

EVALUACIÓN DEL NÚMERO DE ELEMENTOS ACTIVOS DEL TRANSDUCTOR  
Y PROFUNDIDAD DE FOCALIZACIÓN EN EL MAPEO DE CORROSIÓN CON LA  
TÉCNICA DE ULTRASONIDO *PHASED ARRAY* APLICADA SOBRE TUBERÍA  
PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.

MARÍA CATALINA GARCÍA CAÑAS  
DAVID SANTIAGO PEÑA CAMACHO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2020

EVALUACIÓN DEL NÚMERO DE ELEMENTOS ACTIVOS DEL TRANSDUCTOR  
Y PROFUNDIDAD DE FOCALIZACIÓN EN EL MAPEO DE CORROSIÓN CON LA  
TÉCNICA DE ULTRASONIDO *PHASED ARRAY* APLICADA SOBRE TUBERÍA  
PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.

MARÍA CATALINA GARCÍA CAÑAS  
DAVID SANTIAGO PEÑA CAMACHO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
METALÚRGICO

DIRECTOR

M. Sc. CARLOS ANDRÉS GALÁN PINILLA  
Magister en Ingeniería de Materiales

CODIRECTOR

PhD. ANA MARÍA PERÉZ CEBALLOS  
Doctora en Ingeniería

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD INGENIERÍA DE FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA

2020

## DEDICATORIA

*A Dios por su voluntad guiadora y sabiduría, por permitirme estar siempre cerca de personas que le dan un significado a mi vida.*

*A mis padres: Esperanza y Julio, por su apoyo y confianza en mí, especialmente mi madre por ser incondicional, pilar fundamental de todo lo que soy, mi guía, ejemplo y mejor amiga quién siempre me demuestra toda la fuerza que podemos tener en nuestro interior.*

*A mi familia, por creer en mí y darme confianza, mi abuela por su cariño y mis tías y primas por enseñarme el valor de la unidad que desde la distancia me han brindado amor y comprensión, principalmente mi prima Slendy quién siempre me ha dado ánimo para ser mejor, ejemplo de disciplina y fortaleza.*

*A mi compañero de tesis Peña, por su apoyo, quién compartió conmigo esta experiencia y aportó en mi crecimiento personal y profesional.*

*A mis amigos por demostrar que la universidad es mi segunda familia, ser mi apoyo en diferentes momentos, tener una visión nueva de la vida, hacer mis días más tranquilos, enseñarme el valor de la amistad y trabajo en equipo: Mayeye, Mafelandia, Margotik, Julián, Luisa Sure, Caritos Sol y Saah, Kate ping, Yeni \$, Pau, Jhon A, Harolito, Hernando, Johan, César, todos mis panes, las niñas, QAP, mi equipo ex ce, además mis amigos del colegio que abrieron un lugar en su corazón para mi Tatis, Yenidza, Rangel, Geral y Jose.*

*Al equipo de Tenis de mesa de la universidad por enseñarme que no importa el momento ni la experiencia, podemos aprender una habilidad nueva y adquirir un hábito con constancia y entusiasmo.*

**MARÍA CATALINA GARCÍA CAÑAS**

*A Dios por ser ese Ser que me dio el impulso para seguir adelante en todos los momentos de mi vida académica.*

*A mis papás: Efraín y Rocío por apoyarme en todo momento de la vida, guiarme por los caminos de la vida, compartir los triunfos y derrotas, inculcarme los más grandes valores y estar siempre pendiente de mí.*

*A mis demás familiares por toda la compañía, apoyo, enseñanzas y momentos vividos en estos 24 años de vida.*

*A la profesora Ana Emilse Coy Echevarría por haberme dado una nueva oportunidad de vida académica el 6 de octubre de 2015 a las 5:27 P.M, nunca olvidaré ese momento y siempre lo tendré presente.*

*A Daniela Zuluaga Puentes (ZULU DE MI CORA) por haber llegado a mi vida a enseñarme lo que es el amor, la dedicación, el esfuerzo, a soñar en grande y a compartir experiencias hermosas y únicas que nunca se borrarán de mi mente, gracias por tu apoyo incondicional y haber estado ahí en esta última etapa universitaria.*

*A Cañitas por darme la confianza de ser su compañero de proyecto y a mis amigos que en estos 7 años de vida académica estuvieron de alguna manera conmigo: Papi Wilson y papi Diego, por haber compartido y vivido conmigo desde el primer momento las muchas experiencias, situaciones inigualables y la lucha académica, “siempre condi nunca incondi”. A Luengas y Sandy que desde el 2013 y a pesar de que académicamente vivimos poco, siempre hemos estado ahí dándonos apoyo y diversión a la distancia. A Brayán y Julián que, a pesar de ser de pensamientos diferentes, desde un principio por allá en el 2014 encajamos y vivimos la mejor etapa de la vida universitaria. A Aleja y a Sofía por mostrarme la vida de una manera diferente.*

*A mis amigos de la carrera, especialmente a Elio, que estuvo ahí conmigo, par con par, pasando las buenas, las malas y las maduras y a: Steven, Milton, Dani Towers, Pedraza, Kevin Flowers, el Topo, Quiroz, Serch, Gabicar, Diego Tirado, Santorini, la Flaka, Umaña viejo, Sabogal, OtisBB, EsmeBB, Dani Tarazona, Maria Andrea, John Alex, Sergio 4:20, el Paisa, Vergara, Bebecito, César y demás compañeros de la carrera que de una u otra manera convivimos en nuestro segundo hogar, la universidad y el centro de estudios de metalúrgica y lo volvimos algo más que un lugar de estudio.*

**DAVID SANTIAGO PEÑA CAMACHO**

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de este trabajo de investigación no hubiese sido posible sin la colaboración de muchas personas que con su ayuda desinteresada aportaron un granito de arena para el éxito de este proyecto.

En primer lugar, a Dios, a nuestro director del proyecto, Ingeniero Carlos Galán y codirectora Ingeniera Ana María Pérez, por haber confiado en nuestras capacidades y permitido trabajar con ellos, en verdad muchas gracias de todo corazón.

A los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Oscar y Sergio, por su incondicional ayuda y tiempo prestado durante toda la realización del trabajo. Al grupo GIMAT por la disposición de su equipo a la hora de realizar este proyecto. Queremos además expresar nuestra admiración y gratitud inmensa a los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por su orientación y aporte en nuestra formación profesional y humana, desde nuestro primer profesor Iván Uribe, pasando por Pedro Del Basto, Ángel Melendez, Ana Emilse Coy, Cristián Viáfara, Jhon Freddy Palacios, Miltón Manrique, Carlos Oviedo, Andrés González, Sandra García, Mauricio Rincón, Ana María Pérez, Sergio Blanco, Darío Peña, nuestro querido director Carlos Galán y demás profesores por su orientación y gran aporte en nuestra formación humana y profesional. También a la secretaria de la escuela Patty y Yaddy, por su colaboración en todo este tiempo.

A nuestros familiares por su comprensión, apoyo inmenso, su amor y por habernos fomentado el deseo de conseguir y lograr nuestras metas.

