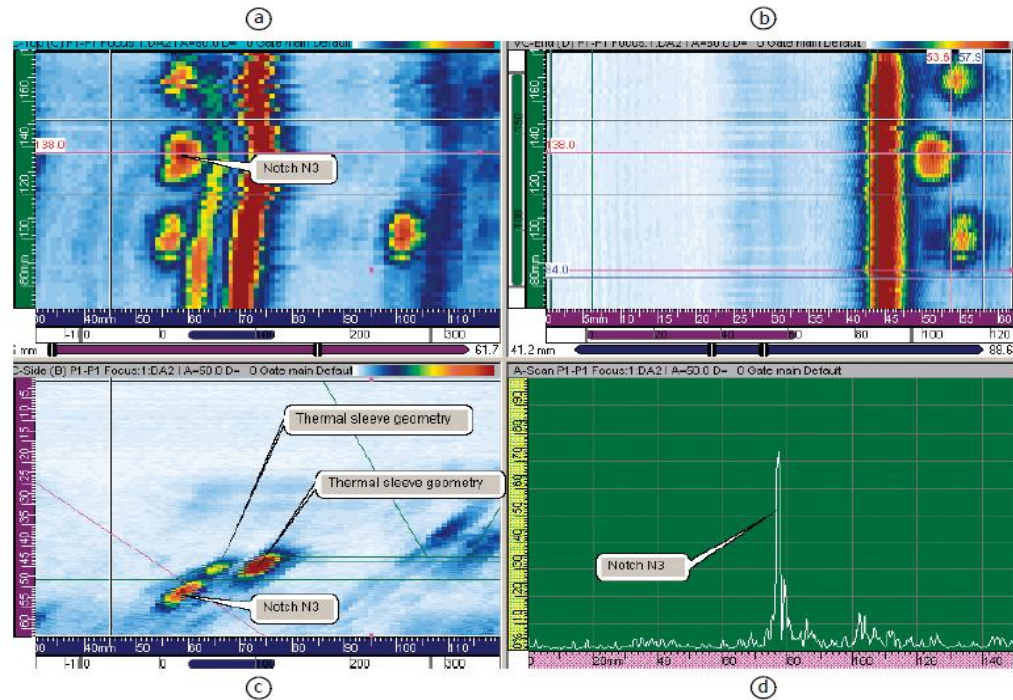
f) **VISTA POLAR** : Es una vista 2-D, útil para trazar datos de inspecciones de partes cilíndricas. Proporciona la ubicación del defecto (profundidad y ángulo ID / OD).

**Figura 25. Ejemplo de vista polar.**



g) **GRAFICOS DE BANDA**: Es una pantalla de amplitud de señal de pico en función de un tiempo, normalmente para un solo canal.

**Figura 26. Diseño de análisis con cuatro vistas para la inspección de soldadura de metal diferente con sondas de matriz en fase de baja frecuencia**  
**(a) Exploración C, (b) Exploración D, (c) Exploración B, (d) Exploración A.**



Fuente: Imágenes de la 18 a la 26 tomadas de Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications R/D Tech Guideline.

### 1.7 NORMA API 571.

La norma API RP 571, tiene como objetivo proporcionar una guía general sobre los mecanismos de daño más probables que se puedan presentar en las plantas petroquímicas y complejos industriales, tales como: tuberías, recipientes de presión y tanques de almacenamiento.

El estudio detallado de esta norma permite identificar las posibles causas de los daños, lo que permite asegurar la integridad del equipo.

A continuación, se mencionan algunos de los posibles daños que se presentan en la industria petroquímica, los cuales fueron tomados de la norma API 571<sup>4</sup>.

### **1.7.1 Mecanismos de fallas mecánicas y metalúrgicas**

#### **1.7.1.1 Erosión /Erosión –Corrosión.**

- Descripción del daño: **La erosión**, es la eliminación mecánica acelerada del material de la superficie como resultado del movimiento relativo o el impacto entre sólidos, líquidos, vapores o la combinación entre estos.

Exponer la superficie metálica a una mayor corrosión bajo la acción combinada de la erosión y la corrosión; así como la contribución de la corrosión a la erosión por medio de la eliminación de escamas es lo que se conoce como **Erosión-corrosión**.

- Materiales afectados: Todos los metales, aleaciones y materiales refractarios.
- Aspecto y morfología del daño: **La erosión y la erosión-corrosión** se caracterizan por una pérdida localizada de espesor en forma de picaduras, surcos, barrancos, olas, agujeros redondeados y valles, dejando ver consigo un patrón de pérdidas direccional. Lo cual conlleva a que las fallas ocurran en corto tiempo.

---

<sup>4</sup> COLOMBIA. NORMA API. RP 571 (Diciembre, 2003). Mecanismos de daños que afectan a los equipos fijos en la industria de refinación. P. 65-126.

**Figura 27. Erosión de una curva de retorno del calentador coker 9cr.**



Fuente: Tomada de la Norma API 571.

#### **1.7.1.2 Fatiga Mecánica.**

- Descripción del daño: **El agrietamiento** por fatiga es una forma mecánica de degradación producida cuando un componente se expone a tensiones cíclicas en un periodo de tiempo largo, provocando así fallas repentinas.  
Dichas tensiones pueden generarse debido a la carga mecánica que está muy por debajo del límite elástico del material.
- Materiales afectados: Todas las aleaciones de ingeniería están sujetas a agrietamiento por fatiga, aunque los niveles de tensión y el número de ciclos necesarios para causar fallas varían según el material.
- Aspecto o morfología del daño: La marca distintiva de una falla por fatiga es una huella dactilar de "concha de almeja" que tiene anillos concéntricos llamados "marcas de playa" que emanan del sitio de iniciación de la grieta (Figura 28). Este patrón de firma resulta de las "olas" de propagación de grietas que ocurren durante cada ciclo por encima de la carga del umbral. Estas grietas concéntricas

continúan propagándose hasta que el área de la sección transversal se reduce hasta el punto donde ocurre la falla debido a la sobrecarga.

**Figura 28. Superficie de fractura por fatiga de una tubería de acero al carbono.**



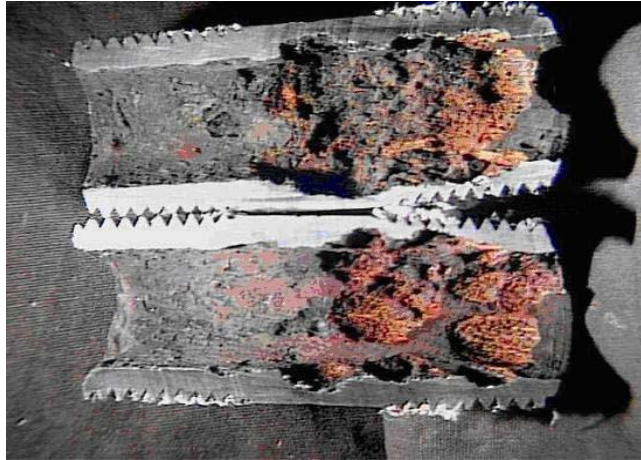
Fuente: Tomada de Norma API 571

### **1.7.3 Pérdida de espesor uniforme o localizada**

#### **1.7.3.1 Corrosión galvánica**

- Descripción del daño: Es la forma de corrosión que puede darse en uniones de metales diferentes, cuando se unen en ambientes inadecuados como zonas de humedad o suelos que contienen humedad.
- Material afectado: Todos los metales, excepto los metales nobles.
- Aspecto o morfología del daño: este daño se presenta cuando los materiales están unidos por conexiones soldadas o atornilladas. El material más activo puede sufrir una pérdida generalizada de espesor, generando así una apariencia de grieta, surco o corrosión por picaduras; esto depende de la fuerza impulsora, la conductividad y la relación de áreas anódica / catódica relativa; en donde dependiendo de la conductividad de la solución la corrosión puede ser más alta en el ánodo.

**Figura 29. Corrosión galvánica de un Niple de acero al carbono en un recipiente SS en servicio de agua caliente.**



Fuente: Tomada de Norma API 571

#### **1.7.3.2 Corrosión atmosférica.**

- Descripción del daño: **La corrosión atmosférica** es una forma de corrosión que ocurre a partir de humedades asociadas a las condiciones atmosféricas. Los ambientes rurales secos causan muy poca corrosión, en relación con los ambientes marinos y los ambientes industriales contaminados por productos que transporta en aire.
- Materiales afectados: Acero al carbono, aceros de baja aleación y aluminio aleado con cobre.
- Aspecto o morfología del daño: Este tipo de daño es general o localizado, dependiendo de si la humedad está atrapada o no. Sin embargo, si no hay revestimiento o si hay una falla en el recubrimiento, la corrosión o la pérdida de espesor pueden llegar a ser generales. De este modo las fallas de recubrimiento localizadas tenderán a promover la corrosión. Y la pérdida de metal puede no ser visualmente evidente, aunque normalmente se forma una escala distintiva de óxido de hierro (óxido rojo).

### **1.7.3.3 Corrosión del agua de refrigeración.**

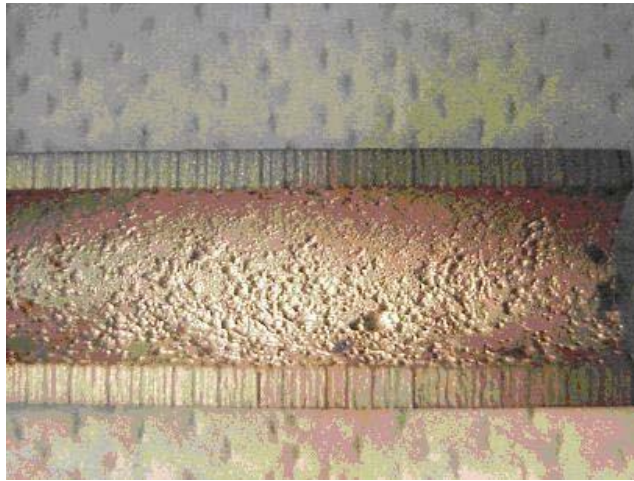
- Descripción del daño: Corrosión general o localizada de aceros al carbono y otros metales causados por sales disueltas, gases, compuestos orgánicos o actividad microbiológica.
- Materiales afectados: Acero al carbono, todos los grados de acero inoxidable, cobre, aluminio, titanio y aleaciones a base de níquel.
- Aspecto o morfología del daño: La corrosión del agua de refrigeración puede dar lugar a muchas formas diferentes de daños, incluida la corrosión general, la corrosión por picadura, la MIC, el agrietamiento por corrosión bajo tensión y el ensuciamiento.

La corrosión general o uniforme del acero al carbono ocurre cuando hay oxígeno disuelto. Mientras que la corrosión localizada puede ser el resultado de corrosión debajo del depósito, corrosión en grietas o corrosión microbiológica.

Sin embargo, en los depósitos o hendiduras se puede generar una corrosión insuficiente o grietas de cualquiera de los materiales afectados. También la corrosión ondulada o lisa en las entradas / salidas de las boquillas y las entradas de los tubos puede deberse a corrosión, erosión o abrasión inducidas por el flujo.

La corrosión en las áreas de soldadura ERW aparecerá como surco a lo largo de las líneas de fusión de la soldadura. De allí que se pueda requerir el análisis metalúrgico de muestras de tubo para confirmar el modo de falla.

**Figura 30. corrosión del agua de refrigeración en el ID de un tubo intercambiador de calor CS que funciona a 86° F (30 °C).**



Fuente: Norma API 571

#### **1.7.3.4 Corrosión de CO<sub>2</sub>.**

- Descripción del daño: La corrosión por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se produce cuando el CO<sub>2</sub> se disuelve en agua para formar ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). El ácido puede reducir el pH y cantidades suficientes pueden promover corrosión general y / o corrosión por picadura de acero al carbono.
- Materiales afectados: Acero al carbono y aceros de baja aleación.
- Aspecto o morfología del daño: Adelgazamiento localizado y / o corrosión por picadura de acero al carbono. El acero al carbono puede sufrir picaduras y ranuras profundas en áreas de turbulencia. Sin embargo, la corrosión generalmente ocurre en áreas de turbulencia e impacto y algunas veces en la raíz de las soldaduras de las tuberías.

**Figura 31: Corrosión con CO<sub>2</sub> de una línea de flujo de producción de petróleo y gas de acero al carbono. Análisis, "McGraw-Hill, Inc., NY, 1991, pp. 259-263.**

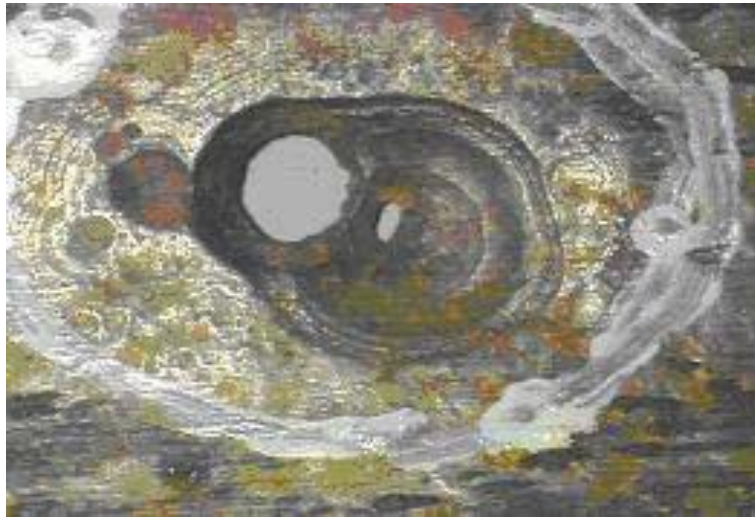


Fuente: Tomado de Norma API 571

#### **1.7.3.5 Corrosión inducida microbiológicamente (MIC).**

- Descripción del daño: Una forma de corrosión causada por organismos vivos como bacterias, algas u hongos; se asocia a menudo con la presencia de tubérculos o sustancias orgánicas viscosas.
- Materiales afectados: Los materiales de carbono y aceros de baja aleación, serie 300 SS y serie 400 SS, aluminio, cobre y algunas aleaciones a base de níquel.
- Aspecto o morfología del daño: La corrosión MIC generalmente se observa como picaduras localizadas debajo de depósitos o tubérculos que protegen a los organismos. Este daño a menudo se caracteriza por fosas en forma de copa dentro de pozos en acero al carbono o cavidades sub-superficiales en acero inoxidable.

**Figura 32. Corrosión de picadura en el I.D. de una línea de crudo sour CS de 6 pulgadas después de 2,5 años de servicio.**



Fuente: Tomado de Norma API 571

#### **1.7.3.6 Corrosión cáustica.**

- Descripción del daño: Corrosión localizada debido a la concentración de sales cáusticas o alcalinas que generalmente se produce en condiciones de evaporación o de alta transferencia de calor. Sin embargo, la corrosión general también puede ocurrir dependiendo de la fuerza de la solución alcalina o cáustica.
- Materiales afectados: Principalmente acero al carbono, aceros de baja aleación y serie 300 SS.
- Aspecto o morfología del daño: Este tipo de corrosión está caracterizado por pérdida de metal localizado que puede aparecer como surcos en un tubo de caldera o áreas localmente adelgazadas bajo depósitos aislantes. Sin embargo, los depósitos pueden aportar a la continuación del daño, y por esto puede ser necesario sondear áreas sospechosas con un instrumento filoso. También se pueden llegar a generar algunas ranuras a lo largo de la línea de flotación, que es donde se concentran los corrosivos.

En tubos verticales, esto puede aparecer como una ranura circunferencial. En tubos horizontales o inclinados, el surco puede aparecer en la parte superior del tubo o como surcos longitudinales en lados opuestos del tubo. La exposición a una solución cáustica de alta resolución puede provocar una corrosión general del acero al carbono por encima de 175 ° F (79 ° C) y tasas de corrosión muy altas por encima de 200 ° F (93 ° C).

**Figura 33. I.D. depósitos en el tubo de la caldera CS con daños por corrosión cáustica.**



Fuente: Tomada de Norma API 571

#### **1.7.4 Corrosión a alta temperatura [400°F (204°C)].**

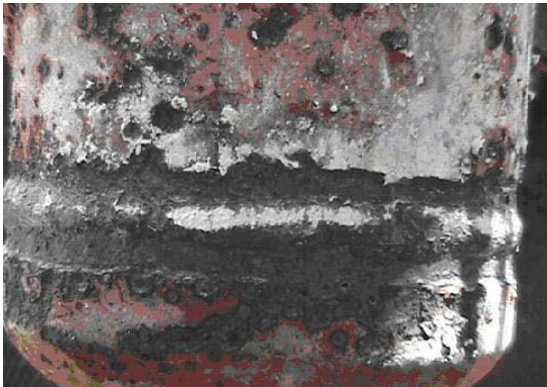
##### **1.7.4.1 Oxidación**

- Descripción del daño: El oxígeno reacciona con el acero al carbono y otras aleaciones a alta temperatura, convirtiendo el metal en una escala de óxido. Esto se genera con frecuencia la presencia de oxígeno en el aire circundante (aproximadamente 20%) utilizado para la combustión en calentadores y calderas quemadas.
- Materiales afectados: Todos los materiales a base de hierro, incluidos el acero al carbono y los aceros de baja aleación, tanto fundidos como forjados. Así como

todas las 300 Series SS, 400 Series SS y las aleaciones a base de níquel también se oxidan en diversos grados, dependiendo de la composición y la temperatura.

- Aspecto o morfología del daño: La mayoría de las aleaciones, incluidos los aceros al carbono y los aceros de baja aleación, sufren un adelgazamiento general debido a la oxidación. Generalmente, el componente se cubrirá en la superficie exterior con una escala de óxido, dependiendo de la temperatura y el tiempo de exposición (Figura 34).

**Figura 34. Oxidación del O.D. de una línea de transferencia de acero al carbono.**



Fuente: Tomada de Norma API 571

### **1.74.2 Sulfuración**

- Descripción del daño: Es la corrosión de acero al carbono y otras aleaciones resultantes de su reacción con compuestos de azufre en ambientes de alta temperatura. En donde la presencia de hidrógeno acelera la corrosión.
- Materiales afectados: Todos los materiales a base de hierro, incluidos el acero al carbono y los aceros de baja aleación, 300 Series SS y 400 Series SS. Así como las aleaciones a base de níquel que se ven afectadas en diversos grados según la composición, especialmente el contenido de cromo.

- Aspecto o morfología del daño: Dependiendo de las condiciones del servicio, la corrosión suele ser en forma de dilución uniforme, pero también puede producirse como corrosión localizada o daño por corrosión por erosión a alta velocidad. Esto genera que una escala de sulfuro cubra la superficie de los componentes, y que los depósitos sean más gruesos o delgados dependiendo de la aleación, la corrosividad de la corriente, las velocidades del fluido y la presencia de contaminantes (Figura 35).

**Figura 35. Fallo de sulfidación del codo de la tubería.**



Fuente: Tomada de Norma API 571.

### **1,7.4.3 Carburización**

- Descripción del daño: El carbono se absorbe en un material a temperatura elevada mientras está en contacto con un material carbonoso o un ambiente de cementación.
- Materiales afectados: Acero al carbono y aceros de baja aleación, serie 300 SS y serie 400 SS, aceros inoxidable fundidos, aleaciones a base de níquel con contenido de hierro significativo (por ejemplo, aleaciones 600 y 800) y aleaciones HK / HP.
- Aspecto o morfología del daño: La profundidad de la carburación se puede confirmar mediante metalografía, aumentos sustanciales de la dureza y la

perdida de ductilidad. En una etapa más avanzada, puede haber un aumento volumétrico en el componente afectado; lo que puede generar un cambio (aumento) en el nivel de ferromagnetismo en algunas aleaciones. La carburación da como resultado la formación de carburos metálicos que agotan la matriz circundante del elemento formador de carburo.

#### **1.7.4.4 Descarburación.**

- Descripción de los daños: Una condición en la que el acero pierde fuerza debido a la eliminación de carbono y carburos dejando sólo una matriz de hierro. La descarburación se produce durante la exposición a altas temperaturas, durante el tratamiento térmico, la exposición a los incendios, o de un servicio de alta temperatura en un entorno de gas.
- Materiales afectados: Los aceros al carbono y aceros de baja aleación.
- Apariencia o morfología de los daños: El daño puede ser verificado mediante metalografía. Puesto que este se produce en la superficie expuesta al medio ambiente de gas, pero en casos extremos puede ser a través de la pared. La capa descarburada estará libre de fases de carburo. acero al carbono será de hierro puro.