A nuestros amigos que durante estos años nos brindaron cariño, apoyo, confianza y sinceridad, por ser nuestra segunda familia y hacer que la vida universitaria fuera entretenida, algo más allá que estudiar.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS .....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
2. MARCO TEÓRICO .....	16
2.1 ESTADO DEL ARTE .....	16
2.2 GENERALIDADES DEL ULTRASONIDO .....	17
2.3 TÉCNICA DE ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES, PHASED ARRAY (PA).....	17
2.4 PROPIEDADES DE LOS TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS DE PA..	18
2.5 PERFIL DEL HAZ ULTRASÓNICO EN LA PIEZA .....	19
2.6 MECANISMOS DE CORROSIÓN .....	20
3. METODOLOGÍA.....	21
3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.2 ETAPA 2: DISEÑO DEL BLOQUE PATRÓN .....	22
321 Actividad 1: Diseño del bloque patrón.....	22
3.2.2 Actividad 2: Fabricación del bloque patrón.....	24
3.3 ETAPA 3: CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL DEL BLOQUE PATRÓN Y LA SECCIÓN DE TUBERÍA.....	25
3.3.1 Actividad 1: Caracterización dimensional con microscopía óptica.....	26
3.3.2 Actividad 2: Capacitación en el uso del equipo de PA.....	26
3.3.3 Actividad 3: Caracterización dimensional de los daños a partir de PA en el bloque patrón y en la sección de tubería.....	27
3.4 ETAPA 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	27
3.5 ETAPA 5: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL .....	27
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28

4.1 FABRICACIÓN DEL BLOQUE PATRÓN.....	28
4.2 CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL CON MICROSCOPIA ÓPTICA DEL BLOQUE PATRÓN.....	28
4.3 MEDICIÓN DE LOS DAÑOS OBTENIDOS CON PA SOBRE EL BLOQUE PATRÓN (MAPEO DE CORROSIÓN C-SCAN) .....	30
4.4 CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL CON MICROSCOPIA ÓPTICA DE LA TUBERÍA.....	35
4.1 MEDICIÓN DE LOS DAÑOS EMPLEANDO PA SOBRE LA TUBERÍA (MAPEO DE CORROSIÓN C-SCAN).....	37
5. CONCLUSIONES .....	41
6. RECOMENDACIONES.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXOS .....	48

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Estado del conocimiento .....	16
Tabla 2. Diseño de experimentos realizado para la técnica Phased Array (PA).....	24
Tabla 3. Dimensiones de diámetro y espesor en milímetros obtenidas con en el microscopio óptico confocal HIROX KH7700 del bloque patrón.....	29
Tabla 4. Dimensiones de diámetro y espesor en milímetros obtenidas con PA sobre los 3 barrenos en el bloque patrón. ....	33
Tabla 5. Dimensión de espesor en milímetros obtenidas con en el microscopio óptico confocal HIROX KH7700 de la sección de tubería. ....	37
Tabla 6. Dimensiones de espesor en milímetros obtenidas con PA sobre los dos daños de la sección de tubería.....	39

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fundamentación teórica: a) Esquema del principio de la técnica de PA; b) Palpador Olympus 5L64 con arreglo lineal usado en la técnica de PA; c) El campo de un transductor de PA. ....	18
Figura 2. Esquema de la metodología realizada para el desarrollo del proyecto.....	21
Figura 3 . Diseño del bloque, unidades en [cm]. A) Vista lateral, B) Vista 3D, C) vista superior.....	23
Figura 4. Bloque patrón.....	28
Figura 5. Macrografías, reconstrucciones 3D y perfiles de daño de los tres barrenos del bloque patrón analizados con en el microscopio óptico confocal HIROX KH7700 a 35X. ....	29
Figura 6. Mapeo de corrosión C-Scan aplicado sobre el bloque patrón. ....	32
Figura 7. Diagrama de Pareto para el diámetro y espesor estandarizado. ....	34
Figura 8. Sección de tubería con los daños seleccionados y caracterizados dimensionalmente con el microscopio óptico confocal HIROX KH7700 35X. ....	36
Figura 9. Mapeo de corrosión C-Scan aplicado sobre la sección de tubería. ....	38

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Reporte del OmniScan realizado sobre el daño 1 de la sección de tubería ..	48
Anexo B. Planes de inspección de PA .....	49
Anexo C. Toma de dureza de la placa patrón ASTM A36 .....	49
Anexo D. Composición química placa patrón ASTM 36 .....	49
Anexo E. Microestructura placa patrón acero ASTM A36 .....	50
Anexo F. Equipo de PA usado en el trabajo de investigación. ....	51
Anexo G. Morfología superficial de los barrenos de la placa patrón.....	52
Anexo H. Promedio de porcentaje de daño para los planes de inspección. ....	54

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DEL NÚMERO DE ELEMENTOS ACTIVOS DEL TRANSDUCTOR Y PROFUNDIDAD DE FOCALIZACIÓN EN EL MAPEO DE CORROSIÓN CON LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY APLICADA SOBRE TUBERÍA PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS \*

**AUTORES:** García Cañas, María Catalina; Peña Camacho, David Santiago\*\*

**PALABRAS CLAVE:** ULTRASONIDO, *PHASED ARRAY*, CORROSIÓN, BLOQUE PATRÓN, TUBERÍA

En la detección y evaluación de daños por corrosión en servicio de tuberías de transporte se utilizan comúnmente técnicas de Ensayos No Destructivos, END, entre ellas *Phased Array (PA)*, la cual permite realizar mapeos brindando visualizaciones que suministran información cualitativa y cuantitativa para poder elaborar un análisis detallado de la anomalía detectada sin afectar su aplicación. Esta técnica permite realizar modificaciones a las características del haz ultrasónico y a los parámetros de barrido; Sin embargo, la configuración del equipo o selección de variables están a cargo del inspector y no se conocen criterios para la selección ni datos del efecto de cada parámetro sobre los resultados obtenidos. Por lo anterior, en el presente trabajo se aplicó la técnica de *PA* para realizar mapeos de corrosión sobre un bloque patrón de bajo carbono, en el cual se mecanizaron pérdidas de material en 3 barrenos, correspondientes a diferentes grados de corrosión y mapeos sobre una tubería usada en el transporte de hidrocarburos sacada de servicio. Además, se evaluó el efecto del número de elementos activos del palpador y la profundidad de focalización del haz ultrasónico para evaluar la exactitud de las mediciones hechas por medio de esta técnica para lo cual se utilizaron 6 planes de inspección que combinaron las variables anteriormente mencionadas y el grado de daño D/t. Los resultados mostraron que, la mejor combinación en los planes de inspección al momento de hacer la medición fue de 12 elementos, focalizados y un grado de daño pequeño para el diámetro y espesor, mientras que las combinaciones con mayor error fueron 4 elementos sin focalización con un daño grande para el diámetro y 8 elementos sin focalizar con un tamaño de grado mayor, siendo el grado el daño el factor que estadísticamente influye más en la desviación de las mediciones.

---

\* Trabajo de grado (modalidad, trabajo de investigación)

\*\* Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas.

Escuela de Ingeniería y Ciencia de los Materiales.

Director: M.Sc. Carlos Andrés Galán Pinilla; Codirector: Ph.D Ana María Pérez Ceballos.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE NUMBER OF ACTIVE ELEMENTS OF THE TRANSDUCER AND DEPTH OF TARGETING IN CORROSION MAPPING WITH THE ULTRASOUND PHASED ARRAY TECHNIQUE APPLIED ON PIPE FOR THE TRANSPORT OF HYDROCARBONS \*

**AUTHORS:** García Cañas, María Catalina; Peña Camacho, David Santiago \*\*

**KEY WORDS:** ULTRASOUND, PHASED ARRAY, CORROSION, STANDARD BLOCK, PIPE

Non-Destructive Testing (NDT) techniques, including Phased Array (PA), are commonly used in the detection and evaluation of corrosion in transport pipeline services, which allows mapping to be carried out, providing visualizations that show qualitative and quantitative information in order to elaborate a detailed analysis of the detected anomaly without affecting their application. This technique allows modifications to be made to the characteristics of the ultrasonic beam and to the scanning parameters. However, the equipment configuration or variable selection is the inspector's responsibility and there is no known criteria for the selection nor data about the effect of each parameter on the results obtained. Therefore, in this work, the PA technique was applied to perform corrosion mapping on a low-carbon standard block, in which material losses were machined in 3 holes, corresponding to different degrees of corrosion and mapping on a pipeline used in the transportation of hydrocarbons that was taken out of service. In addition, the effect of the number of active elements of the probe and the depth of focus of the ultrasonic beam were evaluated to assess the accuracy of the measurements made using this technique, for which 6 inspection plans were used that combined the aforementioned variables and the degree of damage  $D/t$ . The results showed that the best combination in the inspection plans at the time of measurement was 12 elements, focused and a small degree of damage for the diameter and thickness, while the combinations with the greatest error were 4 elements without focus with a large damage for the diameter and 8 non-focalized elements with a larger degree size, the degree of damage being the factor that statistically influences the measurement deviation more.

---

\* Degree work (sort, research work)

\*\* Department of Physicochemistry engineering.

School of metallurgical engineering and science of the materials.

Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. Co-director: Ana María Perez Ceballos.