#### **17.4.5 Nitruración**

- Descripción de los daños: La capa superficial es dura y quebradiza, además se genera debido a la exposición a corrientes de proceso de altas temperaturas con un alto contenido de compuestos de nitrógeno (amoníaco o cianuros); lo que produce a su vez algunas aleaciones, esto en particular bajo condiciones reductoras.
- Materiales afectados: Los aceros al carbono, aceros de baja aleación, Serie 300 SS y 400 de la serie SS.

- Apariencia o morfología de los daños: La Nitruración por lo general se limita a la superficie de la mayoría de los componentes y tendrá un aspecto gris oscuro pero opaco. Sin embargo, durante las etapas iniciales de la nitruración, el daño sólo puede ser visto con metalografía como se muestra en la figura 39.

La nitruración de aceros de baja aleación que contienen hasta 12% de cromo se acompaña de un aumento de volumen. La capa nitrurada tiende a agrietarse y tener presencia de escamas.

De igual forma una temperatura por encima de 770°F (410°C), preferencial de grano límite de nitruración puede conducir a microfisuración y fragilidad. Pero a diferencia de esto los aceros inoxidable tienden a formar capas delgadas y quebradizas que pueden agrietarse debido a una tensión aplicada.

**Figura 36. Nitrurada termopozo 5Cr-0,5Mo de una planta de síntesis de amoníaco con agrietamiento de la superficie.**



Fuente: Tomada de Norma API 571.

#### **1.7.4.5 Agrietamiento**

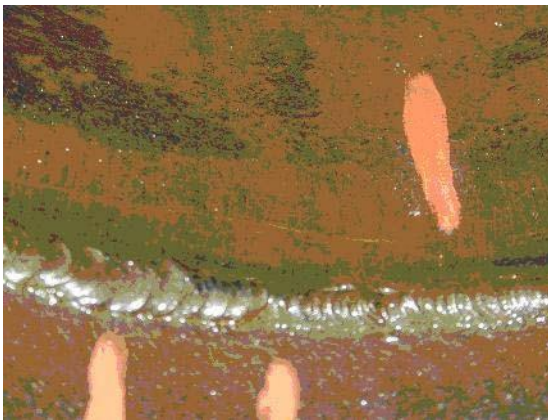
- Descripción de los daños: También llamada estrés Carbonato de agrietamiento por corrosión (a menudo denominado agrietamiento como carbonato), es el término que se aplica a la superficie rotura o grietas que se producen adyacentes

a las soldaduras de acero al carbono bajo la acción combinada de tensión de tracción y la corrosión en los sistemas que contienen carbonato.

- Materiales afectados: acero al carbono y aceros de baja aleación.
- Apariencia o morfología de los daños: Los agrietamientos o Carbonato de craqueo normalmente se propagan en paralelo a la soldadura en el metal de base adyacente, pero también puede ocurrir en el depósito de soldadura o en las zonas afectadas por el calor.

El patrón de agrietamiento observado en la superficie de acero se describe a veces como una tela de araña de grietas pequeñas, que a menudo inician por interconexión con los defectos relacionados con la soldadura que sirven como elevadores de esfuerzo locales. Estas grietas pueden confundirse fácilmente con SSC o SOHIC, sin embargo, las grietas de carbonato suelen estar más lejos de la punta de la soldadura y tener múltiples grietas paralelas (Figura 37).

**Figura 37. Carbonato de grietas en y adyacente a la soldadura en una soldadura de tuberías no PWHT en una planta de gas FCC después de 15 años de servicio.**



Fuente: Tomada de Norma API 571.

## **2. INSPECCIÓN DE LOS TRAMOS DE TUBERÍA**

En este capítulo se analizará cada uno de los tramos o muestras, las cuales pertenecen a tuberías ya usadas en campo y que fueron desechadas he inspeccionadas con otras técnicas. Estas muestras a su vez fueron suministradas por el Ingeniero Ludwig Alfonso López Carreño, encargado del laboratorio de Ingeniería de Materiales del ICP-ECOPETROL.

Después de realizar una inspección visual, se determinará qué puntos de cada tramo de tubería son los óptimos para hacer uso de la tecnología.

La información de los campos utilizada para realizar las tablas fue tomada del MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA - DIRECCION DE HIDROCARBUROS. LISTADO DE POZOS, CAMPOS Y CONTRATOS VIGENTES DE EXPLORACION.

### **2.1 MUESTRA 12-082:**

- Identificación de la muestra: Tubería perteneciente al pozo Llanito -77.
- Equipo/componente: Tubing 2 7/8"
- Material: Aceros al carbono – N80.
- Tamaño de la muestra: 25 cm.
- Planta / pozo/ sistema: Llanito 77; Sistema de Bombeo Mecánico.
- Campo /distrito: Llanito.
- Fecha de falla: 1 de marzo de 2012.
- Tiempo de servicio: 3 meses y 27 días.
- Profundidad de la falla: 5475 ft.

- Fluidos: A 5475 ft se encuentra una arena de alta permeabilidad con agua y fluido corrosivo con  $CO_2$ .

**Figura 38. Muestra 12-082**



Información del campo:

**Tabla 5. Información del campo.**

<b>Nombre del campo</b>	Campo Llanito
<b>Ubicación</b>	Departamento: Santander Municipio: Barrancabermeja
<b>Cuenca</b>	Valle medio del Magdalena (VMM)
<b>Formación</b>	Mugrosa
<b>Empresa operadora</b>	Ecopetrol S.A
<b>Hidrocarburos producidos</b>	Petróleo y gas.

## 2.2 MUESTRA 13-037

- Identificación de la muestra: Tubería perteneciente al pozo Cantagallo - 23
- Equipo / componente: Tubing 2 7/8".
- Material: Aceros al carbono – N80.
- Tamaño de la muestra: 32.5 cm.
- Sistema de Bombeo: Sistema de Bombeo Mecánico.
- Campo /distrito: Yaruguí - Cantagallo.
- Fecha de falla: 10 de Marzo de 2013.
- Profundidad de la falla: 6186 ft.

- Fluidos: La sección de tubería recibida presenta en la mayoría de su superficie externa, evidencias de una pérdida de material por corrosión de tipo general con acumulación de óxidos y productos de corrosión de coloración marrón entre clara y oscura.; el tramo de tubería largo presenta una pérdida de material localizada en la zona del up-set.

**Figura 39 Muestra 13-037**



Información del campo:

**Tabla 6. Información del campo.**

<b>Nombre del campo</b>	Campo Yaruguí – Cantagallo
<b>Ubicación</b>	Departamento: Bolívar-Santander Municipio: Cantagallo - puerto Vilches
<b>Cuenca</b>	Valle medio del Magdalena (VMM)
<b>Formación</b>	La paz – Mugrosa
<b>Empresa operadora</b>	Ecopetrol S.A
<b>Hidrocarburos producidos</b>	Petróleo

**2.3 MUESTRA 14 – 057:**

- Identificación de la muestra: Tubería perteneciente al pozo La Cira 3051.
- Material: Aceros al carbono – N80.
- Tamaño de la muestra: 52 cm
- Campo /distrito: La Cira Infantas
- Tiempo de servicio: 7 meses

- Fluidos: Fluidos corrosivos.

**Figura 40: Muestra 14-057**



Información del campo:

**Tabla 7. Información del campo.**

<b>Nombre del campo</b>	La Cira Infantas
<b>Ubicación</b>	Departamento: Santander. Municipio: Barrancabermeja. Corregimiento: El Centro.
<b>Cuenca</b>	Valle medio del Magdalena (VMM)
<b>Formación</b>	Mugrosa – Colorado
<b>Empresa operadora</b>	Ecopetrol S.A – Occidental de Colombia
<b>Hidrocarburos producidos</b>	Petróleo y gas

#### **2.4 MUESTRA 1405 – 084**

- Identificación de la muestra: Tubería perteneciente al pozo Infantas-2062.
- Equipo/componente: Tubería lc. Sección de 2 3/8”.
- Material: Aceros al carbono – N80.
- Tamaño de la muestra: 56 cm.
- Tiempo de servicio: 11 meses.
- Profundidad de la falla: 5475 ft.

- Fluidos: El campo presenta altos cortes de agua, 90% del agua con características corrosivas.

**Figura 41. Muestra 1405-084**



Información del campo:

**Tabla 8. Información del campo.**

<b>Nombre del campo</b>	La Cira Infantas
<b>Ubicación</b>	Departamento: Santander. Municipio: Barrancabermeja. Corregimiento: El Centro.
<b>Cuenca</b>	Valle medio del Magdalena (VMM)
<b>Formación</b>	Mugrosa – Colorado
<b>Empresa operadora</b>	Ecopetrol S.A – Occidental de Colombia
<b>Hidrocarburos producidos</b>	Petróleo y gas

## 2.5 RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN VISUAL

**Tabla 9. Tabla de resultados obtenidos de la inspección visual.**

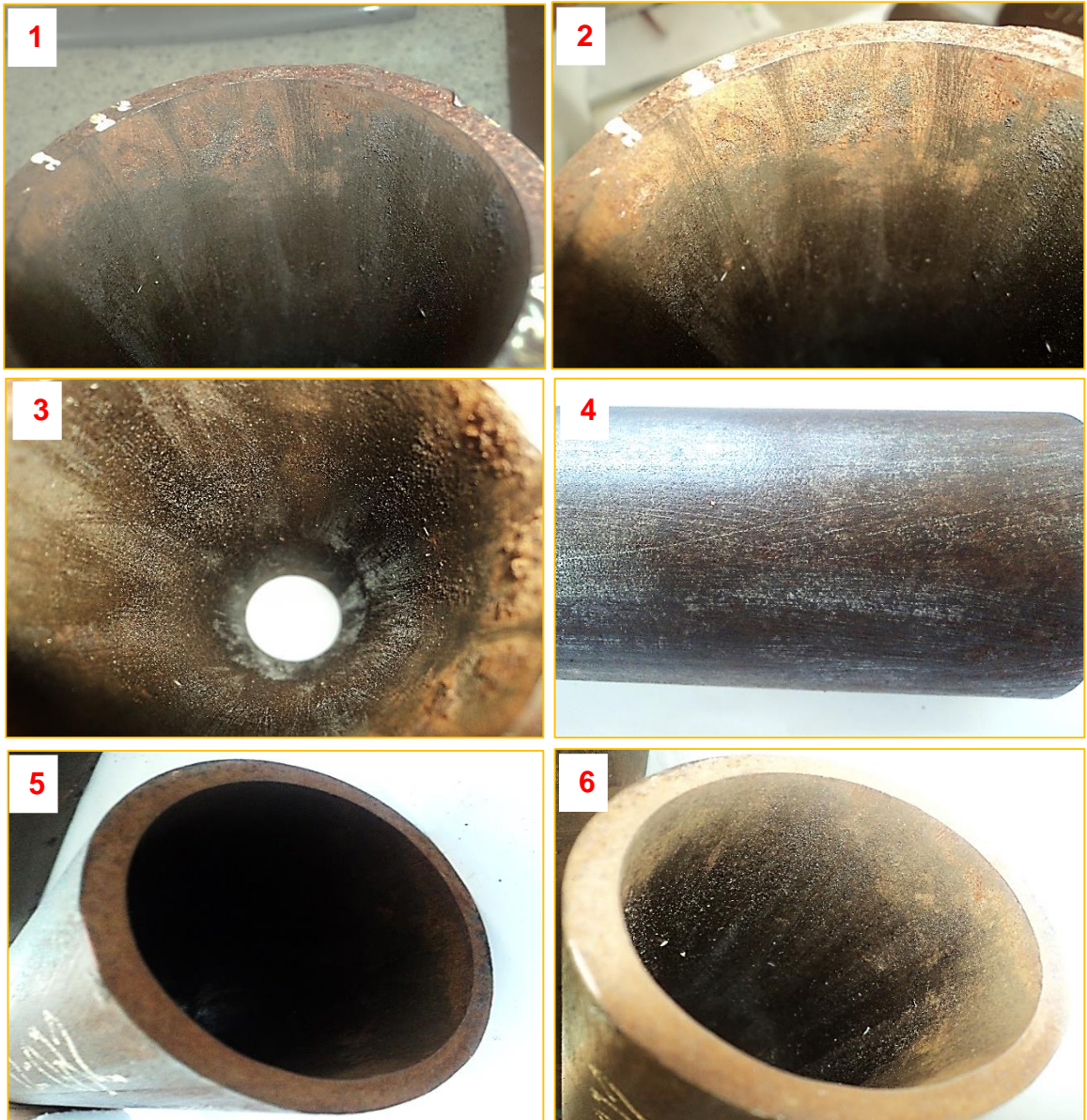
Muestra	Muestra 12-082	Muestra 13-037	Muestra 14-05	Muestra 1405-084
Tipo de daño				
<b>Corrosión</b>	MODERADA	ALTA	ALTA	ALTA
<b>Picaduras</b>	NO	MEDIA	ALTA	NO
<b>Fisuras</b>	NO	SI	NO	SI
<b>Abolladuras</b>	NO	NO	SI	NO
<b>Erosión</b>	NO	SI	NO	SI
<b>Observaciones:</b>	En esta muestra se observa una costura, la cual es producto de la soldadura.	Se aprecia alto contenido de corrosión y un desgaste alto en la parte de la rosca, también presenta un relieve producto de daño mecánico.	Esta muestra presenta gran número de picaduras en toda la superficie debido a agentes erosivos a los que estaba expuesta. Al igual que una abolladura producto de un daño mecánico.	Esta muestra presenta un desgaste total en un punto; producto de la alta corrosión a la que estuvo expuesta, así como una canalización en su parte interna debido a los fluidos que transportaba.

**2.5.1 Fotografías para inspección visual detallada.** A continuación, se presentan las fotografías tomadas para tener claridad en el cómo se realiza la inspección visual y se desarrolla el llenado de la tabla 8 elaborada por los autores y que se encuentra anteriormente. Como se puede observar en las imágenes se da evidencia a los daños que estas presentan y un acercamiento de los mismos.

- **MUESTRA 12-082**

La superficie externa de este tramo de tubería se encuentra en un estado aceptable, pero con algunos procesos de oxidación en su interior como se presenta en la figura 42.

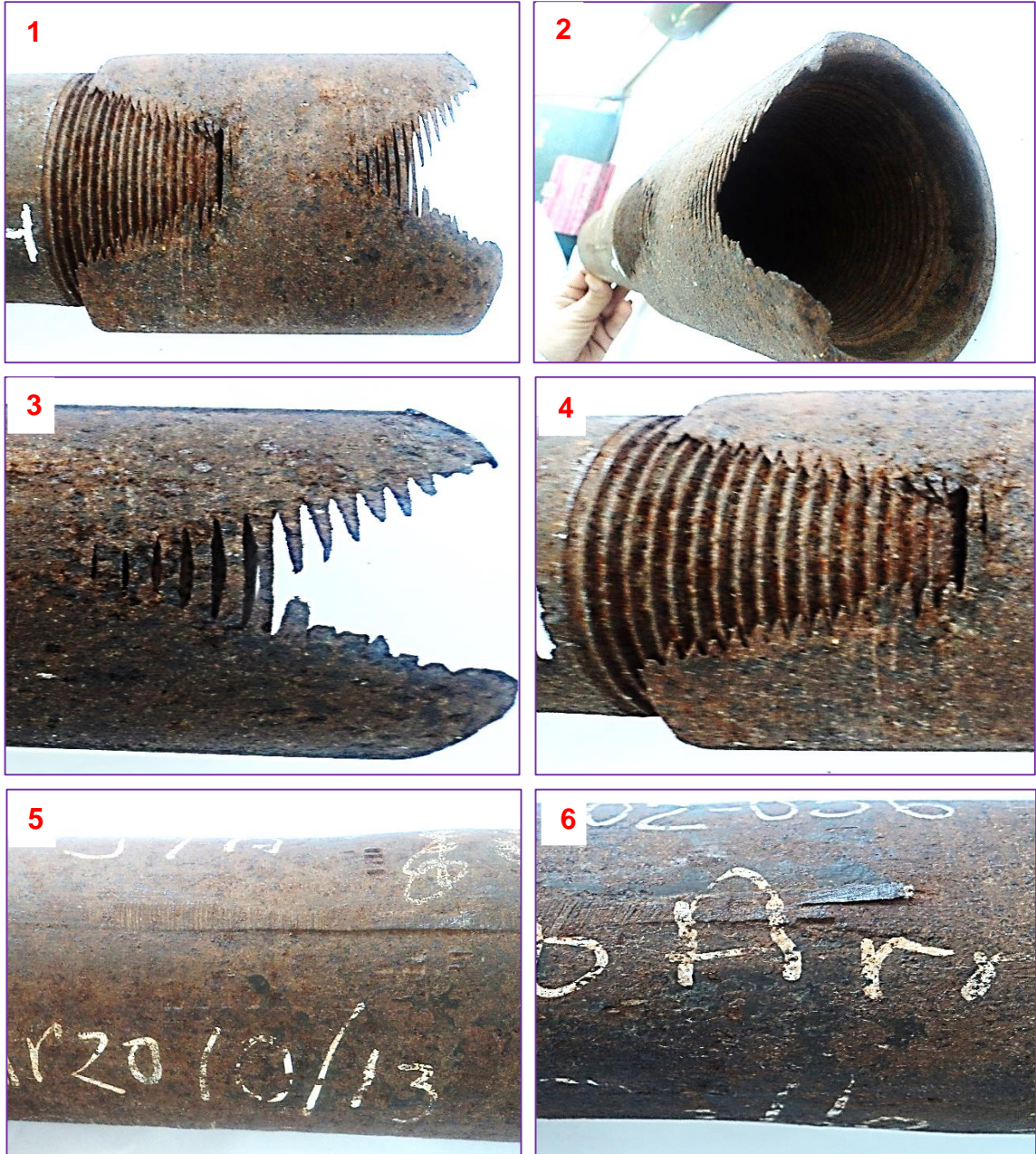
**Figura 42. Fotografías de la 1 a la 6 correspondientes a la muestra 12-082.**



- **MUESTRA 13-037**

Esta es una tubería se observa alta presencia de daño en la zona del up-set, debido a la corrosión que tiene.

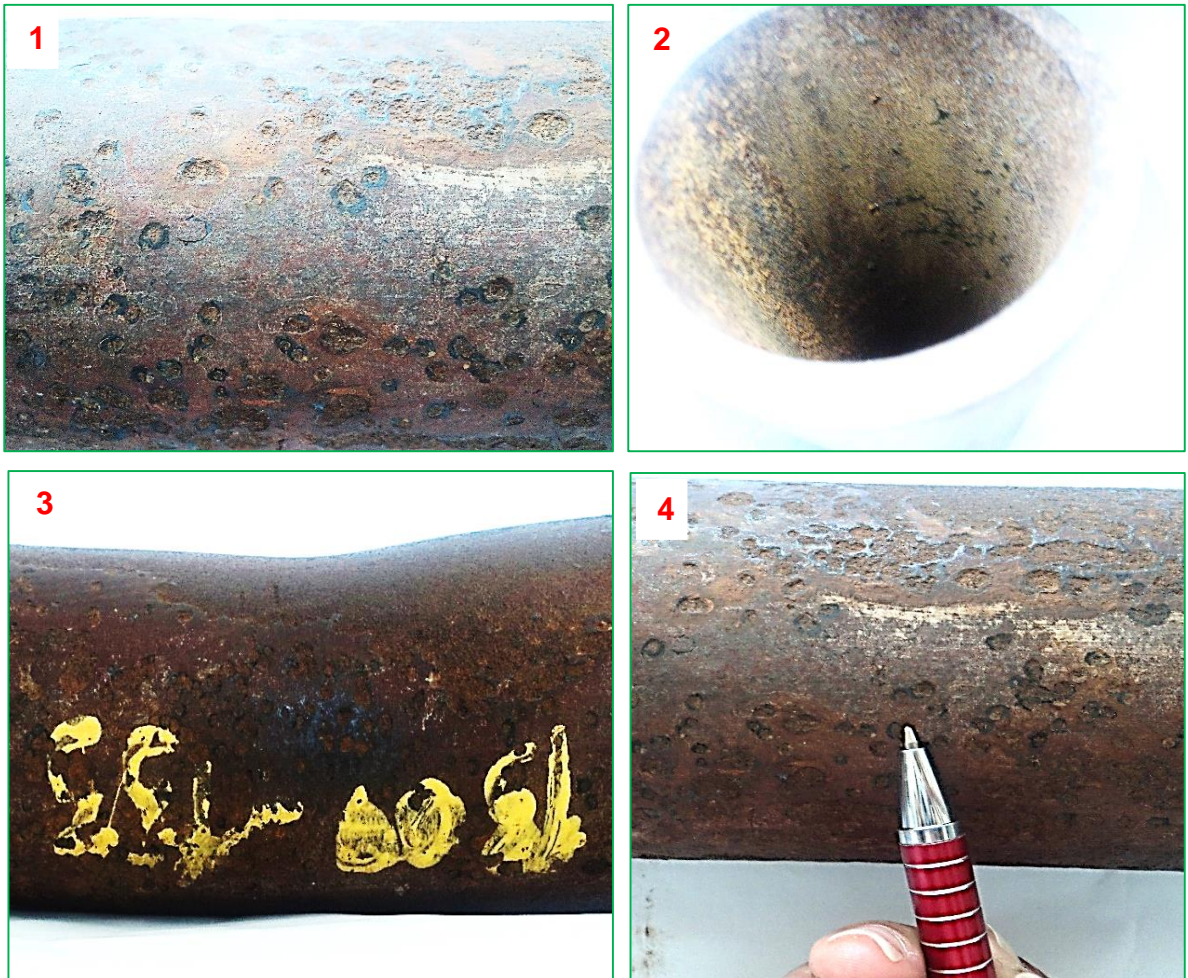
**Figura 43: Fotografías de la 1 a la 6 correspondientes a la muestra 13-037.**



- **MUESTRA 14-057**

Tramo de tubería con presencia de picaduras en su exterior y cambios de espesor.

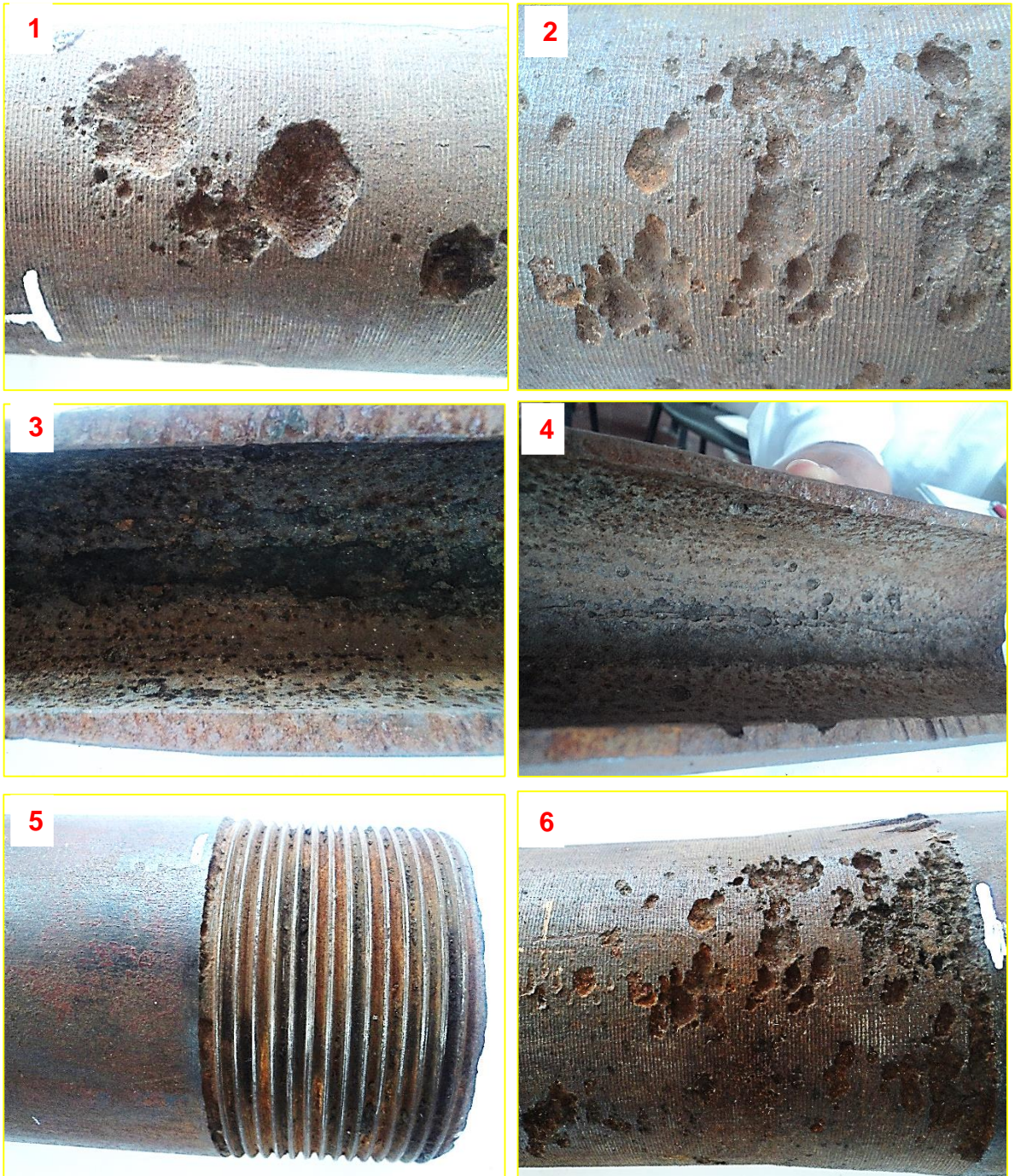
**Figura 44. Fotografías de la 1 a la 4 correspondientes a la muestra 14-057.**



- **MUESTRA 1405-084**

Tramo de tubería cortado a la mitad con el fin de presenciar un canal producto de la alta corrosión.

Figura 45. Fotografías de la 1 a la 10 correspondientes a la muestra 1405-084.





Ahora bien, ya habiendo desarrollado un análisis visual de los diferentes tramos de tubería se procede a realizar la inspección de estos con el equipo de Phased Array con el fin de evidenciar a fondo los daños y la magnitud de estos. Dichas inspecciones junto con sus respectivas imágenes son explicadas paso a paso en el siguiente capítulo.

### **3. RECOPIACIÓN DE IMÁGENES DE LA INSPECCIÓN CON EL EQUIPO PHASED ARRAY.**

Para obtener las imágenes de los daños presentes en cada tramo de tubería, lo primero que se hace es realizar la calibración del equipo. Para ello es necesario seleccionar el tipo de sonda, el palpador, el retardo de la zapata y la velocidad de barrido que se van a usar; para así poder llevar a cabo las diferentes inspecciones a desarrollar.

#### **3.1 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.**

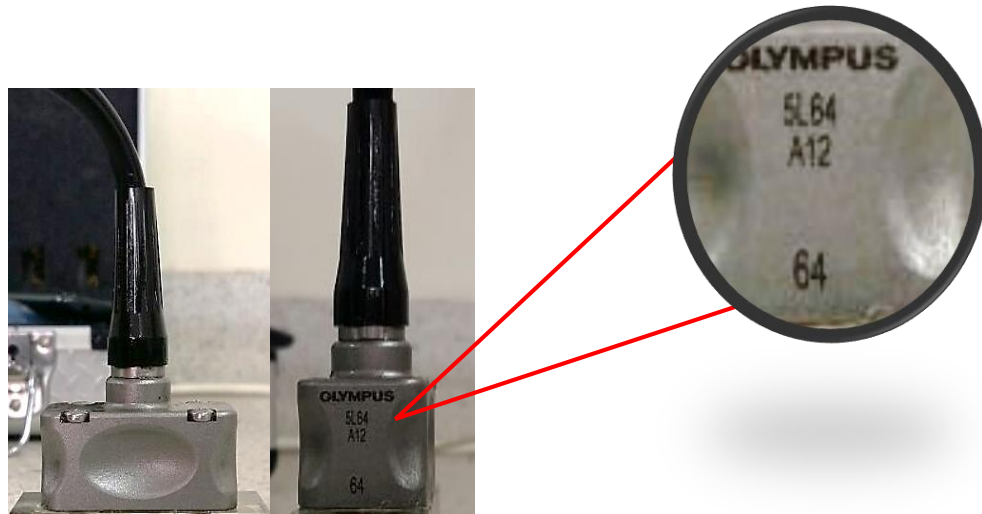
Configurar el equipo para realizar un barrido sectorial en un solo grupo:

1. Definir la pieza; el parámetro más importante en este caso sería la velocidad del sonido en la pieza a inspeccionar.
2. Se configura el grupo; para este caso se define Phased Array ya que es el tipo de inspección que se va a realizar. Posterior a esto, se introducen los parámetros correspondientes al palpador y la zapata, los cuales serán empleados por el calculador al momento de realizar las distintas leyes focales.

Para el desarrollo de las inspecciones en este caso el palpador seleccionado es el plano; para el cual es importante tener claro algunos parámetros como:

- Tamaño del elemento (pitch); es la distancia entre los centros de dos elementos consecutivos, y el cual varía en un parámetro de 0,25-2mm. (0,60 mm).
- Número de elementos. (64 elementos).
- Frecuencia, esta depende de la aplicación. (5MHz).
- Plano o focalizado radialmente. (Plano).

**Figura 46. Palpador 5L64 A12**



Otro elemento a tener en cuenta para la configuración de las leyes focales es la zapata; en este caso se emplea una de haz recto de ondas longitudinales, la cual es utilizada para ver corrosión o hacer inspección de componentes de fibras de carbono.

Los siguientes parámetros son los requeridos para la base de datos del equipo:

- Modelo de suela.
- Angulo de suela.
- Orientación de la suela (inversa).
- Altura del primer elemento del palpador.
- Velocidad del material de la suela.

**Figura 47. Suela SA10- OL**



De igual manera para la velocidad del sonido en la pieza que se va a inspeccionar, normalmente se usa la velocidad teórica del material o una aproximada.

**Calibración del equipo:** Una vez configuradas y realizadas las leyes focales, se puede dar paso al proceso de calibración.

Sin embargo, para este proceso es necesario desarrollar el cálculo de tres parámetros, tales como; la velocidad del material, el retardo del palpador, de la suela o zapata y la calibración en sensibilidad, de acuerdo a los parámetros que se estén empleando.

- **Velocidad del material:** Si no se conoce la velocidad del material que se desea inspeccionar, se realiza una calibración con un reflector; en este caso se emplea una escalerilla para de esta forma obtener una velocidad aproximada.

**Figura 48. Escalerilla de calibración**



Sin embargo, es importante tener en cuenta que, al momento de hallar la velocidad por medio de los reflectores, es necesario delimitar la medida de estos de +/- 1mm del valor real para conseguir una precisión de aproximadamente +/- 20m/sg, obtener

esta precisión en la velocidad dará un error del ángulo de +/- 1°, lo cual permite minimizar errores en las inspecciones que se realicen.

De igual manera es importante determinar el modo de medida que se desea tener, es decir; definir qué tipo de inspección se va a realizar, la cual es de gran importancia, teniendo en cuenta que con la medida determinada no solo se realiza la calibración, sino que también esta será la misma con la que se tomen las respectivas inspecciones. En este caso se selecciona el modo Pico, que permite la obtención de valores en cuanto a corrosión y espesores.

Teniendo en cuenta lo ya mencionado; para el caso de las pruebas realizadas, después de hacer la respectiva calibración, el valor de la velocidad obtenido y con el que se trabajo fue de 5524,6 m/sg. Una vez que se ha calculado esta velocidad, el Omniscan toma el nuevo valor y vuelve a calcular todas las leyes focales halladas anteriormente.

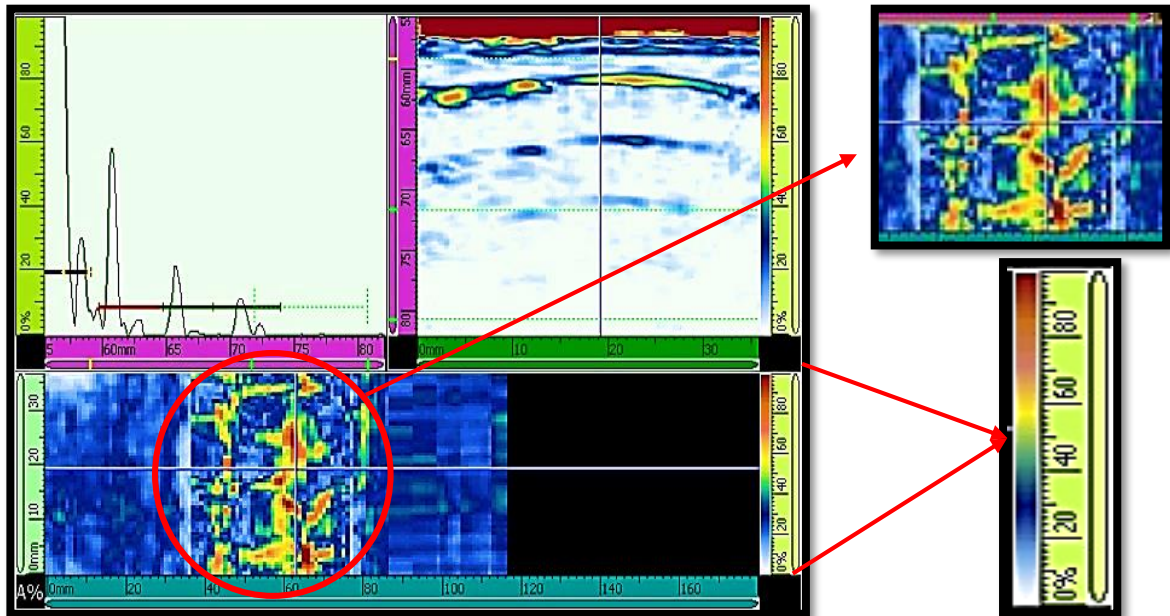
- **Retardo del palpador, de la suela o zapata:** Lo primero que se debe hacer es comprobar si realmente el retardo del palpador no es el correcto; para esto se realiza un barrido en una superficie de la que se conozca la profundidad. Si las leyes focales se encuentran todas a la misma profundidad del material quiere decir que el retardo es el adecuado.

En el caso de las pruebas realizadas se tenía la seguridad de que el retardo era óptimo, debido a que la zapata empleada estaba nueva, es decir, no presentaba desgastes, lo cual elimina los errores que se puedan presentar, por lo que no fue necesario calibrar.

- **Calibración en sensibilidad (amplitud):** La amplitud se representa con un código de colores que va desde el 0% al 100% de amplitud, y donde lo que se

observa de color azul es la parte sana y lo que está en color rojo es el daño que se encuentra.

**Figura 49. Visualización de colores con el equipo en operación.**



Lo primero que se hace es entrar en el menú de calibración, definir el tipo de calibración, en este caso ultrasonidos; se define el modo de calibración el cual será de sensibilidad, y posterior a esto se selecciona calibrar todos los ángulos.

Hecho esto, el equipo pide introducir el valor de la amplitud referencia, para este caso será el valor de la superficie que se emplee para hacer la calibración. Seguido de esto se pide introducir la tolerancia con la que se quiere calibrar, que es un indicador visual para la verificación de la amplitud.

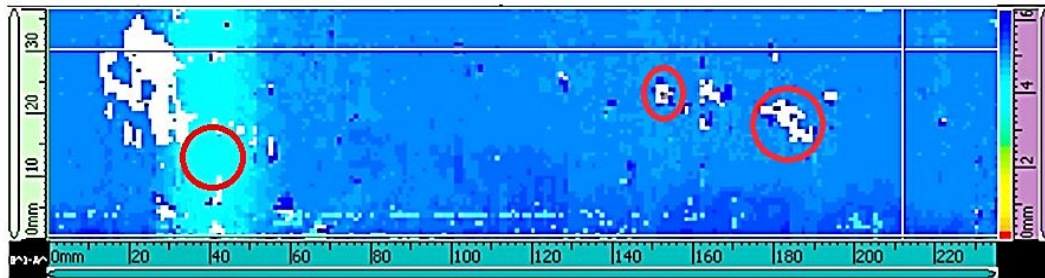
Habiendo ya realizado lo anterior, se procede a desarrollar las inspecciones requeridas.

### 3.2 USO DEL EQUIPO PHASED ARRAY PARA LA INSPECCIÓN A LOS TRAMOS DE TUBERÍA.

A partir de la inspección visual realizada anteriormente, se seleccionaron unos puntos específicos para realizar las pruebas, para esto se tuvo en cuenta las zonas donde se observan más daños, y a su vez las que no generen saltos en la onda, debido a discontinuidades y/o rupturas.

En la pantalla del equipo se puede evidenciar que en la reglilla de colores la zona azul representa las áreas que se encuentran en buen estado; los daños se observan en una tonalidad verde. También se pueden evidenciar unas zonas de color gris y blanco, las cuales hacen referencia a espesores en donde no fue posible obtener evidencias, debido a la morfología de la corrosión interna presente en las muestras y otros, producto de la irregularidad de la superficie donde no se podía generar un buen acople del palpador (ver figura 50).

**Figura 50. Reglilla de colores.**

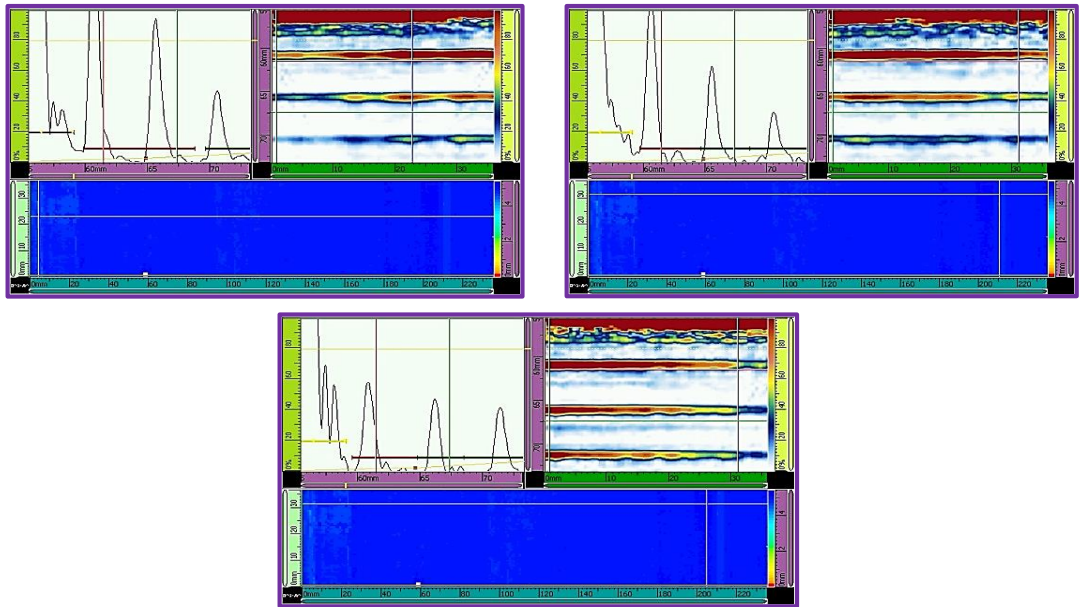


- **MUESTRA 12-082:**

Longitud de zona inspección aproximadamente 10cm.

Espesor = 5,49 mm.      Perímetro = 235 mm.

**Figura 51. Resultados muestra 12-082.**

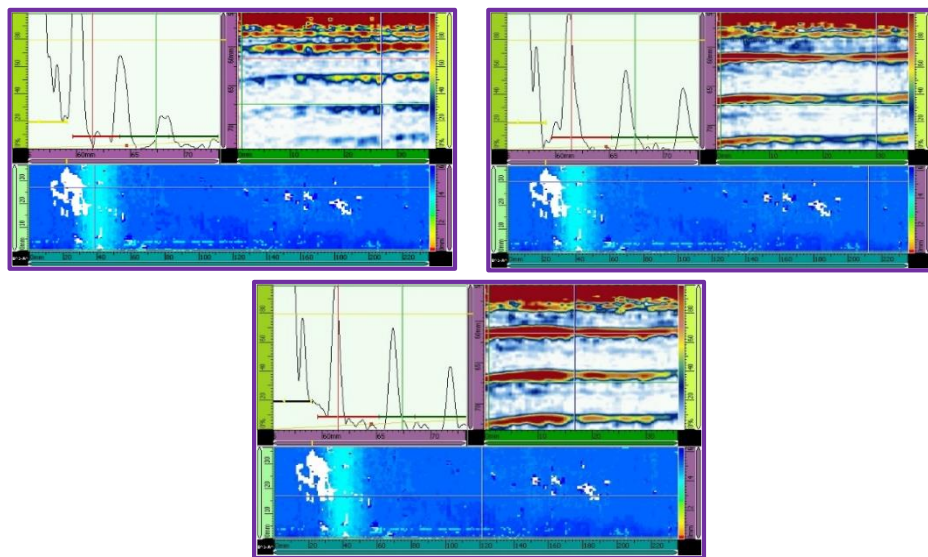


• **MUESTRA 13-037:**

Longitud de zona inspección aproximadamente 10cm.