## INTRODUCCIÓN

Los Ensayos No Destructivos, END, son técnicas ampliamente utilizadas a nivel industrial y académico, para obtener información detallada de la condición, características del componente inspeccionado y detectar de manera oportuna la presencia de discontinuidades, anomalías y mecanismos de daño durante su proceso de fabricación o durante servicio sin afectar su uso<sup>1</sup>. Por su parte, la técnica de ultrasonido *Phased Array (PA)* ofrece ventajas en la inspección de soldaduras y piezas, en la evaluación de daños por corrosión, entre otras; mediante la generación de ondas ultrasónicas por transductores de múltiples elementos, con alta versatilidad para modificar parámetros del haz ultrasónico como la apertura y la focalización de la energía. A pesar de los aportes, investigaciones y avances tecnológicos en esta línea, la configuración, selección y calibración de las múltiples variables de inspección por parte de los operarios entrenados es complicada<sup>2</sup>. En este sentido, publicaciones científicas mencionan que esta técnica puede llegar a presentar problemas obteniendo información errónea al realizar mapeos de corrosión<sup>3</sup>. Con base a ello, surge la pregunta de investigación: ¿la variación del número de elementos activos y la profundidad de focalización electrónica afectan la exactitud de la medición de pérdidas localizadas de material por corrosión en tubería de transporte de hidrocarburos? Con el objetivo de resolver esta pregunta, en el presente proyecto se diseñó y fabricó un bloque patrón de acero al carbono, con daños artificiales mecanizados simulando corrosión localizada, con morfología ideal tipo barrenado de fondo plano, clasificadas en los dos rangos de daño: intermedio y severo, los cuales fueron caracterizados con la técnica PA. Las mediciones realizadas permitieron analizar el comportamiento de la técnica, fue posible corroborar que las variables de inspección evaluadas en el presente trabajo

---

<sup>1</sup> ECHEVARRIA, Ricardo. Ultrasonido. Universidad Nacional De Comahue, Facultad de Ingeniería: Laboratorio de ensayos no destructivos. 2002. [Consultado el 14-04-2019]

<sup>2</sup> MARINO, Jose Pablo Estudio de integridad Estructural mediante Ultrasonidos Phased Array. Concepción, Chile, 2014. [Consultado el 09-03-2019]

<sup>3</sup> LYASOTA; Igor; RYNCARZ, Tomasz; KOZUB, Barbara. Acoustic emission study of pressure vessels material degradation processes after long-term operation in the refinery industry, 2019. [En línea] [13 de agosto de 2019] Disponible en: <<https://www.ndt.net/article/ewgae2018/papers/7.pdf>> [Consultado el 15-03-2019]

afectaron la exactitud de los resultados obtenidos. Finalmente, se inspeccionaron daños reales de una sección de tubería de transporte de hidrocarburos fuera de servicio, debido a daños por corrosión, verificando que el comportamiento de la técnica fue concordante con los resultados obtenidos de los daños simulados.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto del número de elementos activos del palpador y la profundidad de focalización empleados en el mapeo de corrosión localizada con la técnica de ultrasonido *Phased Array* en una tubería de acero de bajo carbono para transporte de hidrocarburos.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Diseñar un bloque patrón con acero de bajo carbono induciendo pérdidas de material localizadas con morfología regular y dimensiones específicas mediante mecanizado.

Analizar el efecto del número de elementos activos seleccionados y la profundidad de focalización del haz ultrasónico sobre los resultados obtenidos en el mapeo de corrosión de las probetas en estudio.

Caracterizar dimensional y morfológicamente los tipos de corrosión seleccionados para el estudio presente en una sección de tubería de transporte de hidrocarburos que ha salido de servicio por presentar niveles de daño no permitidos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ESTADO DEL ARTE

En la siguiente tabla se resumen los artículos principales relacionados con la investigación realizada.

**Tabla 1.** Estado del conocimiento

AUTOR	RESULTADOS ENCONTRADOS	RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES
IoTurcu.Jedemski, Treppe [4]	Se usó la probabilidad de detección de defectos, POD, junto a la técnica <i>Phased Array</i> a temperatura alta lo que se complica debido a la atenuación del haz y la pérdida de intensidad en el área cerca de la superficie.	Es necesario calibrar la sensibilidad del equipo para intervalos de alta temperatura y no usar acoplantes a base de silicona ya que no son químicamente compatibles.
Lachance, Guiere, Turcotte [5]	La mejora en la caracterización de defectos junto a técnicas de imagen avanzada como lo son FMC y TFM, garantizan trazabilidad y seguimiento de la propagación del defecto en el tiempo.	El operario debe establecer correctamente los parámetros acústicos del equipo para garantizar una buena relación señal-ruido, lo que a su vez aumenta la comprensión del comportamiento del defecto.
Doubury, Rusell, Lowe [6]	Los cambios en propiedades de elementos como la sensibilidad y fase en el rendimiento en los palpadores hacen que se afecte la amplitud del pico de ultrasonido.	Se puede mantener la integridad del equipo al realizar calibraciones de inspección ultrasónica de pulso-eco cuando se toma una amplitud de 8dB, con una sensibilidad del 50%.
Poguet, Jérôme, et al [7]	Los cambios en variables como la profundidad de focalización, pitch y el ángulo, son decisivos en la inspección de piezas sometidas a corrosión bajo tensión y fatiga.	Usar el POD sumado a otro método para que la probabilidad de detección de fallas específicas sea precisa, además de un análisis para inspeccionar e interpretar imágenes.

## 2.2 GENERALIDADES DEL ULTRASONIDO

El ultrasonido usa ondas mecánicas que requieren un medio de transmisión para ser propagadas, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Estas se transmiten por vibración con longitudes de ondas cortas y frecuencias mayores a 20 KHz, las cuales no son percibidas por el oído humano. La onda de ultrasonido forma un haz de tamaño pequeño para ser transmitido debido a que no se propaga en todas las direcciones<sup>4</sup>.

## 2.3 TÉCNICA DE ULTRASONIDO POR ARREGLO DE FASES, *PHASED ARRAY (PA)*

Dependiendo del medio en el que se propaguen las ondas de sonido, estas viajan a una velocidad específica, cuando entran al límite con otro medio, estas se transmitirán o se reflejarán según leyes conocidas, este es el principio en el cual está basado la técnica de ultrasonido, donde las discontinuidades en el material generan una impedancia acústica <sup>5</sup>. Al captar las señales de las ondas reflejadas se puede obtener información sobre características de la discontinuidad detectada, como: tamaño, ubicación y forma. Una onda de ultrasonido se genera por transductores piezoeléctricos que transforman los estímulos eléctricos en sonido y viceversa. Los transductores de *PA* contienen cristales piezoeléctricos organizados (de 16 hasta 256) que generan ondas ultrasónicas al activarse independientemente en tiempos levemente diferentes al recibir el pulso de energía eléctrica de alto voltaje y duración corta (ver figura 1a y 1b), la figura 1a muestra el principio de la técnica y sus partes: Oscilador de formación de haz (TX), transductores ultrasónicos (T), elementos activos( $\Phi$ ), sistema de control de microprocesador (C), ángulo del haz de sonido emitido.

Cuando las ondas de ultrasonido regresan al cristal provenientes de la reflexión

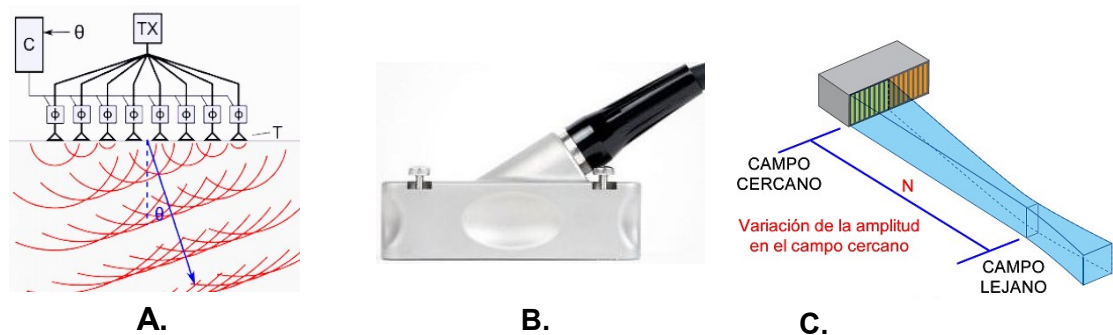
---

<sup>4</sup> OLYMPUS NDT. Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications. En: NDT Field Guides 2010, Canada [Consultado el 12-05-2019]

<sup>5</sup> SANTOS DE LA CRUZ, Eulogio, et al. El Ultrasonido y su Aplicación, Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial-UNMSM, vol. 8, p. 25-26-27-28, junio 2005. [Consultado el 26-04-2019]

desde la discontinuidad y/o pared posterior del material modifican el cristal, lo cual produce una señal eléctrica que se amplifica y analiza, dando datos sobre el tiempo de vuelo y amplitud de la señal<sup>6</sup>.