Espesor = 6,1 mm.      Perímetro = 235 mm.

**Figura 52. Resultados muestra 13-037.**

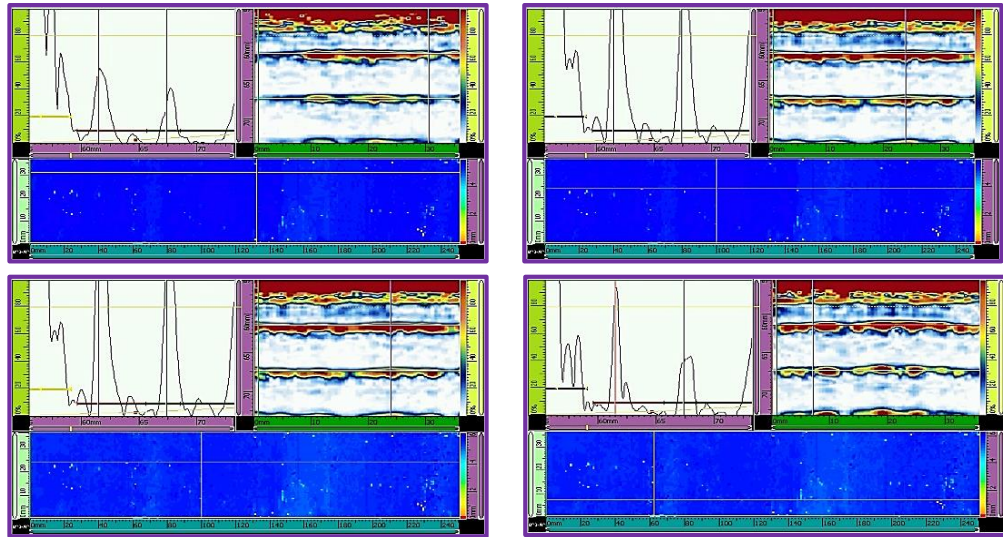


- **MUESTRA 14-057.**

Longitud de zona inspección aproximadamente 10cm.

Espesor = 6,35 mm.      Perímetro = 250 mm.

**Figura 53. Resultados muestra 14-057.**

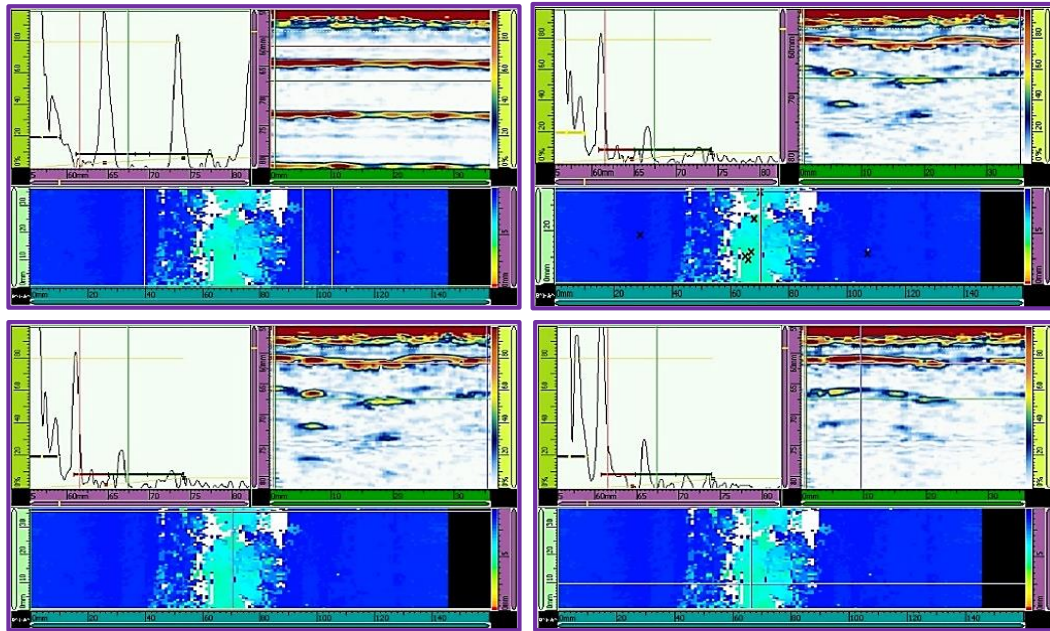


- **MUESTRA 1405-084.**

Longitud de zona inspección aproximadamente 10cm.

Espesor = 9,53 mm.      Perímetro = 145 mm.

Figura 54. Resultados de muestra 1405-084.



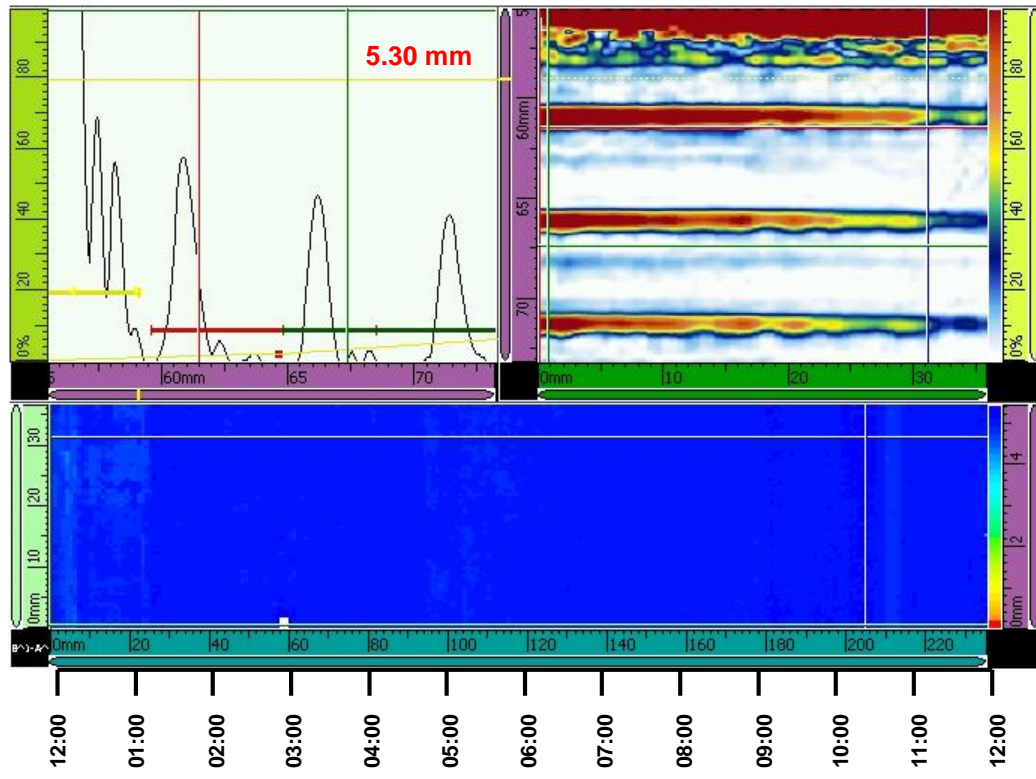
#### **4. ANALISIS DE RESULTADOS.**

En este capítulo se presenta el análisis obtenido a partir de las pruebas realizadas en el laboratorio de ensayos no destructivos (END) de la Universidad Industrial de Santander; en donde se puede evidenciar los daños más representativos de cada una de las muestras de tubería empleadas para dicha inspección. Esto con el fin de mostrar las pérdidas de espesor y compararlas con el valor máximo de pérdida que según el código ASME b31 es del 12% y en la sección 8 del mismo se habla de un valor máximo anual de reducción es de 0,134 mm.

En el anexo A se pueden observar los resultados arrojados por el equipo PHASED ARRAY.

#### 4.1 MUESTRA 12-082

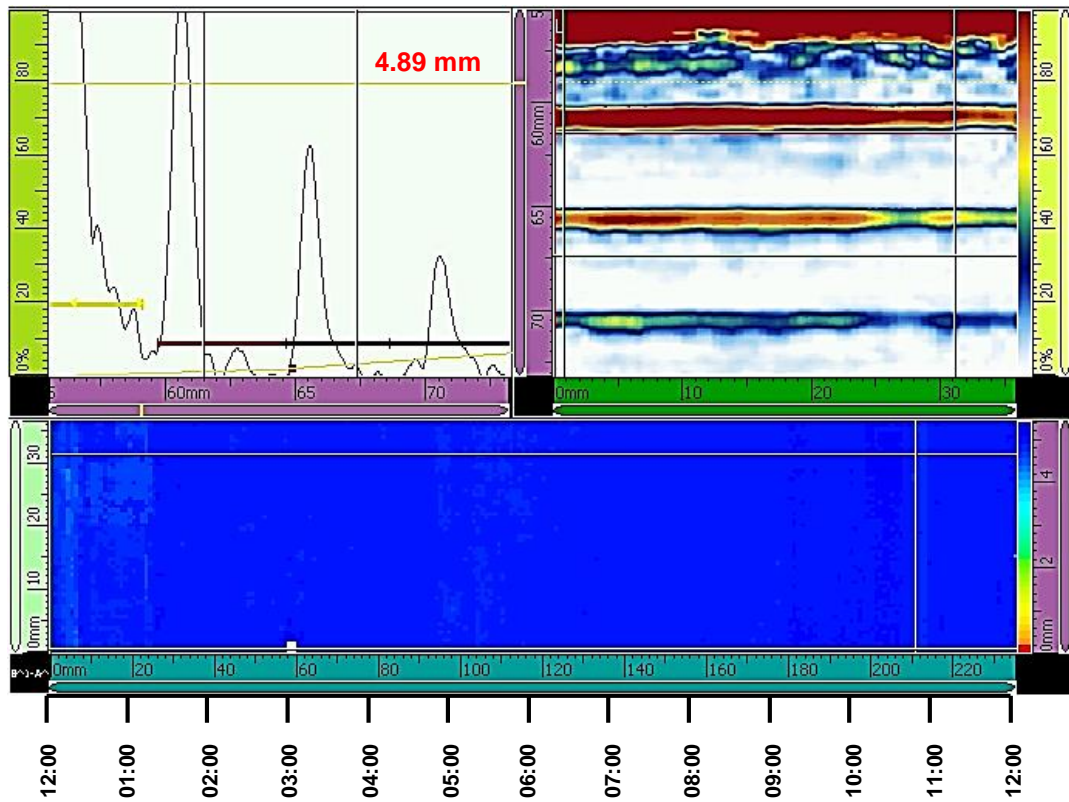
Figura 55. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de espesor promedio



En las figuras 55 y 56 se observa el barrido de 235 mm realizado en el tubo 12-082, el cual abarca todo el perímetro. Se evidenció que el espesor en toda la zona se encuentra constante con un valor promedio de 5.30 mm, y sin una disminución significativa del espesor generado por procesos de corrosión. Sin embargo, en la zona comprendida entre la posición horaria de las 10:00 y las 11:00 se observa una franja de 4 mm de diferente color, donde se obtuvo un espesor promedio de 4.89 mm correspondiente posiblemente a la soldadura longitudinal del tubo (tubería con costura).

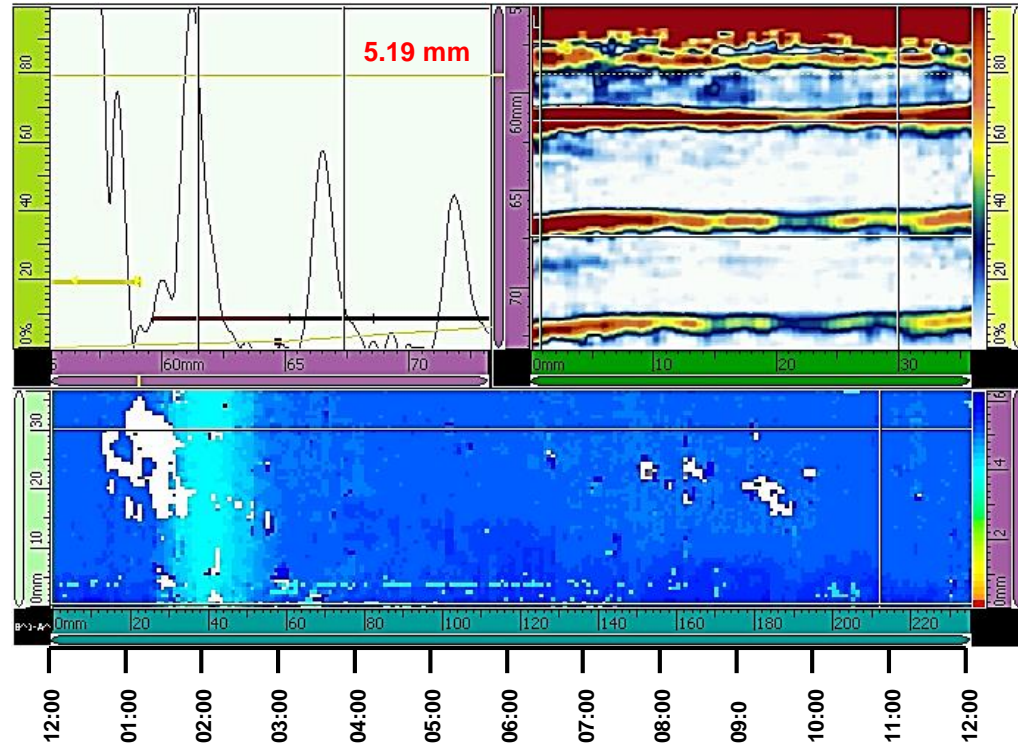
Las zonas de color blanco y gris en el C-Scan corresponden a puntos donde no se obtuvo un acople adecuado debido a discontinuidades superficiales de la tubería o dispersión del haz ultrasónico por la morfología de la corrosión interna.

**Figura 56. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de menor espesor.**



## 4.2 MUESTRA 13-037

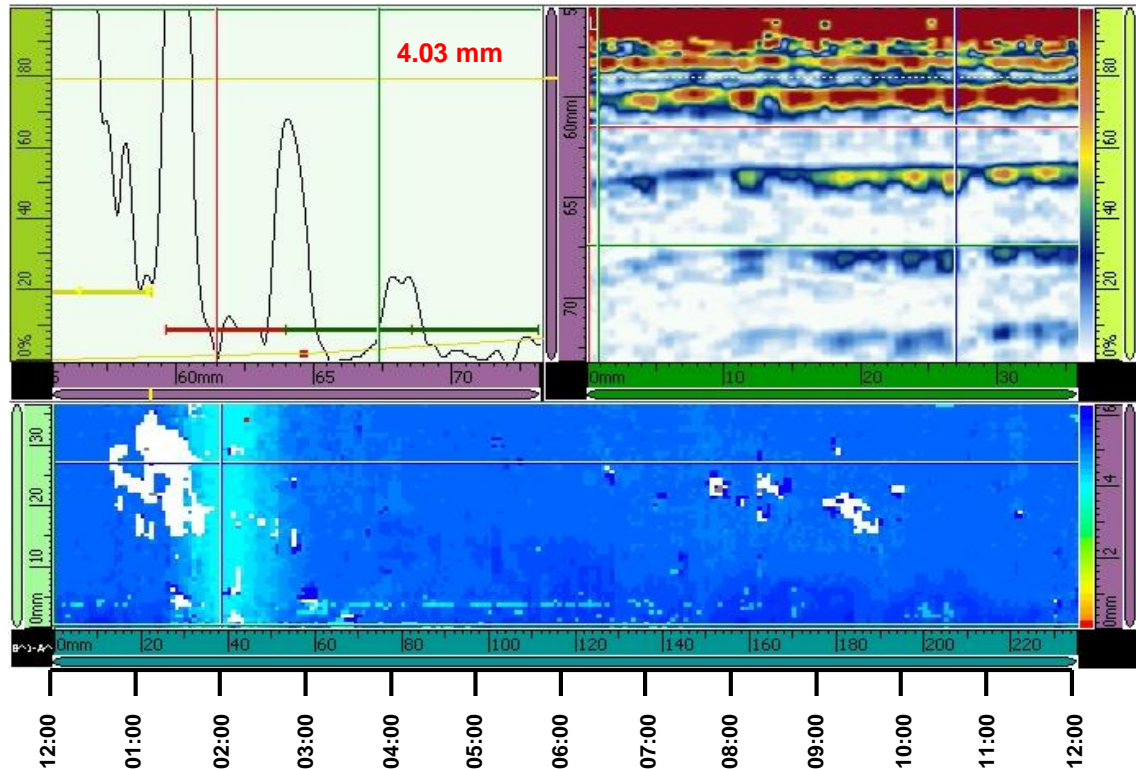
Figura 57. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de espesor promedio.



En las figuras 57 y 58 se observa el barrido de 235 mm realizado en el tubo 13-037, el cual abarca todo el perímetro. Se observó una zona del tubo con daño mecánico externo de aproximadamente 30 mm de ancho; el cual fue evidenciado en el barrido realizado, mostrando disminución de espesor en la zona horaria comprendida entre la 1:00 y las 3:00, con un espesor mínimo de 4.03 mm (ver figura 56). El espesor promedio medido en el resto del tubo fue de 5.19 mm.

Las zonas de color blanco y gris en el C-Scan corresponden a puntos donde no se obtuvo un acople adecuado debido a discontinuidades superficiales de la tubería o dispersión del haz ultrasónico por la morfología de la corrosión interna.

**Figura 58. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de menor espesor.**



#### **4.3 MUESTRA 14-057**

En las figuras 59 y 60 se observa el barrido de 250 mm realizado en el tubo 14-057, el cual abarca todo el perímetro. Se observó que la superficie externa de la tubería presenta picaduras por corrosión, la cual fue evidenciada en el barrido realizado mostrando puntos de color claro en el C-scan. El espesor promedio medido en el tubo fue de 6.30 mm y el espesor mínimo fue de 6.05 mm. Las zonas de color blanco y gris en el C-Scan corresponden a puntos donde no se obtuvo un acople adecuado debido a discontinuidades superficiales de la tubería o dispersión del haz ultrasónico por la morfología de la corrosión interna, así como la presencia de grandes picaduras en su superficie externa.

Figura 59. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de espesor promedio

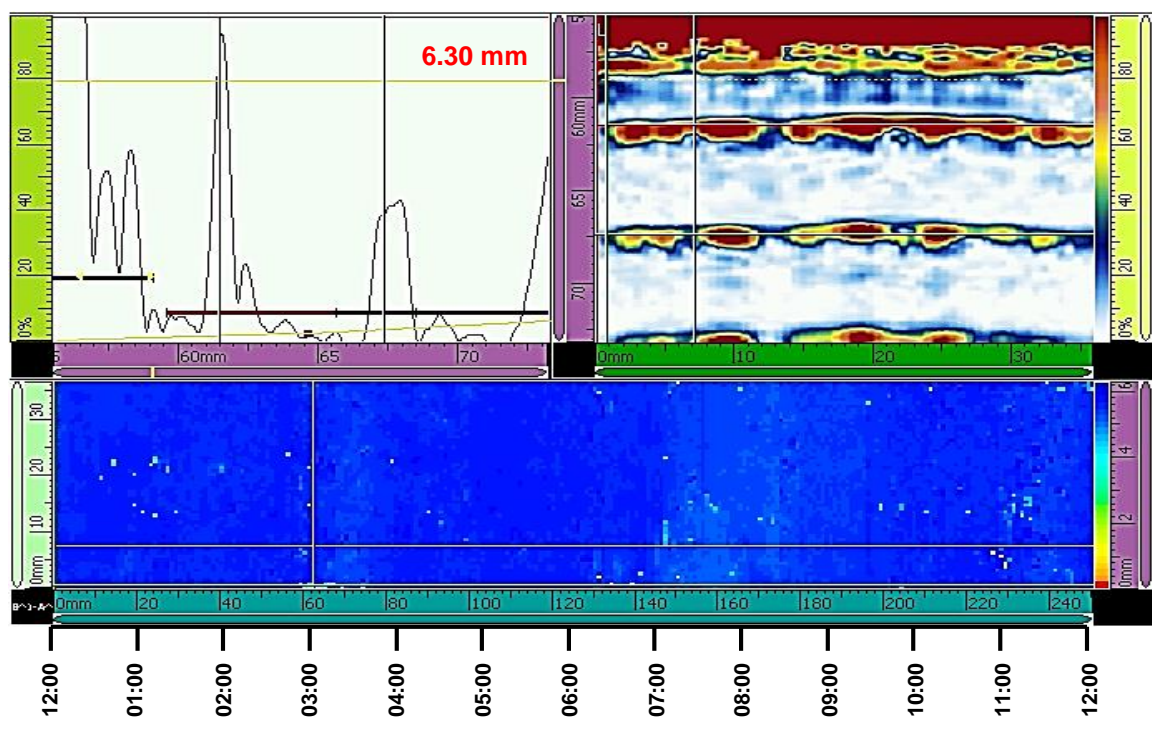
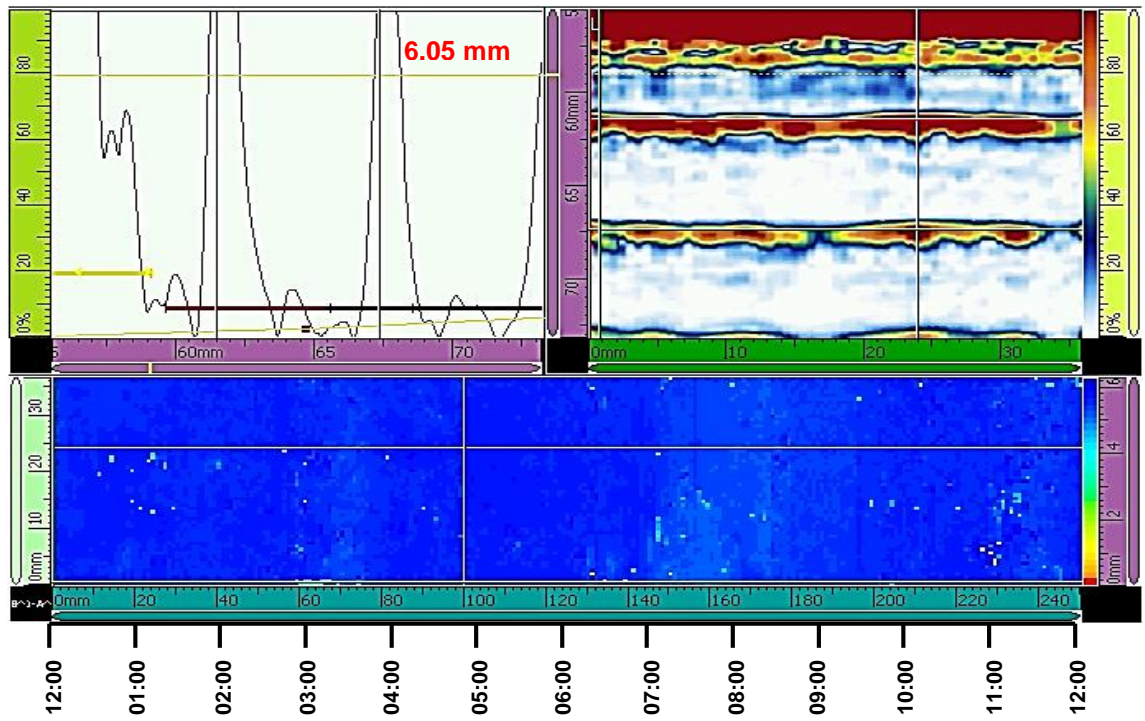
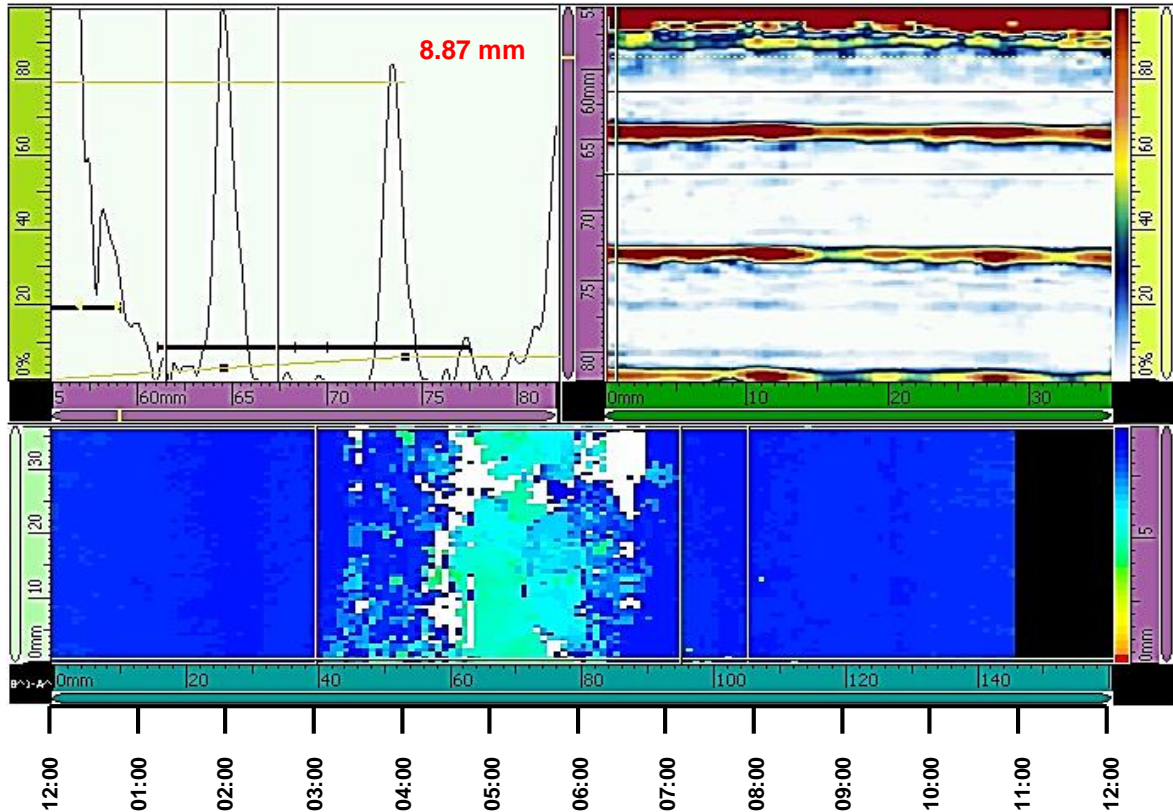


Figura 60. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de menor espesor.



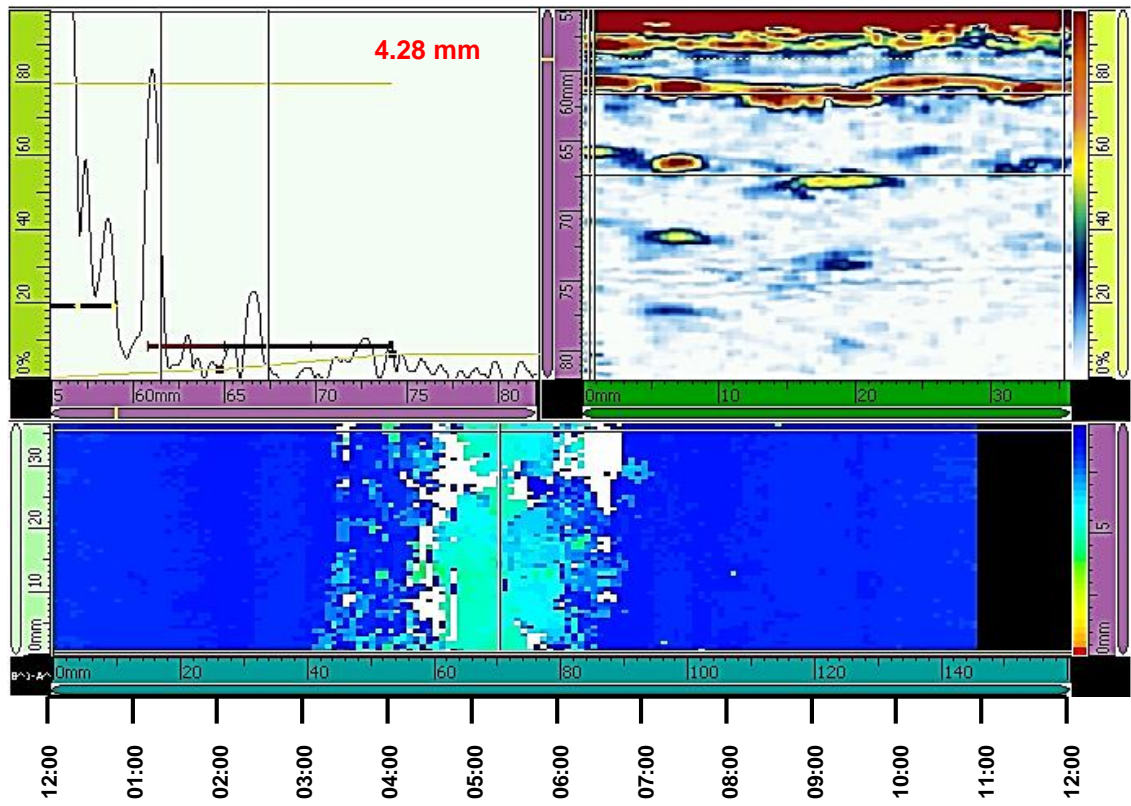
#### 4.4 MUESTRA 1405-084

Figura 61. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de espesor promedio.



En las figuras 61 y 62 se observa el barrido de 145 mm realizado en el tubo 1405-084, el cual abarca aproximadamente medio tubo. Se evidenció disminución de espesor por corrosión interna en una zona de aproximadamente 50 mm comprendida entre la posición horaria de las 3:00 y las 7:00, obteniéndose un espesor mínimo de 4.28 mm. Las zonas de color blanco y gris en el C-Scan corresponden a puntos donde no se obtuvo un acople adecuado debido a discontinuidades superficiales de la tubería o dispersión del haz ultrasónico por la morfología de la corrosión interna; como lo fue la presencia de una canal de corrosión evidenciada en la inspección visual.

Figura 62. Representación A-Scan, S-Scan y C-Scan zona de menor espesor.



## 5. CONCLUSIONES

- Una vez realizado el análisis de los resultados obtenidos de las inspecciones, se concluye que las muestras estudiadas no se encuentran en óptimas condiciones para ser empleadas nuevamente en operación, puesto que al momento de realizar el barrido de inspección se determinó reducción de espesor; el cual fue generado debido a la corrosión producida por las condiciones en la que se encontraba la muestra, el tiempo de trabajo y los fluidos a los cuales estuvo expuesta, que según el reporte del campo eran de tipo altamente corrosivo; algunos con arenas abrasivas y altos corte de agua.
- Una de las grandes ventajas de esta técnica de inspección es el generar imágenes en 3D con una mejor precisión, alta calidad y detalle, lo cual facilita realizar el desarrollo de un análisis más detallado del daño.
- Después de realizar los estudios correspondientes, se determinó que si es viable y efectivo emplear este tipo de pruebas con el fin de corroborar los datos obtenidos anteriormente con otras técnicas de inspección. Por lo que, se puede concluir que es factible emplear el equipo Phased Array, para realizar inspecciones puntuales, y de esta forma obtener un análisis más detallado de las fallas presentes en las muestras analizadas.
- De acuerdo a lo analizado es posible afirmar que el equipo PHASED ARRAY contribuye con la conservación del medio ambiente; puesto que no se generan residuos químicos ni radioactivos durante los procesos de inspección. Lo cual ayuda a disminuir el riesgo y evitar posibles accidentes al personal encargado de su operación.

- EL equipo PHASED ARRAY permite realizar inspecciones a cualquier tipo de metal y sus diferentes aleaciones; razón por la cual puede ser empleado para analizar diversas estructuras, tales como tanques, tuberías y recipientes a presión; esto sin importar el espesor que presenten las muestras que se van a estudiar.

## 6. RECOMENDACIONES

Concluido este proyecto se recomienda lo siguiente:

- Realizar nuevas inspecciones, pero esta vez empleando palpadores de forma cilíndrica o HIDROFOR (palpadores de agua); los cuales permiten realizar un barrido más detallado a las muestras. Esto debido a que evitan los saltos o perdidas de señal al realizar el recorrido, lo que permite un análisis de corrosión más específico.
- Llevar a cabo un análisis económico detallado; esto con el fin de poder evaluar la relación costo beneficio y así determinar si es económicamente viable inspeccionar este tipo de tuberías empleando el equipo PHASED ARRAY.
- Estudiar el mecanismo de daño basado en la morfología de las discontinuidades evidenciadas en las muestras, y de esta forma proponer alternativas de como mitigar y atenuar estas fallas. Con el fin de prolongar la vida útil de las tuberías.

## BIBLIOGRAFÍA

COLOMBIA. NORMA API. RP 571 (Diciembre, 2003). Mecanismos de daños que afectan a los equipos fijos en la industria de refinería. P. 65-126.

INTERTEK. Ensayos por ultrasonidos Phased Array. [En línea]. España. (Recuperado en 8 Septiembre 2017). Disponible en: <http://www.intertek.es/ensayos-no-destructivos/ultrasonidos/phased-array>.

MOROS, Duran Adriana Catalina y TORRES, Benítez Elkin Yesid, “Aplicación de la técnica de ultrasonido para la estimación de la pérdida de espesor en la superficie externa de una pieza tubular”, Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2009.

OLYMPUS; Introducción al Phased Array utilizando el Omni Scan MX2: Primera parte, segunda parte y tercera parte. [En línea]. España. (Recuperado en 20 Abril 2018). Disponible en: [https://www.olympus-ims.com/es/ndt-webinars/intropa\\_3\\_es/](https://www.olympus-ims.com/es/ndt-webinars/intropa_3_es/).

OLYMPUS; Scientific Solutions Americas, (2007). ADVANCES IN PHASED ARRAY, Ultrasonic Technology Applications. United States of America. México.

OLYMPUS; Scientific Solutions Americas, (2007). INTRODUCTION TO PHASED ARRAY, Ultrasonic Technology Applications. Canada.

OLYMPUS; scientific solutions Americas, (2014). PHASED ARRAY TESTING, Basic Theory For Industrial Applications. México.

SERWAY, Raymond A. GEWEDTT JR, John W. Física para ciencia e ingeniería con física moderna. Latinoamérica: Editora de producción CENGAGE Learning 2005. P. 678 (Naturaleza de la luz y leyes de óptica geométrica). ISBN: 0-495-11244-0.

## **ANEXOS**

Se anexan los resultados arrojados por el equipo PHASED ARRAY.

### **Anexo A. Muestra 12-082**



# OmniScan Report

<b>Report Date</b> 2018 / 05 / 17	<b>Report Version</b> MXU - 4.2R2	<b>File Name</b> mapeo corrosion.ops	<b>Inspection Date</b> 2018 / 05 / 17	<b>Inspection Version</b> MXU - 4.2R2	<b>Save Mode</b> Inspection Data
<b>OmniScan Type</b> OmniScan MX2	<b>OmniScan Serial #</b> OMNI2-101521	<b>Module Type</b> OMNI-M-PA1664	<b>Module Serial #</b> OMNI-800247	<b>Data File Name</b> 12-082	

## PA 1

### Probe Characterization

<b>Probe Model</b> 5L64-A12	<b>Probe Serial #</b> M0158				
<b>Probe Frequency</b> 5.00 MHz	<b>Peak Frequency</b> N/A	<b>Wedge Model</b> Contact	<b>Wedge Angle</b> 0.00°	<b>Probe Aperture</b> N/A	
<b>-6 dB</b>	<b>Lower Frequency</b> N/A	<b>Higher Frequency</b> N/A	<b>Center Frequency</b> N/A	<b>Bandwidth (MHz)</b> N/A	<b>Bandwidth (%)</b> N/A
<b>-20 dB</b>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>Date</b> N/A	<b>Time</b> N/A	<b>Procedure</b> N/A	<b>Calibration Block</b> N/A	<b>Characterization Gain</b> N/A	<b>A%</b> N/A

### Setup

<b>A:0.00 Sk:090 L:001</b>					
<b>Beam Delay</b> 0.0 µs	<b>Start (Half Path)</b> 55.52 mm	<b>Range (Half Path)</b> 10.00 mm	<b>Max. Acq Rate</b> 60	<b>Type</b> PA	<b>Averaging Factor</b> 1
<b>Scale Type</b>	<b>Scale Factor</b>	<b>Video Filter</b>	<b>Pretrig.</b>	<b>Rectification</b>	<b>Filter</b>
<b>Compression</b>	2	On	0.00 µs	FW	Band-pass 4.8 MHz (2.0 - 7.5MHz)
<b>Voltage</b> 40 (Low)	<b>Gain</b> 38.24 dB	<b>Mode</b> PE (Pulse-Echo)	<b>Wave Type</b> User-Defined	<b>Sound Velocity</b> 5524.6 m/s	<b>Pulse Width</b> 100.00 ns
<b>Scan Offset</b> 0.00 mm	<b>Index Offset</b> 0.00 mm	<b>Skew</b> 90.0°	<b>C-Scan Time Resolution</b> 10.0 ns	<b>Digitizing Frequency</b> 100 MHz	<b>A-Scan Time Resolution</b> 20.0 ns
<b>Gate</b>	<b>Start</b>	<b>Width</b>	<b>Threshold</b>	<b>Synchro.</b>	<b>Peak Selection</b>
I	54.00 mm	5.08 mm	20.00 %	Pulse	Max Peak
A	5.22 mm	8.89 mm	9.00 %	I-edge	Max Peak
B	4.03 mm	9.14 mm	9.00 %	A-peak	First Peak
<b>TCG Point Number</b>	<b>Position (Half Path)</b>	<b>Gain</b>			
1	0.00 mm	0.0 dB			
2	10.16 mm	3.3 dB			
3	19.80 mm	6.5 dB			

### Calculator

<b>Element Qty. Used</b> 4	<b>First Element</b> 1	<b>Last Element</b> 64	<b>Resolution</b> 1.0	<b>Wave Type</b> User-Defined	<b>Material Velocity</b> 5524.6 m/s
<b>Start Angle</b> 0.00°	<b>Stop Angle</b> N/A	<b>Angle Resolution</b> N/A	<b>Focal Depth</b> 100.00 mm	<b>Law Configuration</b> Linear at 0°	

<b>Material</b>	<b>Geometry</b>	<b>Thickness</b>
STEEL, MILD	Plate	9.53 mm

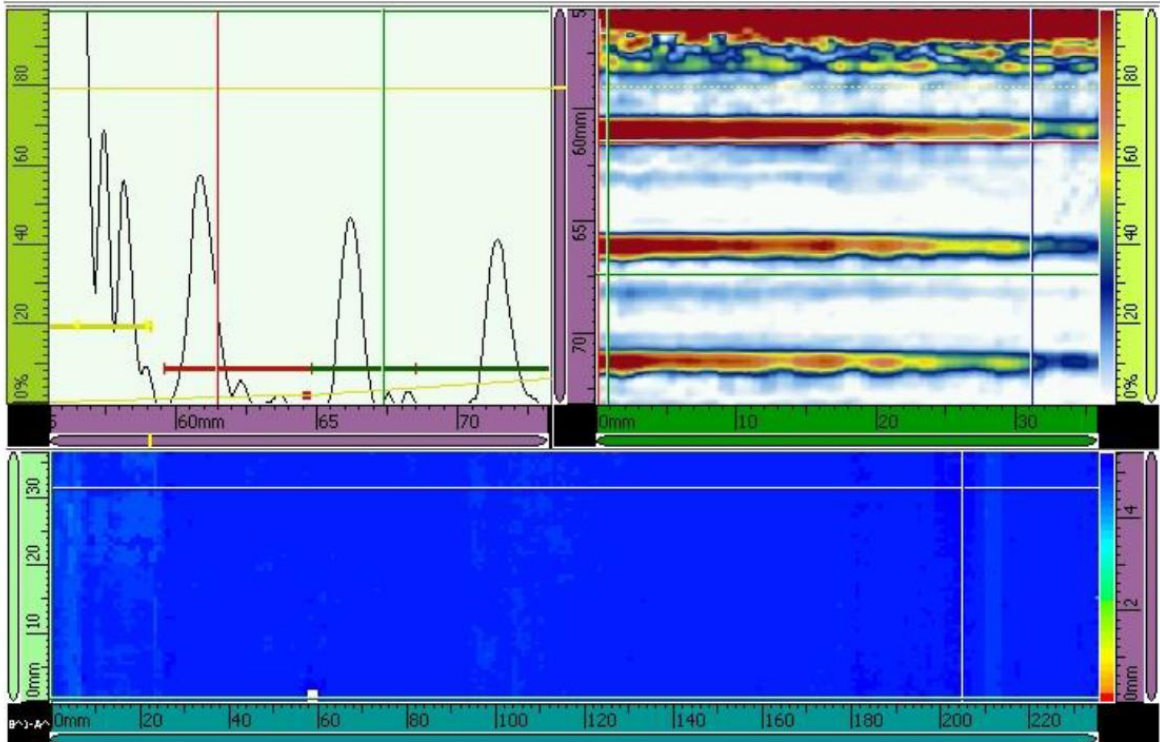
Scan Area

<b>Scan Start</b>	<b>Scan Length</b>	<b>Scan Resolution</b>		
0.00 mm	235.00 mm	1.00 mm		
<b>Synchro. Encoder</b>	<b>Max. scan speed</b>			
	60.00 mm/s			
<b>Axis</b>	<b>Encoder</b>	<b>Encoder Type</b>	<b>Encoder Resolution</b>	<b>Polarity</b>
Scan	1	Quadrature	12.02 step/mm	Normal