**Figura 1.** Fundamentación teórica: a) Esquema del principio de la técnica de PA; b) Palpador Olympus 5L64 con arreglo lineal usado en la técnica de PA; c) El campo de un transductor de PA.



Fuente: a) Adaptado de CHETVRON <sup>7</sup> b) Adaptado de OLYMPUS OMNISCAN <sup>8</sup> c) Adaptado de OLYMPUS NDT <sup>9</sup>

## 2.4 PROPIEDADES DE LOS TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS DE PA

Los transductores ultrasónicos presentan características básicas que definen el uso y alcance, donde el tipo de palpador indica la forma de contacto con la pieza, requiriendo líneas de retardo, acople de zapatas a cero grados o angulares, el tipo

<sup>6</sup> MOLES, Michael, *et al.* Introduction to phased array ultrasonic technology applications. tercera. Canada: Olympus NDT, 2007. [Consultado el 22-04-2019]

<sup>7</sup> CHETVORNO, Phased array animation with arrow 10frames 371x400px 100ms.gif. Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication [En línea] [20 de diciembre de 2019] Disponible en: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Phased\\_array\\_animation\\_with\\_arrow\\_10frames\\_371x400px\\_100ms.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Phased_array_animation_with_arrow_10frames_371x400px_100ms.gif)> [Consultado el 06-05-2019]

<sup>8</sup> OLYMPUS OMNISCAN MX2, Software MXU – 4.3R1, Palpador 5L64-A12, Cuña SA10-N55S; SA 10-0L, [en línea] [20 de diciembre de 2019] Disponible en: <<https://www.olympus-ims.com/es/probes/pa/universal/>> [Consultado el 08-05-2019]

<sup>9</sup> OLYMPUS NDT. Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications. Canada, 2010. p.31. [Consultado el 12-05-2019]

de arreglo de los cristales dentro del transductor, siendo para este proyecto lineal con zapata a cero grados. Seguidamente el tamaño del palpador define ciertas características del haz, siendo variable para el caso de PA a criterio del inspector. Por otra parte, el ancho de banda caracteriza la porción de frecuencias que generan los cristales, ya que industrialmente no es posible generar una frecuencia específica y su valor se relaciona con la sensibilidad por la longitud de onda para cada material.

## 2.5 PERFIL DEL HAZ ULTRASÓNICO EN LA PIEZA

El perfil del haz sonoro generado por un transductor se divide en dos zonas principales: el campo cercano y el campo lejano (ver figura 1c). El campo cercano es la región cercana al transductor donde la presión del sonido atraviesa una serie de máximos y mínimos, y termina en el último máximo en el eje a una distancia  $N$  de la cara. La distancia de campo cercano  $N$  representa el foco natural de la apertura activa configurada por el inspector.

El campo lejano es la región más allá de  $N$  donde la presión del sonido cae gradualmente a cero a medida que el diámetro del haz se expande y su energía se disipa. La distancia de campo cercano se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$N = \frac{kL^2 f}{4c} \quad \text{ó} \quad N = \frac{kL^2}{4} \quad (1)$$

dónde:

$N$  = longitud de campo cercano

$f$  = frecuencia

$k$  = constante de relación de aspecto (0,99)

$c$  = velocidad del sonido en el material

$L$  = longitud de elementos

$\lambda$  = longitud de onda

## 2.6 MECANISMOS DE CORROSIÓN

La corrosión es la pérdida de material debido a la reacción con el ambiente en el cual está expuesto. Las reacciones de la corrosión dentro de tuberías de transporte de hidrocarburos involucran la propagación de carga entre el metal y el electrolito<sup>10</sup>. Existen dos tipos de corrosión, la corrosión uniforme que es una corrosión distribuida uniformemente sobre la superficie de un material; esta puede ocurrir en zonas aisladas de la tubería, su mecanismo está basado en la formación de ánodos y cátodos cercanos e intercambiables sobre la superficie mecánica dándose principalmente cuando los metales están expuestos a los ácidos y la corrosión localizada que se ubica en áreas pequeñas y específicas, tienen la forma de cavidades que se inician en la superficie metálica, se forman por el proceso de disolución anódica local donde la pérdida de metal es acelerada por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo mucho mayor<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Manual del curso sobre corrosión interna en tubería, Nace international, Julio, 2007, cap 1, p.2.  
[Consultado el 7-06-2019]

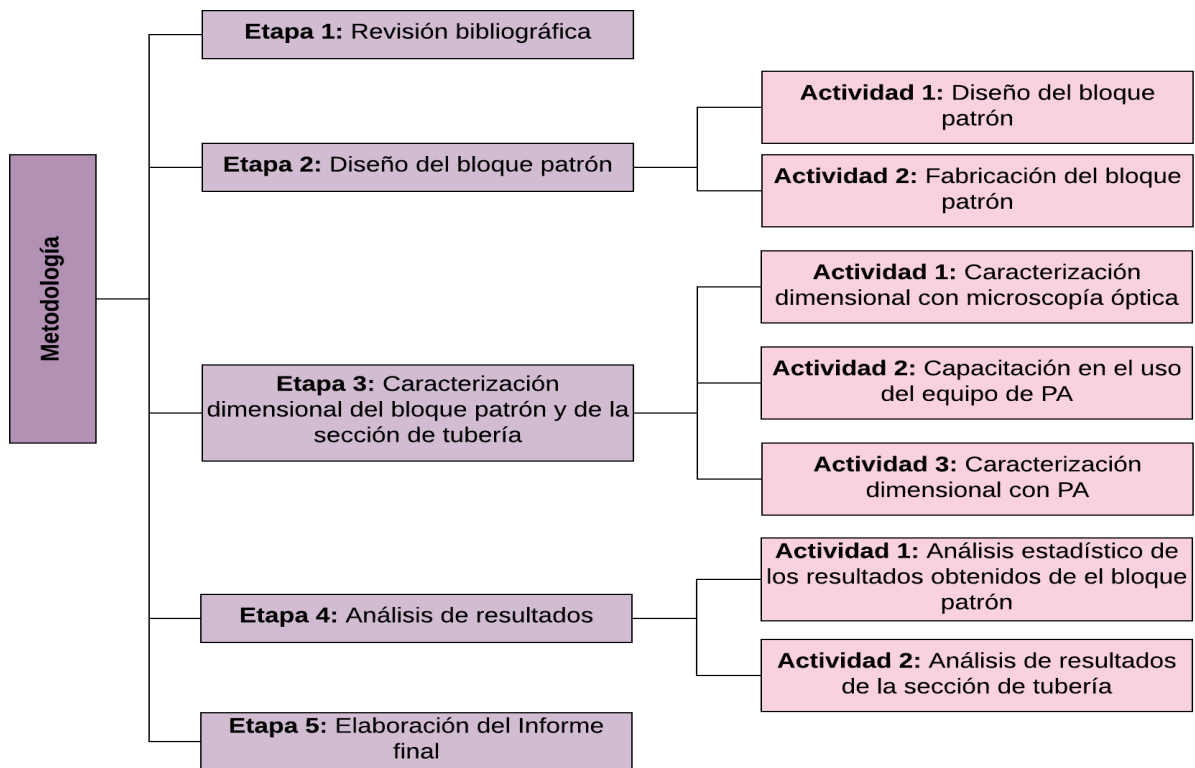
<sup>11</sup> Manual del curso sobre corrosión interna en tubería, Nace international, Julio, 2007, cap 1, p.5.  
[Consultado el 9-06-2019]

VILA CASADO, Gustavo. Corrosión, electroquímica, mecanismos y métodos de control. Bogotá, 1989.  
[Consultado el 14-06-2019]

### 3. METODOLOGÍA

En la figura 2 se presentan las cinco (5) etapas de la metodología que se siguieron para lograr el desarrollo de la presente investigación. A continuación, se muestra la descripción de cada una de ellas.

**Figura 2.** Esquema de la metodología realizada para el desarrollo del proyecto.



#### 3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para el desarrollo de la presente investigación se revisaron diferentes referencias bibliográficas como artículos de investigación, tesis, libros, manuales de operación de equipos, normas y códigos, videos tutoriales elaborados por Olympus - EEUU y páginas web relacionadas con la técnica de *Phased Array PA*, haciendo énfasis en el estudio de las variables y parámetros involucradas en el mapeo de corrosión (C-

Scan), calibraciones y los mecanismos de daño por corrosión general y por picadura presentes en una tubería de acero al carbono para transporte de hidrocarburos <sup>12</sup>.

### 3.2 ETAPA 2: DISEÑO DEL BLOQUE PATRÓN

En esta etapa se llevaron a cabo dos actividades, relacionadas con el diseño de un bloque patrón y su fabricación para lo cual se hizo un diseño de experimentos. A continuación, se describen cada una de ellas:

**321 Actividad 1: Diseño del bloque patrón.** En esta actividad se diseñó un bloque patrón a partir de la revisión bibliográfica, donde se definieron las dimensiones, la geometría, la severidad del daño (relación de la profundidad máxima del área corroída (D) respecto al espesor de la pared (t), y finalmente el número de daños <sup>13</sup>. De acuerdo con lo anterior, se determinó la necesidad de inducir tres barrenos (perforaciones) de fondo plano *FBH-Flat Bottom Hole* con porcentaje de daño (D/t), dos de estos entre el 10 y 80% y el otro mayor a 80% definidos por el código ASME B31.G como rangos aceptables y críticos, se omitió el rango leve por no ser relevante en la inspección; el enfoque fue en las etapas más avanzadas del daño los cuales pueden ser críticos para la estructura y fueron diseñados con el programa *SOLIDWORKS 2019* <sup>14</sup>. Para facilitar la interpretación y reducir el número de variables en el presente estudio se mantuvo constante el diámetro de los barrenos, de 1 [cm], donde el porcentaje de daño se obtuvo modificando la profundidad (D). En la figura 3 se muestra el isométrico con las dimensiones externas, la distribución de los daños y el espesor, para lo cual también

---

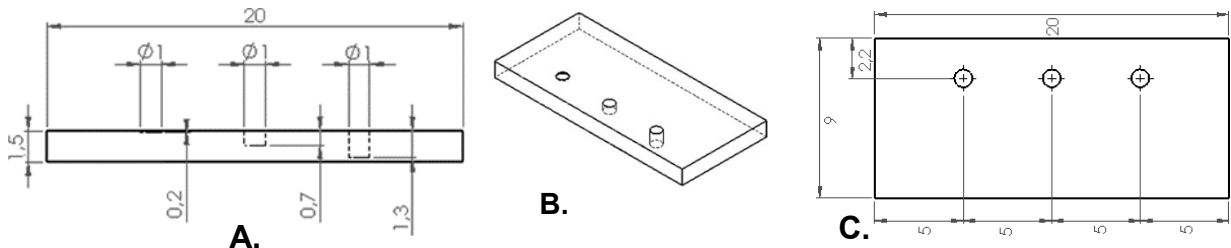
<sup>12</sup> AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Piping inspection Code: In-service inspection, Rating, Repair, and Alteration of piping Systems. API 570. Fourth Edition. Washington, DC 20005. 2016. [Consultado el 15-06-2019]

<sup>13</sup> AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. ASME, 2012. [Consultado el 20-06-2019]

<sup>14</sup> Kwan, Chi-Hang; Painchaud, Guillaume y Lepage, Benoit. Mapa de influencia acústica bajo la técnica TFM. Simposio de investigación ASNT, 2019. [en línea] [8 de septiembre del 2019] Disponible en: <<https://www.olympus-ims.com/es/resources/white-papers/tfm-acoustic-influence-map/>>.[Consultado el 8-07-2019]

se tuvo en cuenta el equipo de PA disponible<sup>15</sup>.

**Figura 3 .** Diseño del bloque, unidades en [cm]. A) Vista lateral, B) Vista 3D, C) vista superior



Con el fin de realizar un análisis de resultados de manera adecuada y con base en la información analizada se realizó un diseño de experimentos factorial multinivel, empleando tres factores, como se presenta en la tabla 2<sup>16</sup>: el primer factor consistió en el número de elementos activos del transductor ultrasónico 5L64 A12 con tres niveles, 4, 8 y 12 elementos activos, rango de valores que normalmente se utilizan en campo y se recomiendan en algunas referencias<sup>17</sup>. El segundo factor corresponde a la focalización del haz ultrasónico con dos niveles, sin focalizar y con focalización, y el tercer factor relacionado con el porcentaje de daño (D/t) con tres niveles, 13%, 47% y 87%<sup>18</sup>. Para todos los factores las variables de respuesta fueron: El diámetro del barreno y el espesor (material restante no removido).

<sup>15</sup> Manual del usuario Olympus, Software OmniScan MXU Versión 4.1 Revisión A. Junio, 2013. [Consultado el 5-11-2019]

<sup>16</sup> GALÁN, Carlos. Estimación de la técnica de Ultrasonido con Arreglo de Fases del tamaño de Discontinuidades Planares Inducidas Artificialmente., Bucaramanga, 2017. Tesis de grado (Msc Ingeniero Metalúrgico) Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. [Consultado el 8-11-2019]

<sup>17</sup> SOUAD, Bannouf; OLIVIER, Casula y CLAIRE, Prada. Evaluation of multi- elements methods applied to complex geometries. Institute Langevin, France. Cofrend- Congrès, 2011. [Consultado el 25-11-2019]

<sup>18</sup> VILA CASADO, Gustavo. Corrosión, electroquímica, mecanismos y métodos de control. Bogotá, 1989. [Consultado el 6-12-2019]

**Tabla 2.** Diseño de experimentos realizado para la técnica Phased Array (PA).

FACTORES	NIVELES	VARIABLES DE RESPUESTA
Número de elementos activos	4 - 8 - 12 (# Elementos activos del palpador)	Diámetro de los barrenos y espesor remanente o sin remover
Profundidad de focalización	Sin focalizar - focalizando al final del campo cercano – 1,21*; 4,8** y 10,8*** [mm]	
Porcentaje de daño	13% - 47% - 87%	

\*Valor de campo cercano para 4 elementos, \*\*Valor de campo cercano para 8 elementos, \*\*\*Valor de campo cercano para 12 elementos.

Con base en la tabla 2 se definieron los planes de inspección, donde un plan de inspección es la combinación del número de elementos y profundidad de focalización, manteniendo todos los demás parámetros de inspección constantes tales como resolución de barrido de 1 mm, tipo de onda longitudinal, modo pulso eco y voltaje de 40V (ver parámetros adicionales en el anexo A). Lo anterior da como resultado un total de 6 planes de inspección que realizan el barrido sobre cada barreno, mostrados en el anexo B. Cada plan de inspección se repitió 10 veces.

Para el cálculo del campo cercano se usó la ecuación 1 en donde  $K:0,99$ ;  $L$  es la apertura activa obtenida de la multiplicación del *pitch* (0,60mm) por el número de elementos activos, en este proyecto se usaron 4, 8 y 12, por lo tanto, los valores de apertura son de 2,4; 4,8 y 7,2 mm, la frecuencia usada fue 5MHz, y  $c$ , la velocidad teórica de propagación del sonido en el acero de bajo carbono fue de 5890 m/s <sup>19</sup>.