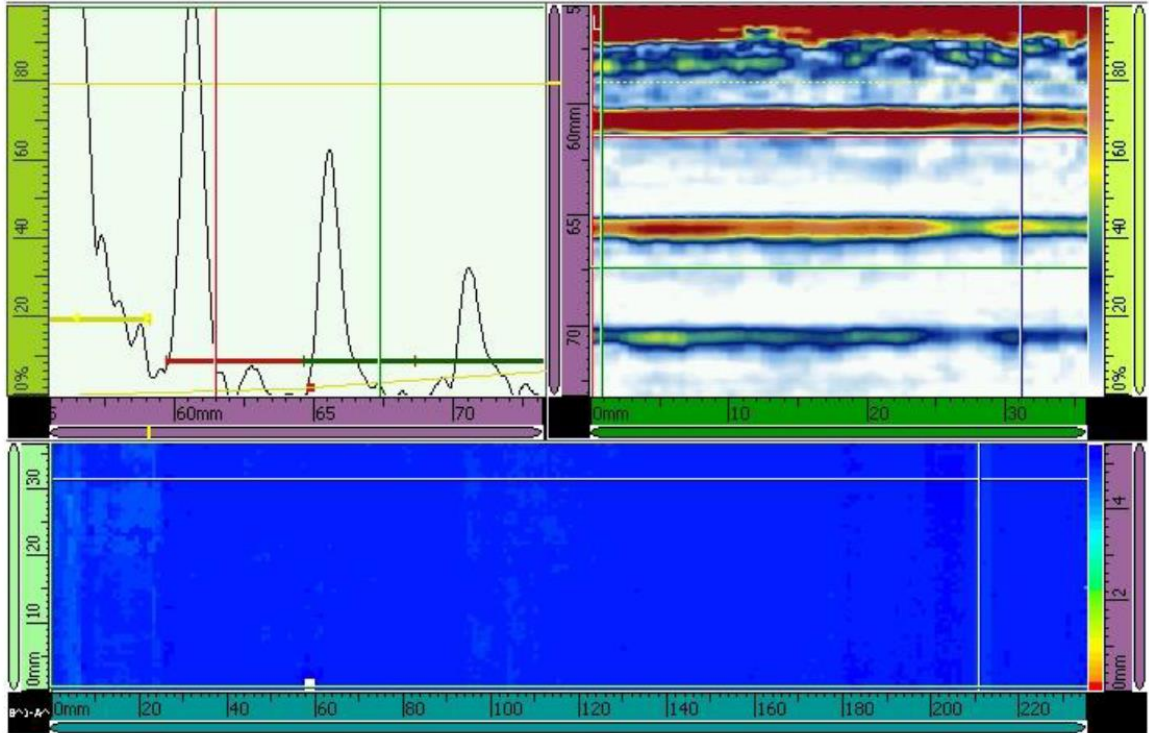
Table

Ref.	Indication #	Scan (mm)	Index (mm)	Group	Channel	B <sup>1</sup> (-A <sup>1</sup> ) (mm)	DA <sup>1</sup> (mm)	PA <sup>1</sup> (mm)	SA <sup>1</sup> (mm)	B <sup>1</sup> (-A <sup>1</sup> ) (mm)	I(m-r) (mm)	I•U(m-r) (mm)	S(m-r) (mm)
-	1*	205.00	31.90	1	VPA 53	5.30	3.59	31.19	60.77	5.30	0.67	5.93	0.00
-	2*	211.00	31.90	1	VPA 53	4.89	3.37	31.19	60.55	4.89	0.67	5.93	0.00
-	3*	4.00	23.40	1	VPA 39	4.89	8.37	22.79	65.55	4.89	0.67	5.93	0.00

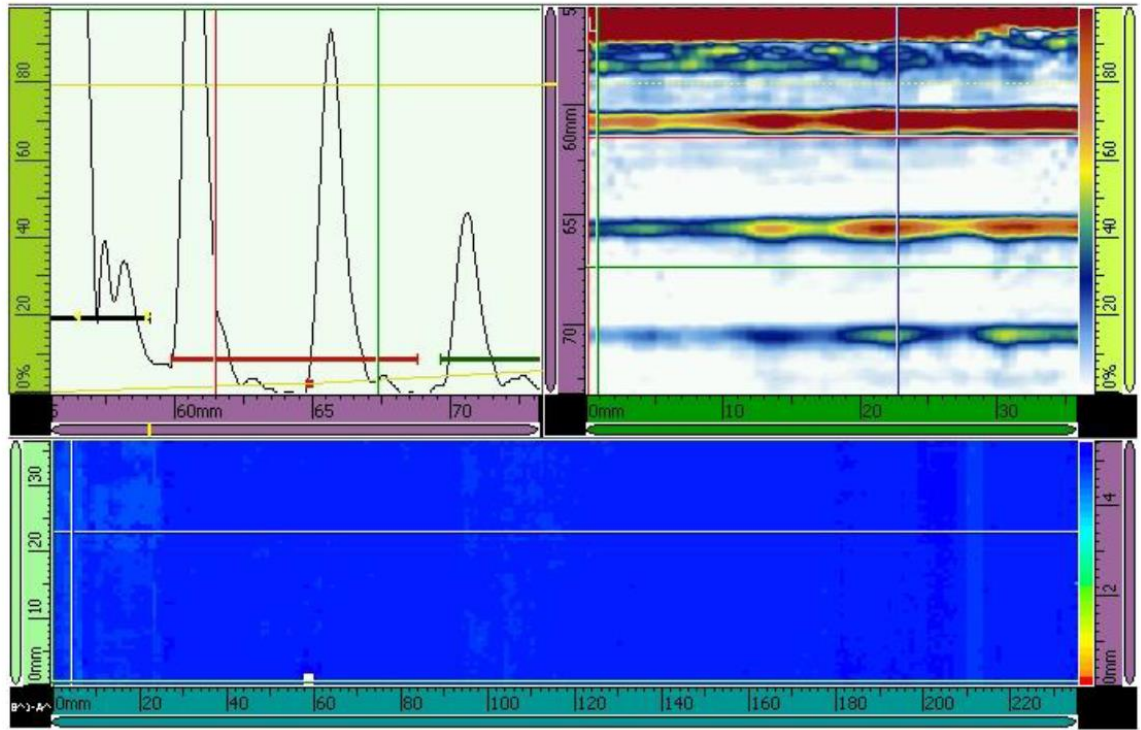
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>1</sup> (-A <sup>1</sup> )	DA <sup>1</sup>	PA <sup>1</sup>	SA <sup>1</sup>	B <sup>1</sup> (-A <sup>1</sup> )	I(m-r)	I•U(m-r)	S(m-r)
-	1	205.00 mm	31.90 mm	1	VPA 53	5.30 mm	3.59 mm	31.19 mm	60.77 mm	5.30 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
-													



Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>1</sup> (-A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	PA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>1</sup> (-A <sup>^</sup> )	I(m-r)	I•U(m-r)	S(m-r)
-	2	211.00 mm	31.90 mm	1	VPA 53	4.89 mm	3.37 mm	31.19 mm	60.55 mm	4.89 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
-													



Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>1</sup> (-A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	PA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>1</sup> (-A <sup>^</sup> )	I(m-r)	I•U(m-r)	S(m-r)
-	3	4.00 mm	23.40 mm	1	VPA 39	4.89 mm	8.37 mm	22.79 mm	65.55 mm	4.89 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
-													



Technician Name \_\_\_\_\_

Technician Signature \_\_\_\_\_

Contractor \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

## Anexo B: Muestra 13-037.



## OmniScan Report

Report Date	Report Version	File Name	Inspection Date	Inspection Version	Save Mode
2018 / 05 / 17	MXU - 4.2R2	mapeo corrosion.cps	2018 / 05 / 17	MXU - 4.2R2	Inspection Data
OmniScan Type	OmniScan Serial #	Module Type	Module Serial #	Data File Name	
OmniScan MX2	OMNID-101521	OMNI-M-PA1664	OMNI-800247	13-037	

### FA1

#### Probe Characterization

Probe Model	Probe Serial #				
5L64-A12	M0138				
Probe Frequency	Peak Frequency	Wedge Model	Wedge Angle	Probe Aperture	
5.00 MHz	N/A	Contact	0.00°	N/A	
	Lower Frequency	Higher Frequency	Center Frequency	Bandwidth (MHz)	Bandwidth (%)
-6 dB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
-20 dB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Date	Time	Procedure	Calibration Block	Characterization Gain	A%
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

#### Setup

A.0.00 S1:090 L.001					
Beam Delay	Start (Half Path)	Range (Half Path)	Max. Acq Rate	Type	Averaging Factor
0.0 µs	55.52 mm	10.00 mm	60	PA	1
Scale Type	Scale Factor	Video Filter	Pretrigger	Rectification	Filter
Compression	2	On	0.00 µs	FW	Band-pass 4.8 MHz (2.0 - 7.5MHz)
Voltage	Gain	Mode	Wave Type	Sound Velocity	Pulse Width
40 (Low)	44.24 dB	PE (Pulse-Echo)	User-Defined	5524.6 m/s	100.00 ns
Scan Offset	Index Offset	Skew	C-Scan Time Resolution	Digitizing Frequency	A-Scan Time Resolution
0.00 mm	0.00 mm	90.0°	10.0 ns	100 MHz	20.0 ns
Gate	Start	Width	Threshold	Synchro.	Peak Selection
I	54.00 mm	5.08 mm	20.00 %	Pulse	Max Peak
A	5.22 mm	8.89 mm	9.00 %	Edge	Max Peak
B	4.03 mm	9.14 mm	9.00 %	A-peak	First Peak
T/C G Point Number	Position (Half Path)	Gain			
1	0.00 mm	0.0 dB			
2	10.16 mm	3.5 dB			
3	19.80 mm	6.5 dB			

#### Calculator

Element Qty. Used	First Element	Last Element	Resolution	Wave Type	Material Velocity
4	1	64	1.0	User-Defined	5524.6 m/s
Start Angle	Stop Angle	Angle Resolution	Focal Depth	Law Configuration	
0.00°	N/A	N/A	100.00 mm	Linear at 0°	

Part

<b>Material</b>	<b>Geometry</b>	<b>Thickness</b>
STEEL, MILD	Plate	9.53 mm

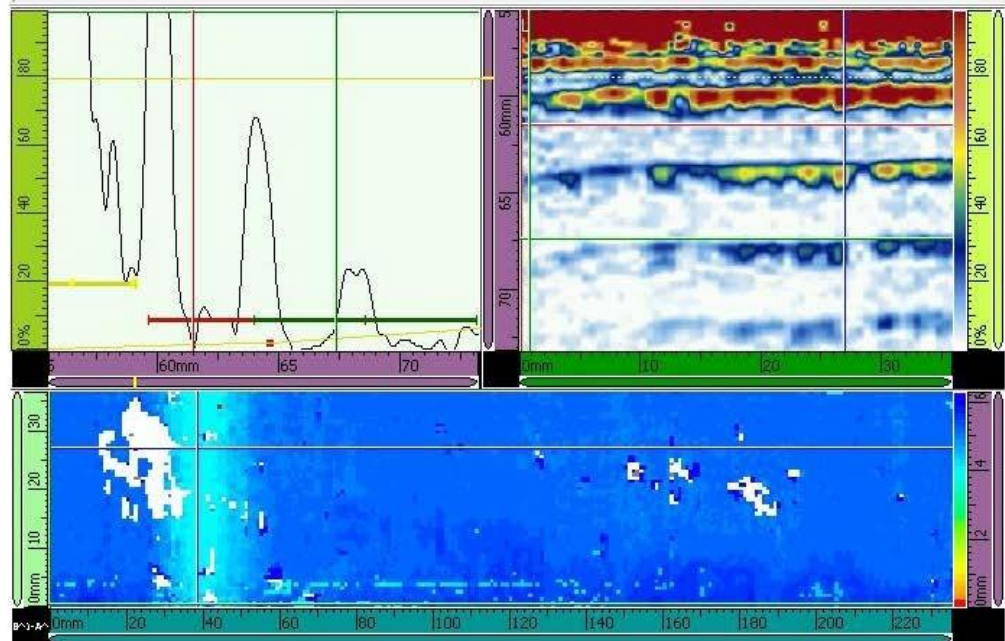
Scan Area

<b>Scan Start</b>	<b>Scan Length</b>	<b>Scan Resolution</b>		
0.00 mm	235.00 mm	1.00 mm		
<b>Synchro Encoder</b>	<b>Max. scan speed</b>			
	60.00 mm/s			
<b>Axis</b>	<b>Encoder</b>	<b>Encoder Type</b>	<b>Encoder Resolution</b>	<b>Polarity</b>
Scan	1	Quadrature	12.02 step/mm	Normal

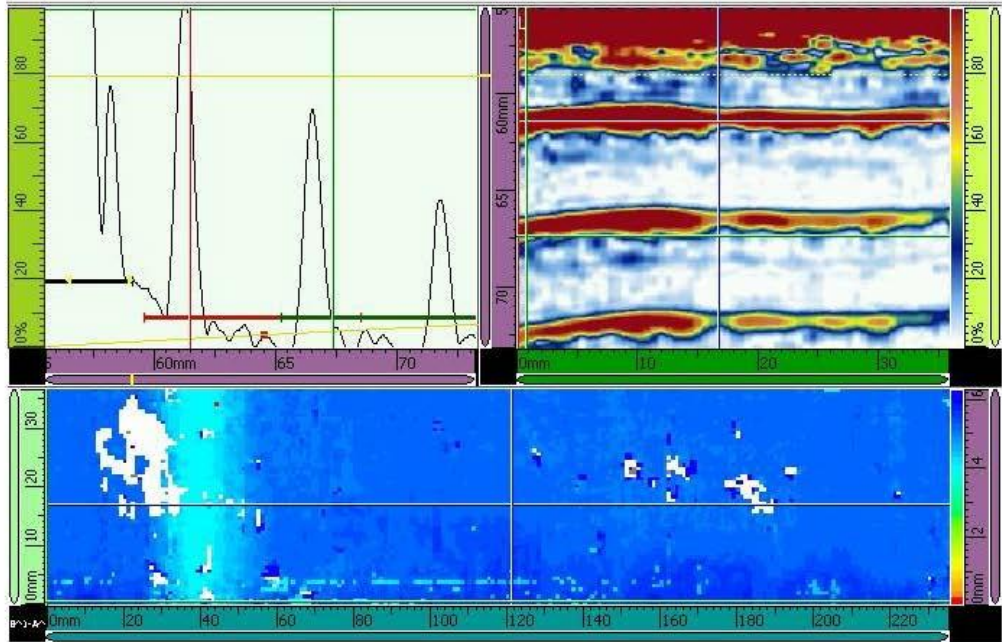
Table

Ref.	Indication #	Scan (mm)	Index (mm)	Group	Channel	B-1 (A <sup>2</sup> ) (mm)	DA <sup>2</sup> (mm)	FA <sup>2</sup> (mm)	SA <sup>2</sup> (mm)	B-1 (A <sup>2</sup> ) (mm)	I <sup>2</sup> (mm)	I <sup>2</sup> (mm)	S <sup>2</sup> (mm)
.	1 *	38.00	27.65	1	VPA 46	4.03	2.73	26.99	59.91	4.03	0.67	5.93	0.00
.	2 *	121.00	17.32	1	VPA 29	5.19	4.01	16.79	61.19	5.19	0.67	5.93	0.00
.	3 *	212.00	30.69	1	VPA 51	5.19	3.98	30.00	61.16	5.19	0.67	5.93	0.00

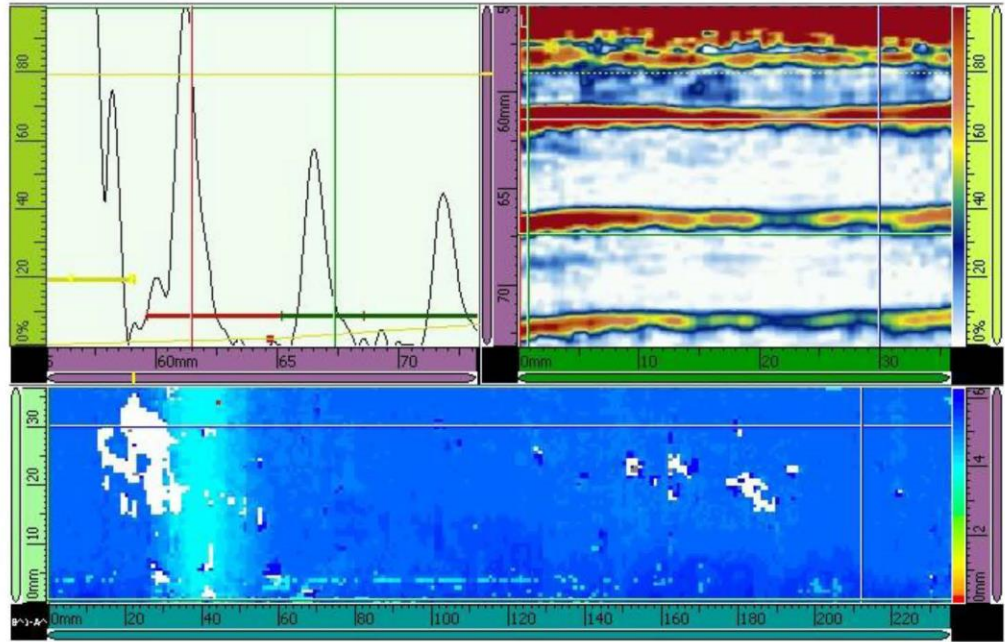
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B-1 (A <sup>2</sup> )	DA <sup>2</sup>	FA <sup>2</sup>	SA <sup>2</sup>	B-1 (A <sup>2</sup> )	I <sup>2</sup> (mm)	I <sup>2</sup> (mm)	S <sup>2</sup> (mm)
.	1	38.00 mm	27.65 mm	1	VPA 46	4.03 mm	2.73 mm	26.99 mm	59.91 mm	4.03 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>-1</sup> (A <sup>-</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>-1</sup> (A <sup>-</sup> )	U(x)	I-U(x)	S(x)
.	2	121.00 mm	17.32 mm	1	VPA.29	5.19 mm	4.01 mm	16.79 mm	61.19 mm	5.19 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>-1</sup> (A <sup>-</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>-1</sup> (A <sup>-</sup> )	U(x)	I-U(x)	S(x)
.	3	212.00 mm	30.69 mm	1	VPA.51	5.19 mm	3.98 mm	30.00 mm	61.16 mm	5.19 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



Technician Name	_____
Technician Signature	_____
Contractor	_____
Date	_____

# Anexo C: Muestra 14-057.



## OmniScan Report

Report Date	Report Version	File Name	Inspection Date	Inspection Version	Save Mode
2018 / 05 / 17	MXU - 4.2R2	mapeo comroskmln.cps	2018 / 05 / 17	MXU - 4.2R2	Inspection Data
OmniScan Type	OmniScan Serial #	Module Type	Module Serial #	Data File Name	
OmniScan MC2	OMNI2-101521	OMNI-M-PA1664	OMNI-800247	14-057	

### FAI

#### Probe Characterization

Probe Model	Probe Serial #				
SL64-A12	M0138				
Probe Frequency	Peak Frequency	Wedge Model	Wedge Angle	Probe Aperture	
5.00 MHz	N/A	Contact	0.00°	N/A	
	Lower Frequency	Higher Frequency	Center Frequency	Bandwidth (MHz)	Bandwidth (%)
-6 dB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
-20 dB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Date	Time	Procedure	Calibration Block	Characterization Gain	A%
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