### 3.2.2 Actividad 2: Fabricación del bloque patrón.

El bloque fue fabricado

<sup>19</sup> Cursillo de medidores de espesor, Apéndice 9.3 Velocidades del sonido sobre un material. [en línea] [7 de agosto del 2019] Disponible en: <<https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>>[Consultado el 8-12-2019]

empleando una placa de acero ASTM A36, para corroborar si era de ese tipo de acero se realizó la caracterización física con la medición de dureza según la norma ASTM E18-16 <sup>20</sup> (ver el anexo C) y la caracterización química por medio del ensayo de espectrometría de emisión óptica permitiendo así saber la composición porcentual de los elementos presentes en ella y compararlas con los porcentajes máximos permitidos en ASTM A36 (ver el anexo D). Además de ello se caracterizó metalográficamente el material siguiendo las normas ASTM E3-11 <sup>21</sup> y ASTM E407-15 <sup>22</sup>, en las micrografías mostradas en el anexo E, se observa una microestructura de un acero hipoeutectoide con granos de ferrita (color blanco) y granos de perlita (color negro). Con los resultados obtenidos en los tres ensayos se confirmó que el material de la placa cumplía con los requisitos establecidos para el acero ASTM A36, esto con el fin de comparar los resultados obtenidos de un bloque con daños ideales. Los mapeos de corrosión fueron repetidos sobre una sección de tubería de transporte de hidrocarburo sacada de servicio por daños de corrosión; el bloque usado tiene 15 mm de espesor, fue cortado a escuadra, con superficies pulidas, fabricando los barrenos (daños) mediante un taladrado manual verificando la profundidad progresivamente, utilizando broca de fondo plano *FBH* a las profundidades especificadas en el diseño, asegurando refrigeración durante todo el proceso <sup>23</sup>. Los resultados se presentan en el siguiente capítulo.

### **3.3 ETAPA 3: CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL DEL BLOQUE PATRÓN Y LA SECCIÓN DE TUBERÍA.**

En la presente etapa se llevaron a cabo tres actividades: caracterización

---

<sup>20</sup> AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. “ASTM E 18 - 16: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials”, ASTM 2016. [Consultado el 02-12-2019]

<sup>21</sup> AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. “ASTM E 3 - 11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, ASTM 2011. [Consultado el 03-12-2019]

<sup>22</sup> AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. “ASTM E 3 - 15: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”, ASTM 2015. [Consultado el 04-12-2019]

<sup>23</sup> AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessels Code Section V. Two Park avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2013. s.f. [Consultado el 06-12-2019]

dimensional con microscopía óptica, capacitación en el manejo del equipo de *PA* y medición de los daños con *PA*. A continuación, se describe cada una de ellas:

**3.3.1 Actividad 1: Caracterización dimensional con microscopía óptica.** Se realizó el dimensionamiento de los daños mecanizados en el bloque patrón y en la sección de tubería con el microscopio óptico confocal de alta profundidad de campo visual HIROX KH7700 empleando un nivel de magnificación de 35X y realizando reconstrucción tridimensional, lo anterior con el fin de obtener las dimensiones con alta exactitud y ser tomadas como referencia para evaluar las mediciones realizadas por *PA*. Para la medición del diámetro en cada barreno, se tomaron dos diagonales y se halló el promedio en micras, mientras que para la profundidad se calculó la altura mediante la reconstrucción 3D. Estas dimensiones se utilizaron para determinar la exactitud (porcentaje de desviación) respecto al diámetro y profundidad para los daños del bloque patrón. Para la sección de tubería se realizaron mediciones de pérdidas de material por corrosión, omitiendo la medición de diámetro por su morfología irregular y limitación del equipo para cubrir el área del daño en la sección de tubería. Los resultados se presentan en el siguiente capítulo.

**3.3.2 Actividad 2: Capacitación en el uso del equipo de PA.** Se hizo la capacitación en el manejo del equipo de Ultrasonido *Phased Array-PA*, OLYMPUS OMNISCAN-MX2 16-64 con adquisición de datos empleando *encoder* (ver anexo F). Para lo anterior se realizaron mediciones sobre el bloque patrón fabricado y los bloques de referencia siguiendo los procedimientos de configuración y calibraciones presentes en el manual del usuario, las recomendaciones de los códigos ASME BPVC sección V, ASTM E114-15, E797-15, E1316-20 y E2700-14 <sup>24</sup>. Finalmente se realizó análisis de resultados, repitiendo las mediciones hasta obtener resultados con variaciones menores al 10%.

---

<sup>24</sup> AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. "ASTM E797 Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method", ASTM 2015. [Consultado el 24-11-2020]

**3.3.3 Actividad 3: Caracterización dimensional de los daños a partir de PA en el bloque patrón y en la sección de tubería.** El procedimiento consistió en realizar 10 barridos (mapeos de corrosión) por cada barreno sobre el bloque patrón, en dónde se identificaron los 3 barrenos mostrados en la figura 4, y en la sección de tubería, la cual se dividió en dos zonas para poder realizar el barrido de forma circunferencial la tubería designado la zona 1, Z1, y la zona 2, Z2, como se muestra en la figura 5a, empleando los planes de inspección definidos en la etapa 2. Posteriormente, mediante el software OmniPC 4.4 se dimensionaron los daños detectados, utilizando vistas A-Scan, E-Scan y C-Scan, donde se registró el diámetro (se obtuvo como el valor promedio del diámetro medido vertical y horizontal por medio de los cursores de medición, ver figura 6 y el espesor de cada uno de los daños empleando la técnica de la caída de los 6 dB según la norma ASTM E2700. Seguidamente sobre la sección de tubería se realizaron los mapeos de corrosión con los mismos planes de inspección caracterizando 2 daños y realizando mediciones de espesor mínimo remanente. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

#### **3.4 ETAPA 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

A partir del diseño experimental presentado y con los resultados obtenidos al realizar los mapeos de corrosión se realizó un análisis estadístico, donde fue posible determinar el efecto de las variables analizadas sobre la exactitud de las mediciones con el gráfico de Pareto y efectos principales para las variables de respuesta. Además, se determinó el porcentaje de desviación respecto a las dimensiones de referencia analizando la exactitud en la medición de los daños.

#### **3.5 ETAPA 5: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL**

Al terminar el análisis de resultados y la comparación del efecto de las variables estudiadas, se realizó el informe final del proyecto de investigación, el cual es presentado y sustentado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

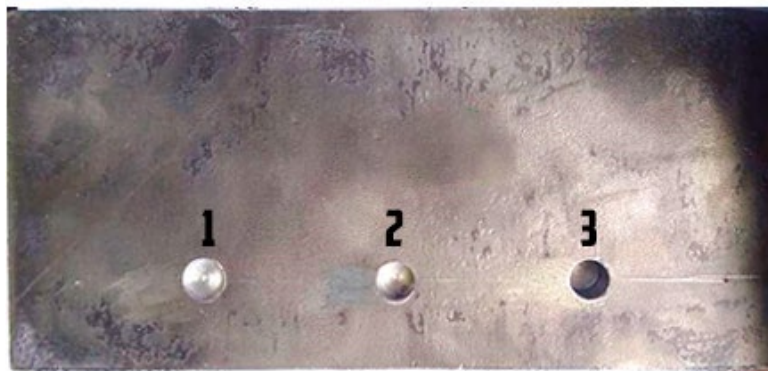
## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra el análisis de los resultados obtenidos a partir de la metodología experimental desarrollada en el presente proyecto de investigación.

### 4.1 FABRICACIÓN DEL BLOQUE PATRÓN

Los barrenos mostrados en la figura 4 fueron realizados sobre un bloque al cual se le realizaron 3 perforaciones por medio de un mecanizado con broca plana, siendo los barrenos 1, 2 y 3 de izquierda a derecha.