#### Setup

A.0.00 SI:090 L.001					
Beam Delay	Start (Half Path)	Range (Half Path)	Max. Acq Rate	Type	Averaging Factor
0.0 µs	55.52 mm	10.00 mm	60	PA	1
Scale Type	Scale Factor	Video Filter	Pretrigger	Rectification	Filter
Compression	2	On	0.00 µs	FW	Band-pass 4.8 MHz (2.0 - 7.5 MHz)
Voltage	Gain	Mode	Wave Type	Sound Velocity	Pulse Width
40 (Low)	41.24 dB	PE (Pulse-Echo)	User-Defined	5524.6 m/s	100.00 ns
Scan Offset	Index Offset	Skew	C-Scan Time Resolution	Digitizing Frequency	A-Scan Time Resolution
0.00 mm	0.00 mm	90.0°	10.0 ns	100 MHz	20.0 ns
Gate	Start	Width	Threshold	Synchro.	Peak Selection
I	54.00 mm	5.08 mm	20.00 %	Pulse	Max Peak
A	5.22 mm	8.89 mm	9.00 %	I-edge	Max Peak
B	4.03 mm	9.14 mm	9.00 %	A-peak	First Peak
TCC Feint Number	Position (Half Path)	Gain			
1	0.00 mm	0.0 dB			
2	10.16 mm	3.3 dB			
3	19.80 mm	6.5 dB			

#### Calculator

Element Qty. Used	First Element	Last Element	Resolution	Wave Type	Material Velocity
4	1	64	1.0	User-Defined	5524.6 m/s
Start Angle	Stop Angle	Angle Resolution	Focal Depth	Law Configuration	
0.00°	N/A	N/A	100.00 mm	Linear at 0°	

#### Part

<b>Material</b>	<b>Geometry</b>	<b>Thickness</b>
STEEL, MILD	Plate	9.53 mm

Scan Area

<b>Scan Start</b>	<b>Scan Length</b>	<b>Scan Resolution</b>		
0.00 mm	250.00 mm	1.00 mm		
<b>Synchro Encoder</b>	<b>Max. scan speed</b>			
	60.00 mm/s			
<b>Axis</b>	<b>Encoder</b>	<b>Encoder Type</b>	<b>Encoder Resolution</b>	<b>Polarity</b>
Scan	1	Quadrature	12.02 step/mm	Normal

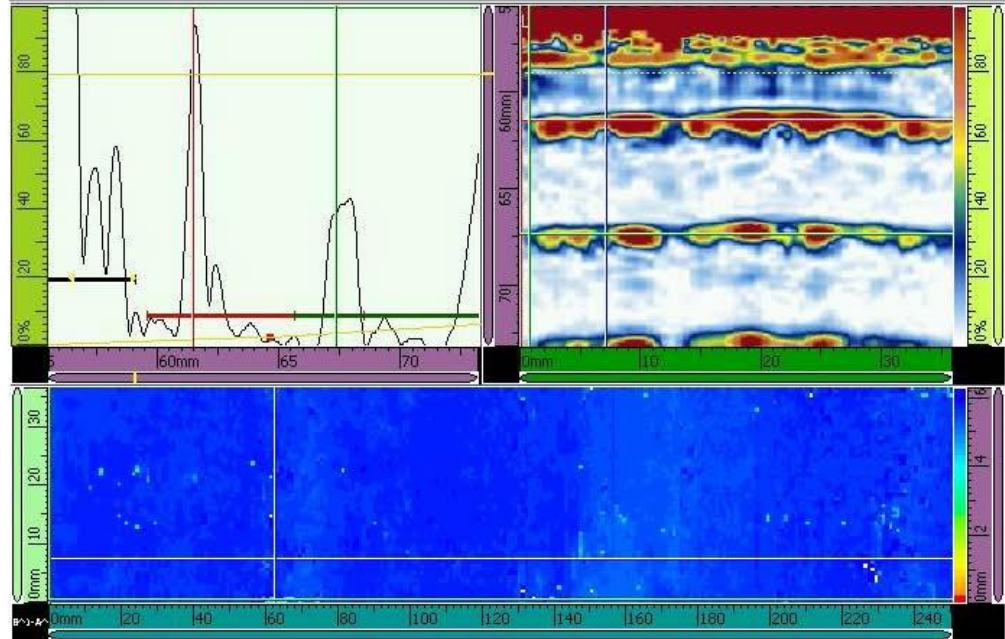
Table

Ref.	Indication #	Scan (mm)	Index (mm)	Group	Channel	B <sup>-1</sup> (A <sup>-1</sup> ) (mm)	DA <sup>^</sup> (mm)	FA <sup>^</sup> (mm)	SA <sup>^</sup> (mm)	B <sup>-1</sup> (A <sup>-1</sup> ) (mm)	I <sup>(max)</sup> (mm)	I <sup>U</sup> (max) (mm)	S <sup>(max)</sup> (mm)
.	1 *	62.00	7.60	1	VPA 13	6.30	4.31	7.21	61.49	6.30	0.67	5.93	0.00
.	2 *	100.00	24.61	1	VPA 41	5.91	4.36	24.00	61.54	5.91	0.67	5.93	0.00
.	3 *	100.00	24.61	1	VPA 41	5.91	4.36	24.00	61.54	5.91	0.67	5.93	0.00
.	4 *	132.00	31.30	1	VPA 52	6.05	4.39	30.61	61.57	6.05	0.67	5.93	0.00

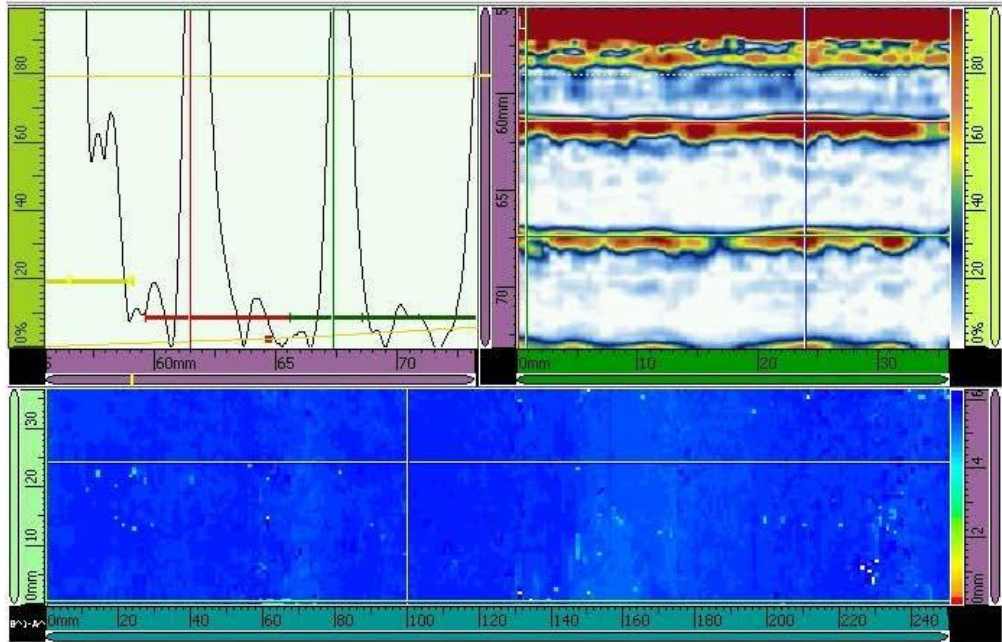
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>-1</sup> (A <sup>-1</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>-1</sup> (A <sup>-1</sup> )	I <sup>(max)</sup>	I <sup>U</sup> (max)	S <sup>(max)</sup>
.	1	62.00 mm	7.60 mm	1	VPA 13	6.30 mm	4.31 mm	7.21 mm	61.49 mm	6.30 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm

Comments

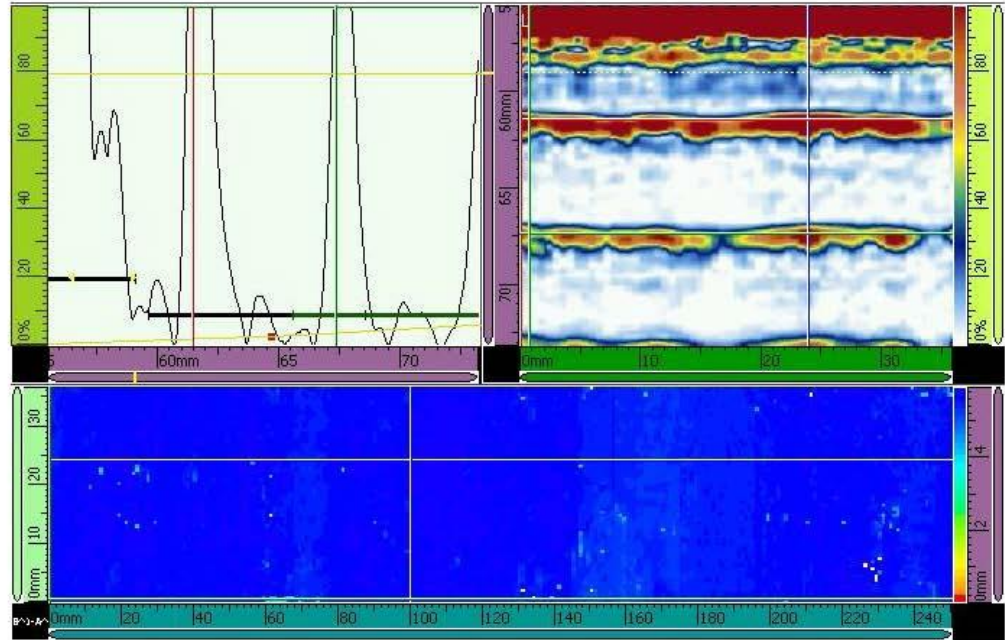
.



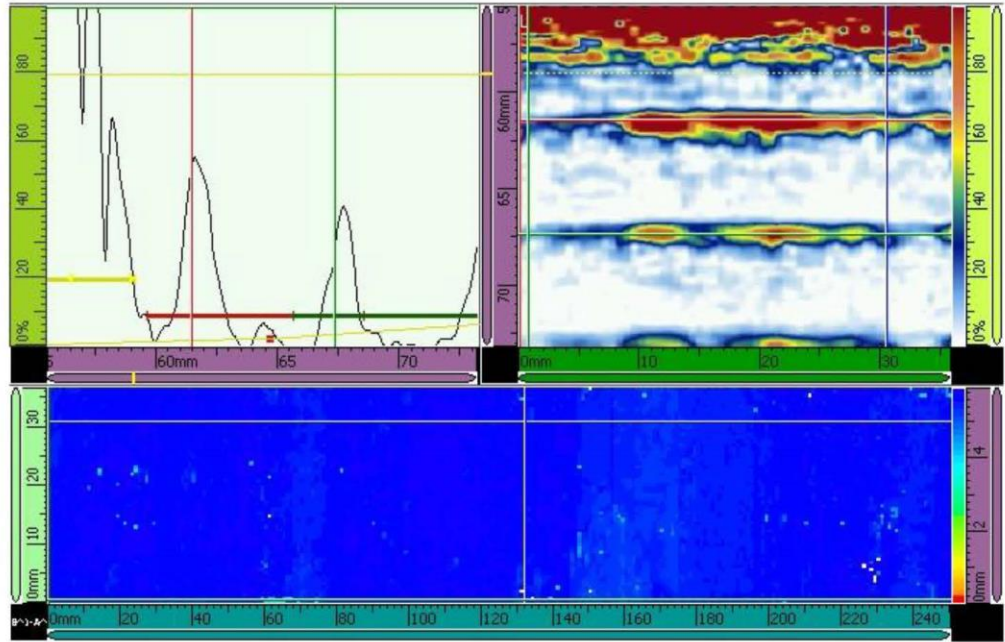
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B-1 (A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B-1 (A <sup>^</sup> )	U(x)	I-U(x)	S(x)
.	2	100.00 mm	24.61 mm	1	VPA 41	5.91 mm	4.36 mm	24.00 mm	61.54 mm	5.91 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B-1 (A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B-1 (A <sup>^</sup> )	U(x)	I-U(x)	S(x)
.	3	100.00 mm	24.61 mm	1	VPA 41	5.91 mm	4.36 mm	24.00 mm	61.54 mm	5.91 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>-1</sup> (A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>-1</sup> (A <sup>^</sup> )	U <sup>(m-r)</sup>	F <sup>U</sup> (m-r)	S <sup>(m-r)</sup>
.	4	132.00 mm	31.30 mm	1	VPA.52	6.05 mm	4.39 mm	30.61 mm	61.57 mm	6.05 mm	0.67 mm	5.93 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



Technician Name	_____
Technician Signature	_____
Contractor	_____
Date	_____

# Anexo D: Muestra 1405-084.



## OmniScan Report

Report Date	Report Version	File Name	Inspection Date	Inspection Version	Save Mode
2018 / 05 / 17	MXU - 4.2R2	inspeo corrosion.cps	2018 / 05 / 17	MXU - 4.2R2	Inspection Data
OmniScan Type	OmniScan Serial #	Module Type	Module Serial #	Data File Name	
OmniScan MX2	OMN12-101521	OMNI-M-PA1664	OMNI-800247	1405-084	

### PA1

#### Probe Characterization

Probe Model	Probe Serial #				
SL64-A12	M0158				
Probe Frequency	Peak Frequency	Wedge Model	Wedge Angle	Probe Aperture	
5.00 MHz	N/A	Contact	0.00°	N/A	
	Lower Frequency	Higher Frequency	Center Frequency	Bandwidth (MHz)	Bandwidth (%)
-6 dB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
-20 dB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Date	Time	Procedure	Calibration Block	Characterization Gain	A%
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

#### Setup

A: 0.00 SI: 000 L: 001						
Beam Delay	Start (Half Path)	Range (Half Path)	Max. Acq Rate	Type	Averaging Factor	
0.0 µs	55.52 mm	20.00 mm	60	PA	1	
Scale Type	Scale Factor	Video Filter	Trigger	Rectification	Filter	
Compression	3	On	0.00 µs	PNP	Band-pass 4.8 MHz (2.0 - 7.5 MHz)	
Voltage	Gain	Mode	Wave Type	Sound Velocity	Pulse Width	
40 (Low)	40.24 dB	PE (Pulse-Echo)	User-Defined	5524.6 m/s	100.00 ns	
Scan Offset	Index Offset	Skew	C-Scan Time Resolution	Digitizing Frequency	A-Scan Time Resolution	
0.00 mm	0.00 mm	90.0°	10.0 ns	100 MHz	30.0 ns	
Gate	Start	Width	Threshold	Synchro.	Peak Selection	
I	54.00 mm	5.00 mm	20.00 %	Pulse	Max Peak	
A	64.1 mm	8.89 mm	9.00 %	Edge	Max Peak	
B	4.03 mm	9.14 mm	9.00 %	A-peak	First Peak	
TCC Point Number	Position (Half Path)	Gain				
1	0.00 mm	0.0 dB				
2	10.16 mm	3.3 dB				
3	19.00 mm	6.5 dB				

#### Calculator

Element Qty. Used	First Element	Last Element	Resolution	Wave Type	Material Velocity
4	1	64	1.0	User-Defined	5524.6 m/s
Start Angle	Stop Angle	Angle Resolution	Focal Depth	Law Configuration	
0.00°	N/A	N/A	100.00 mm	Linear at 0°	

#### Part

<b>Material</b> STEEL, MILD	<b>Geometry</b> Plate	<b>Thickness</b> 9.53 mm
--------------------------------	--------------------------	-----------------------------

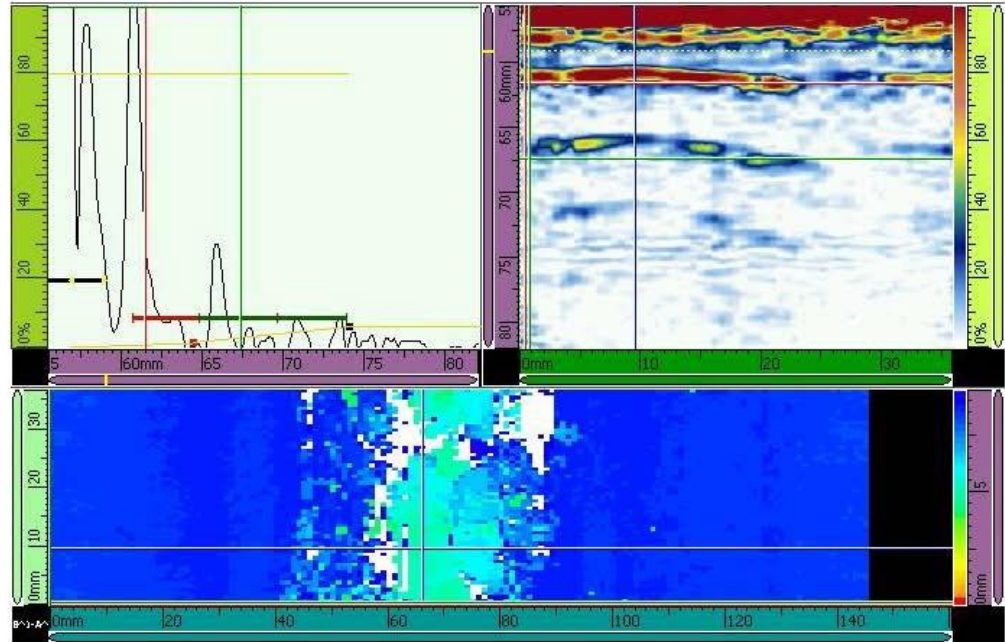
Scan Area

<b>Scan Start</b> 0.00 mm	<b>Scan Length</b> 160.00 mm	<b>Scan Resolution</b> 1.00 mm		
<b>Synchro. Encoder</b>	<b>Max. scan speed</b> 60.00 mm/s			
<b>Axis</b> Scan	<b>Encoder</b> 1	<b>Encoder Type</b> Quadrature	<b>Encoder Resolution</b> 12.02 step/mm	<b>Polarity</b> Normal

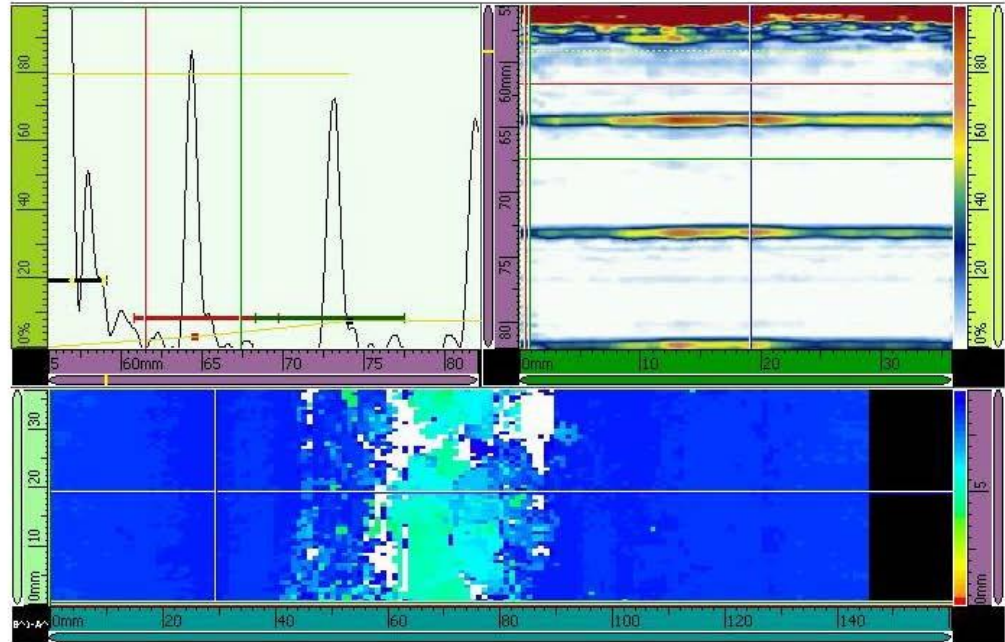
Table

Ref.	Indication #	Scan (mm)	Index (mm)	Group	Channel	B^1 (-A^)	DA^ (mm)	PA^ (mm)	SA^ (mm)	B^1 (-A^)	I(m-r)	I*U(m-r)	S(m-r)
-	1 *	66.00	10.03	1	VPA 17	5.06	3.54	9.61	60.72	5.06	0.33	5.90	0.00
	2 *	29.00	19.75	1	VPA 33	8.76	7.07	19.20	64.25	8.76	0.33	5.90	0.00
	3 *	68.00	25.83	1	VPA 43	4.81	3.48	25.19	60.66	4.81	0.33	5.90	0.00
	4 *	65.00	11.24	1	VPA 19	5.00	3.54	10.80	60.72	5.00	0.33	5.90	0.00
	5 *	107.00	12.46	1	VPA 21	8.81	6.88	11.99	64.06	8.81	0.33	5.90	0.00
	6 *	67.00	13.07	1	VPA 22	4.97	3.81	12.60	60.99	4.97	0.33	5.90	0.00
	7 *	70.00	36.16	1	VPA 60	4.28	3.78	35.41	60.96	4.28	0.33	5.90	0.00
	8 *	70.00	36.16	1	VPA 60	4.28	3.78	35.41	60.96	4.28	0.33	5.90	0.00
	9 *	105.00	36.77	1	VPA 61	8.87	7.24	35.99	64.42	8.87	0.67	5.93	55.40

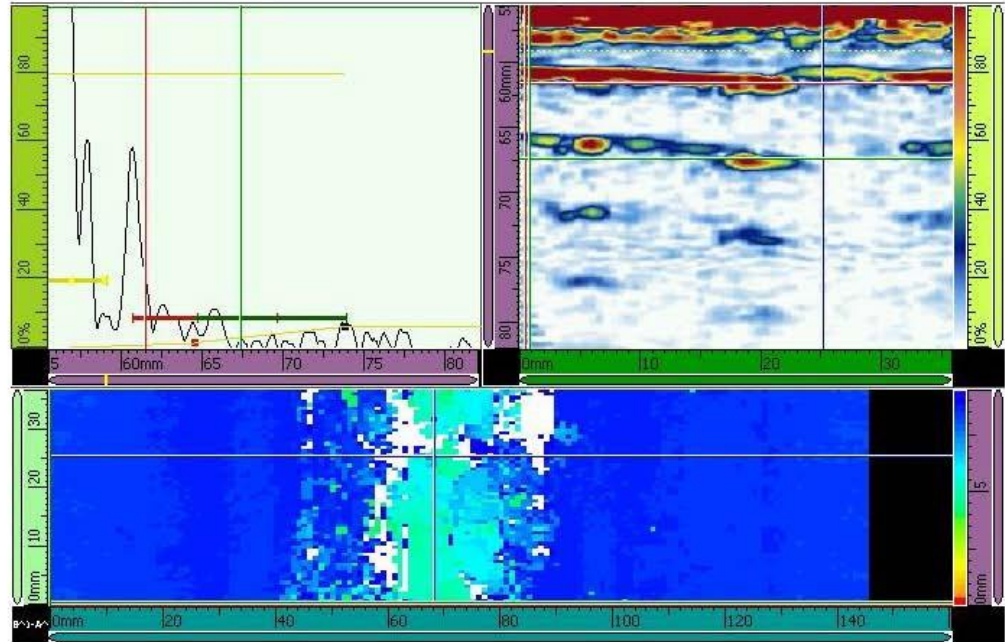
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B^1 (-A^)	DA^	PA^	SA^	B^1 (-A^)	I(m-r)	I*U(m-r)	S(m-r)
-	1	66.00 mm	10.03 mm	1	VPA 17	5.06 mm	3.54 mm	9.61 mm	60.72 mm	5.06 mm	0.33 mm	5.90 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
-													



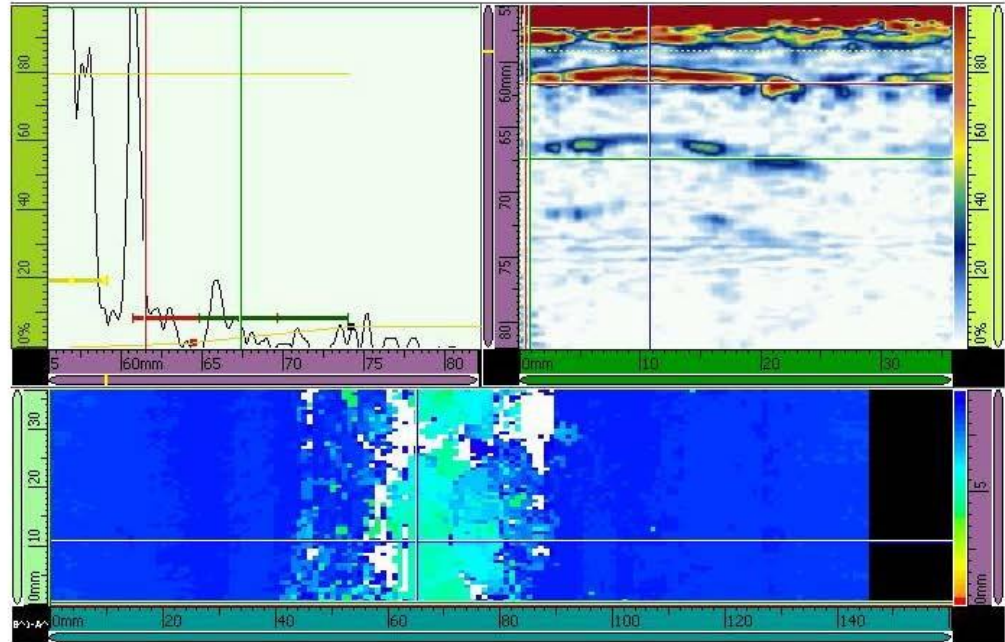
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B-1 (A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B-1 (A <sup>^</sup> ) I(n-x)	I-U(n-x)	S(n-x)	
.	2	29.00 mm	19.75 mm	1	VPA 33	8.76 mm	7.07 mm	19.20 mm	64.25 mm	8.76 mm	0.33 mm	5.90 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



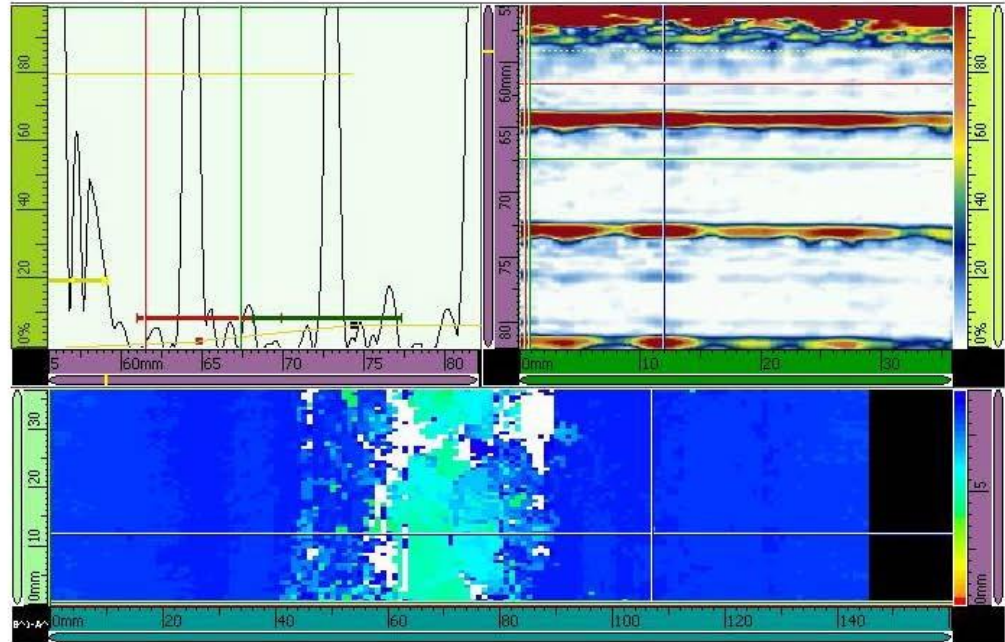
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>1</sup> (A <sup>1</sup> )	DA <sup>1</sup>	FA <sup>1</sup>	SA <sup>1</sup>	B <sup>1</sup> (A <sup>1</sup> ) I(n-x)	I-U(n-x)	S(n-x)	
.	3	68.00 mm	25.83 mm	1	VPA 43	4.81 mm	3.48 mm	25.19 mm	60.66 mm	4.81 mm	0.33 mm	5.90 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



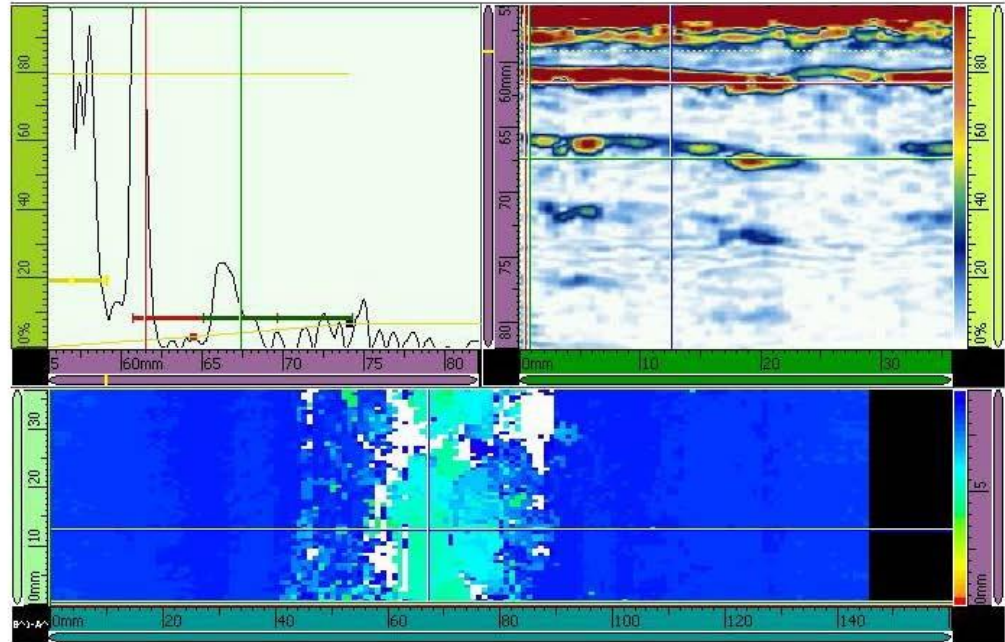
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B-1 (A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B-1 (A <sup>^</sup> ) I(n-x)	I-U(n-x)	S(n-x)	
.	4	65.00 mm	11.24 mm	1	VPA 19	5.00 mm	3.54 mm	10.80 mm	60.72 mm	5.00 mm	0.33 mm	5.90 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



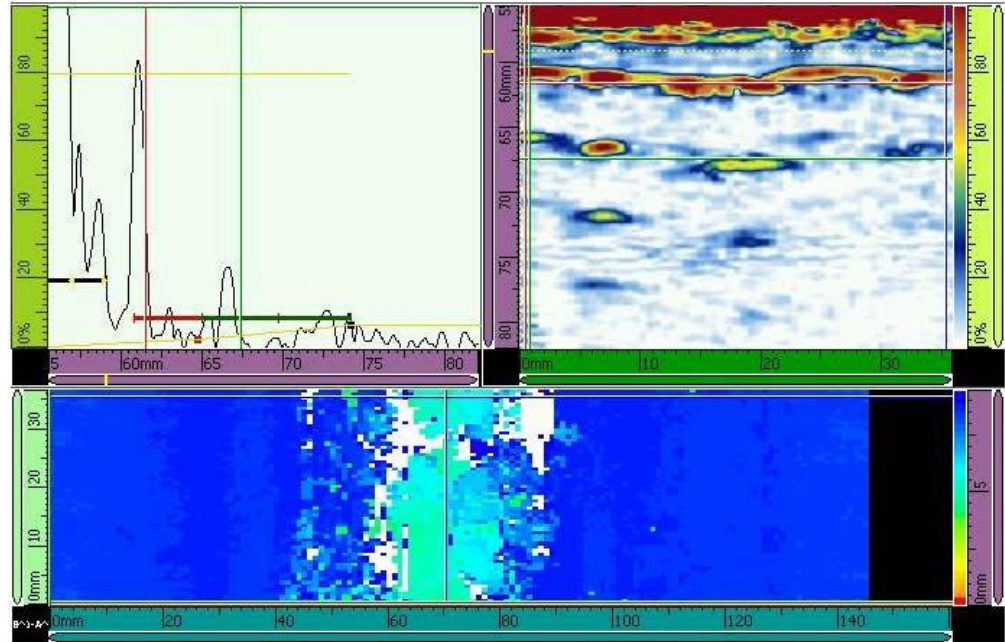
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>1</sup> (A <sup>1</sup> )	DA <sup>1</sup>	FA <sup>1</sup>	SA <sup>1</sup>	B <sup>1</sup> (A <sup>1</sup> ) I(n-x)	I-U(n-x)	S(n-x)	
.	5	107.00 mm	12.46 mm	1	VPA 21	8.81 mm	6.88 mm	11.99 mm	64.06 mm	8.81 mm	0.33 mm	5.90 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



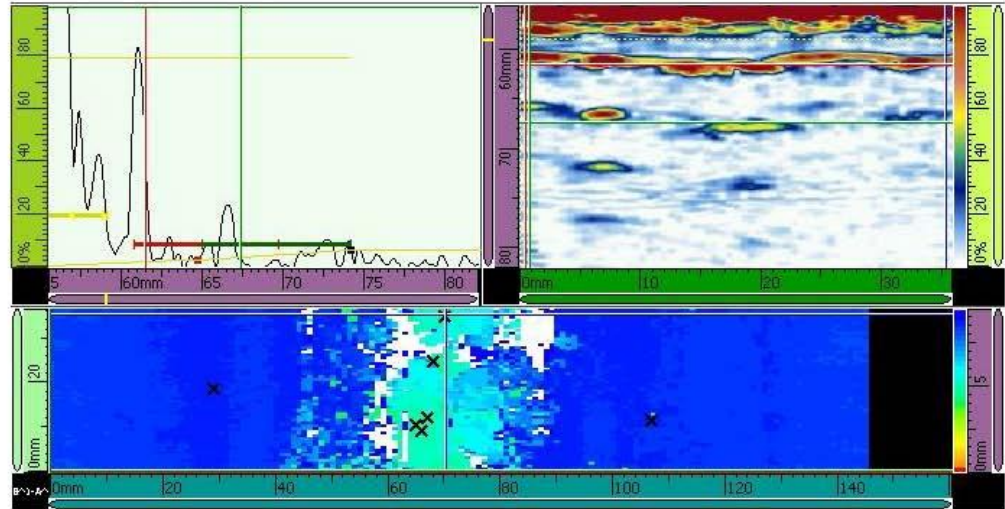
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>-1</sup> (A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>-1</sup> (A <sup>^</sup> ) I(n-x)	I-U(n-x)	S(n-x)	
.	6	67.00 mm	13.07 mm	1	VPA.22	4.97 mm	3.81 mm	12.60 mm	60.99 mm	4.97 mm	0.33 mm	5.90 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



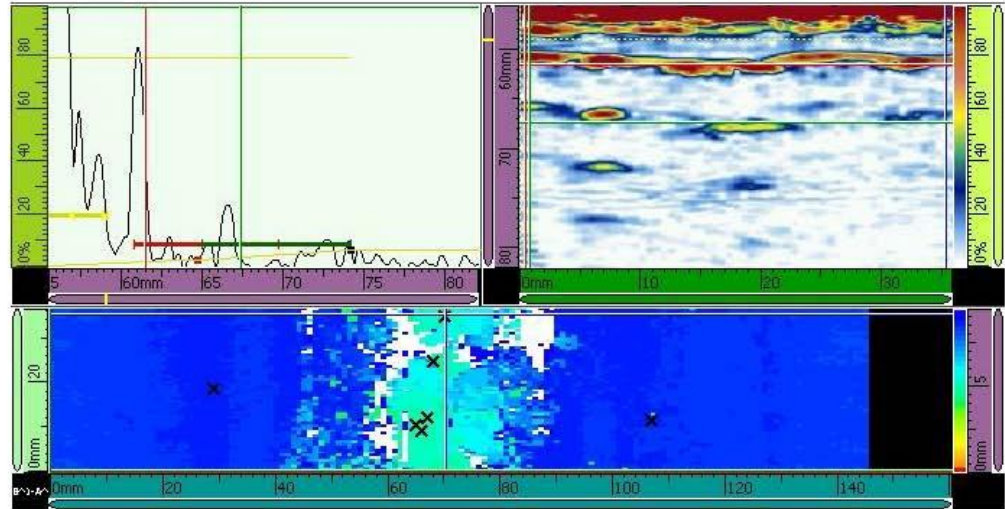
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>1</sup> (A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>1</sup> (A <sup>^</sup> ) I(n-x)	I-U(n-x)	S(n-x)	
.	7	70.00 mm	36.16 mm	1	VPA.60	4.28 mm	3.78 mm	35.41 mm	60.96 mm	4.28 mm	0.33 mm	5.90 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



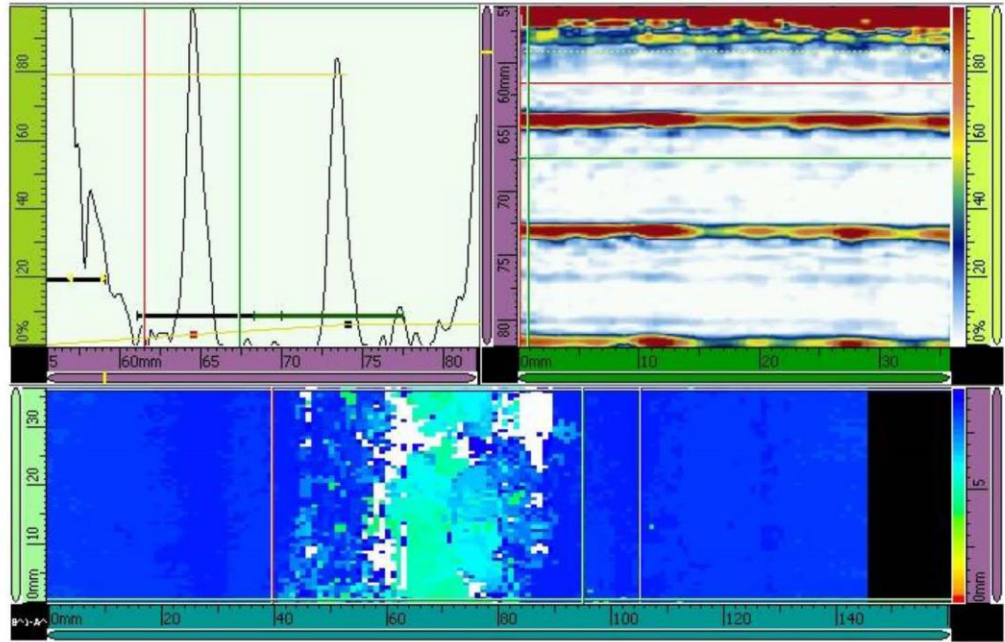
Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>-1</sup> (A <sup>^</sup> )	DA <sup>^</sup>	FA <sup>^</sup>	SA <sup>^</sup>	B <sup>-1</sup> (A <sup>^</sup> ) I(n-x)	I-U(n-x)	S(n-x)	
.	8	70.00 mm	36.16 mm	1	VPA.60	4.28 mm	3.78 mm	35.41 mm	60.96 mm	4.28 mm	0.33 mm	5.90 mm	0.00 mm
<b>Comments</b>													
.													



Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>1</sup> (A <sup>1</sup> )	DA <sup>1</sup>	FA <sup>1</sup>	SA <sup>1</sup>	B <sup>1</sup> (A <sup>1</sup> ) I(n-r)	I-U(n-r)	S(n-r)	
.	9	105.00 mm	36.77 mm	1	VPA 61	8.87 mm	7.24 mm	35.99 mm	64.42 mm	8.87 mm	0.67 mm	5.93 mm	55.40 mm
<b>Comments</b>													
.													



Ref.	Indication #	Scan	Index	Group	Channel	B <sup>1</sup> (A <sup>1</sup> )	DA <sup>1</sup>	FA <sup>1</sup>	SA <sup>1</sup>	B <sup>1</sup> (A <sup>1</sup> ) I(n-r)	I-U(n-r)	S(n-r)	
.	9	105.00 mm	36.77 mm	1	VPA 61	8.87 mm	7.24 mm	35.99 mm	64.42 mm	8.87 mm	0.67 mm	5.93 mm	55.40 mm
<b>Comments</b>													
.													



Technician Name \_\_\_\_\_

Technician Signature \_\_\_\_\_

Contractor \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_