**Figura 4.** Bloque patrón.



### 4.2 CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL CON MICROSCOPIA ÓPTICA DEL BLOQUE PATRÓN

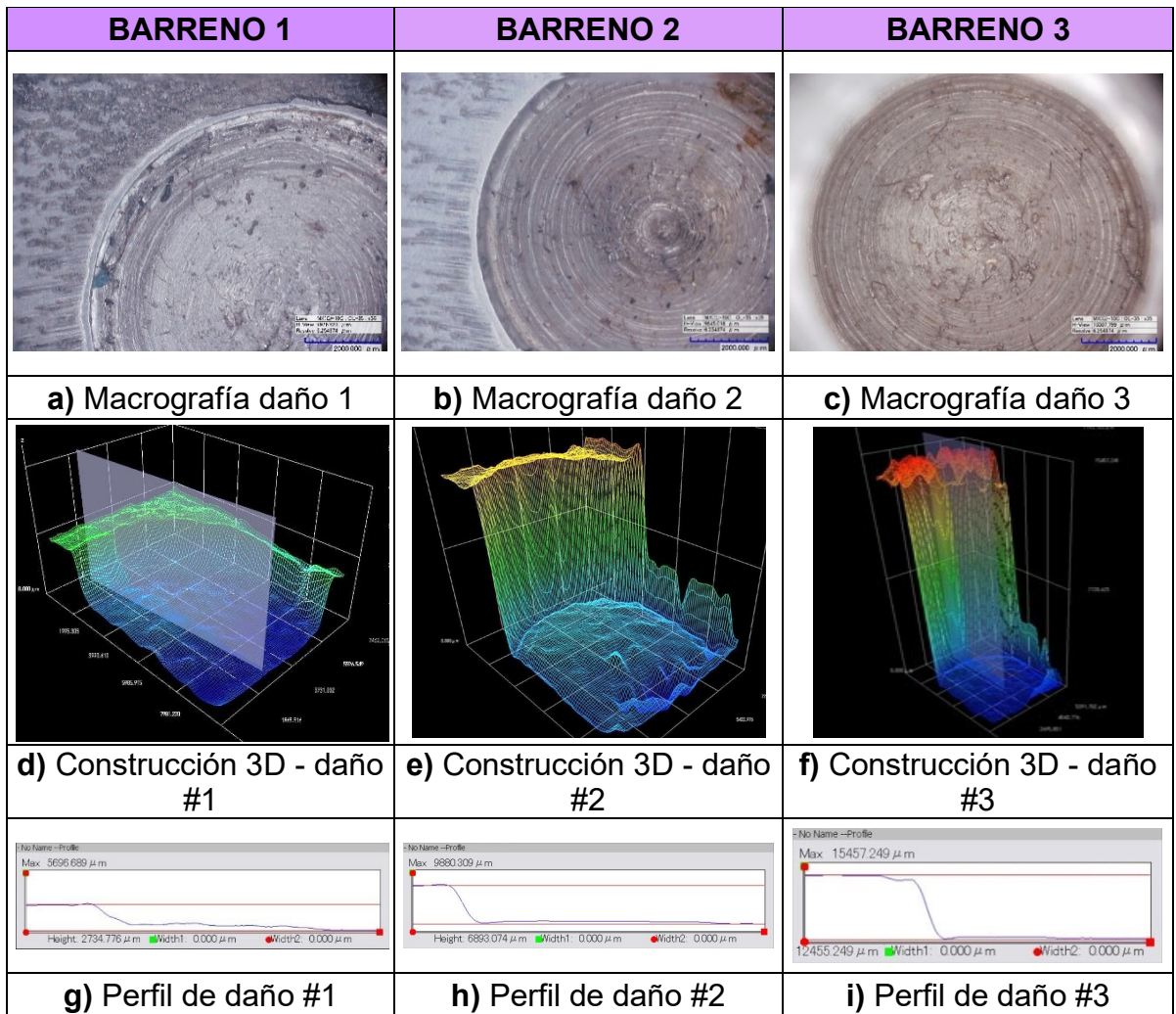
En la figura 5 se presentan los resultados de la caracterización dimensional obteniendo las macrografías, reconstrucciones 3D y el perfil del daño de los barrenos 1, 2 y 3 mostrados en el bloque patrón de la figura 4. Las figuras 5 a, d y g corresponden al barreno 1; las figuras 5 b, e y h al barreno 2, y las figuras c, f y i al barreno 3. En la tabla 3 se encuentran las medidas de diámetro y espesor (material remanente en la perforación) obtenidas con el microscopio HIROX, estas medidas son las de referencia para determinar las desviaciones de las mediciones

obtenidas con los mapeos realizados.

**Tabla 3.** Dimensiones de diámetro y espesor en milímetros obtenidas con en el microscopio óptico confocal HIROX KH7700 del bloque patrón.

FACTORES	BARRENO 1	BARRENO 2	BARRENO 3
DIÁMETRO [mm]	10,5	9,93	9,95
ESPESOR [mm]	12,27	8,11	2,54

**Figura 5.** Macrográficas, reconstrucciones 3D y perfiles de daño de los tres barrenos del bloque patrón analizados con en el microscopio óptico confocal HIROX KH7700 a 35X.



Los resultados presentados en la tabla 3 y la figura 5 permiten evidenciar las dimensiones de referencia de cada daño y su morfología, donde el diámetro presentó valores máximos de desviación de 0,7 mm respecto a lo planteado en el diseño, y para las profundidades fue de 0,73 mm. Por otra parte, el fondo obtenido no es perfectamente plano debido a que el proceso de mecanizado manual no fue el más óptimo, obteniendo una superficie levemente irregular para cada barreno, los detalles del fondo de la perforación se presentan en el anexo G.

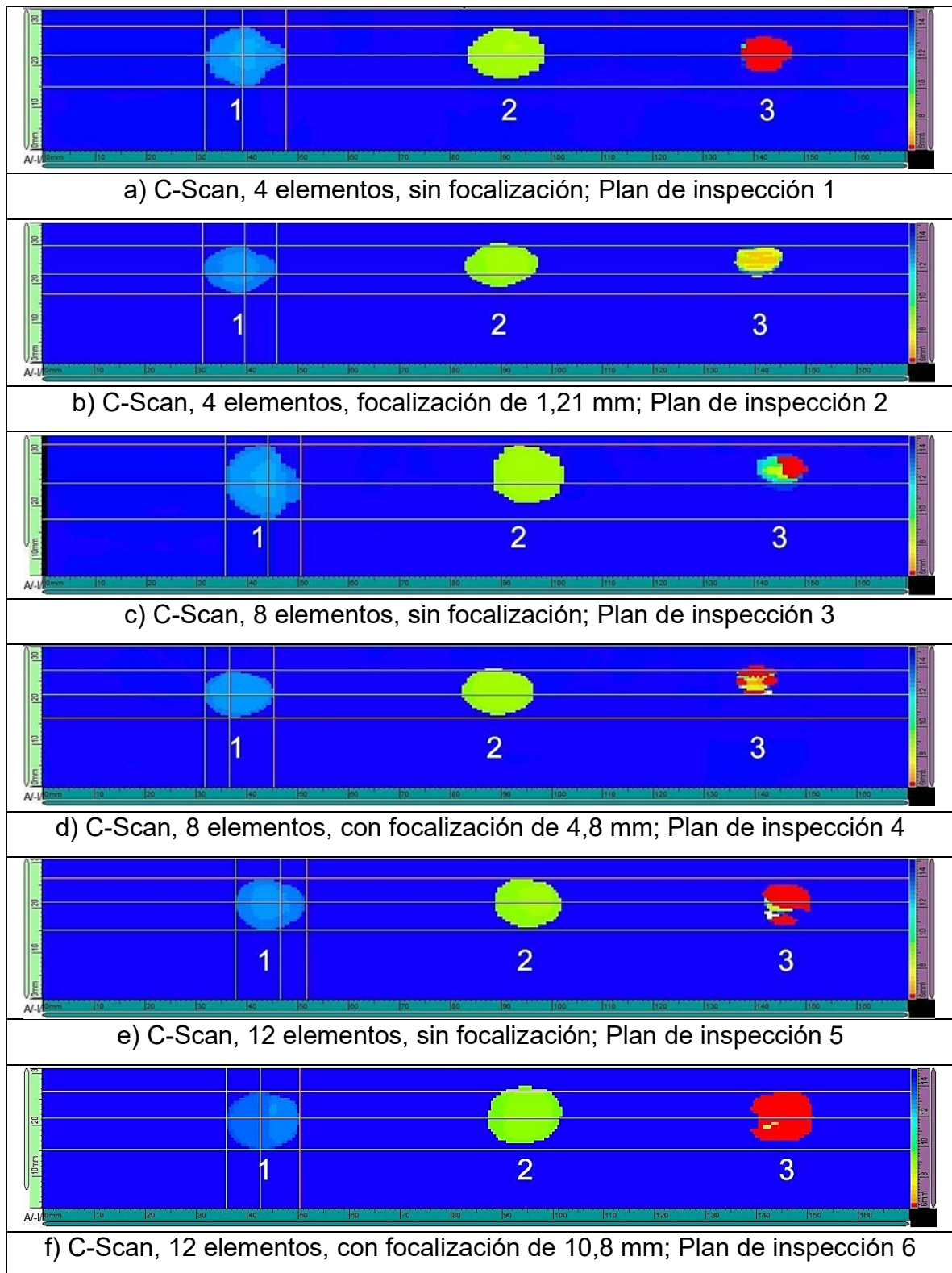
#### **4.3 MEDICIÓN DE LOS DAÑOS OBTENIDOS CON PA SOBRE EL BLOQUE PATRÓN (MAPEO DE CORROSIÓN C-SCAN)**

Siguiendo la metodología, cada daño del bloque patrón fue dimensionado con seis planes de inspección, y los resultados son presentados en la figura 6, en donde se muestra la visualización C-Scan obtenida al realizar los barridos con el transductor sobre los daños, en donde el barreno 1 corresponde a un daño de 13% de color azul, el barreno 2 corresponde a un daño de 47% de color verde y por último el barreno 3 corresponde a un daño de 87% de color entre amarillo y rojo, los cuales son vistos de izquierda a derecha, las respectivas profundidades de referencia son 2,73; 6,89 y 12,46 mm. Las visualizaciones C-Scan permiten evidenciar la diferencia de severidad de los daños mediante la escala de colores, además, muestran variaciones geométricas teniendo en cuenta que los barrenos son circulares, sin omisión o pérdida de ningún daño para todos los planes de inspección, las imágenes permiten tener una idea de la forma y severidad de los daños.

En la tabla 4, se muestran los resultados cuantitativos obtenidos de los 6 planes de inspección utilizados, registrando los respectivos diámetros y espesores sobre cada uno de los barrenos los cuales se compararon respecto a los obtenidos con la caracterización dimensional con el microscopio HIROX de la tabla 3. Además, se presenta el porcentaje de desviación para cada plan de inspección respecto a cada barreno.

De la figura 6 se puede evidenciar que si hay cambios en el diámetro registrado por el equipo para el barreno 1, de las figuras 6a a la 6f, siendo el observado en la figura 6e (12 elementos-focalizado) el que visualmente se observa más circular, comportamiento similar al observar el barreno 2 y 3. Por otra parte, al comparar visualmente los tres barrenos para cada plan de inspección se concluye que, a mayor severidad de daño, el diámetro del barreno se reduce.

**Figura 6.** Mapeo de corrosión C-Scan aplicado sobre el bloque patrón.



**Tabla 4.** Dimensiones de diámetro y espesor en milímetros obtenidas con PA sobre los 3 barrenos en el bloque patrón.

Plan de inspección	DIÁMETRO [mm]						ESPESOR [mm]					
	B*1	%*	B2	%	B3	%	B*1	%**	B2	%	B3	%
1 4 E-SF*	13,95	32,86	11,66	17,42	8,49	14,67	12,87	4,89	8,59	5,92	3,64	43,31
2 4 E-F	13,59	29,43	13,01	31,02	8,89	10,65	13,09	6,68	8,73	7,64	7,01	175,98
3 8 E-SF	14,97	42,57	12,95	30,41	8,83	11,26	12,82	4,48	8,61	6,17	3,00	18,11
4 8 E-F	13,44	28,00	13,50	35,95	9,55	4,02	13,02	6,11	8,69	7,15	5,01	97,24
5 12 E-SF	12,54	19,43	12,59	26,79	9,90	0,50	13,09	6,68	8,75	7,89	4,04	59,06
6 12 E-F	12,40	18,10	13,39	34,84	12,16	22,21	13,29	8,31	9,03	11,34	5,01	97,24
<b>Promedio</b>	<b>13,48</b>	<b>28,38</b>	<b>12,85</b>	<b>29,41</b>	<b>9,57</b>	<b>3,82</b>	<b>13,03</b>	<b>6,19</b>	<b>8,73</b>	<b>7,64</b>	<b>4,62</b>	<b>81,89</b>

**E:** Elementos activos; **SF:** Sin Focalizar; **F:** Focalizado. **\*B:** Barreno; **%\*:** Porcentaje de desviación calculado respecto al diámetro de referencia; **%\*\*:** Porcentaje de desviación calculado respecto al espesor de referencia

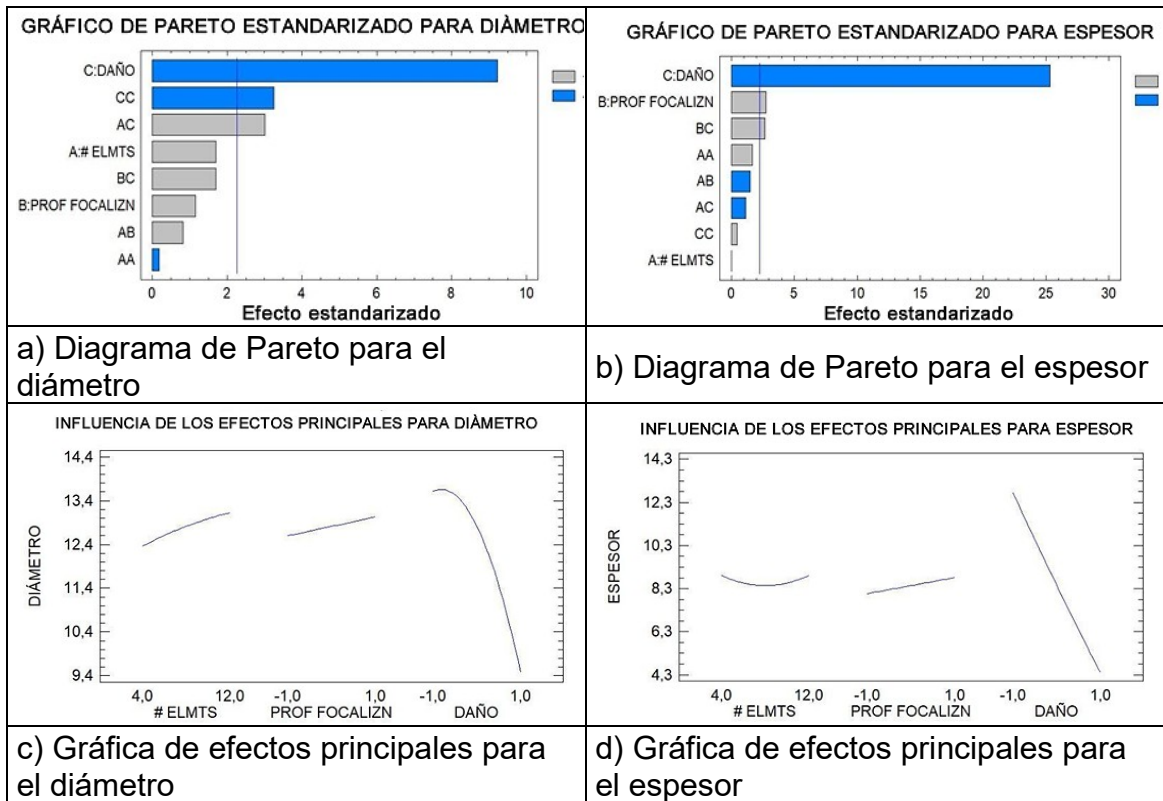
Mediante el análisis estadístico de los resultados mostrados en la tabla 4 es posible determinar cuáles factores afectan la exactitud de las mediciones de los diámetros y espesores. En la figura 7a y 7b se presentan los gráficos de Pareto estandarizado, los cuales representan de forma gráfica el análisis de varianza, de manera que, los factores que afectan las mediciones cortan la línea vertical de referencia, limite hasta dónde no hay efecto relevante en los resultados para un intervalo de confianza de 95% <sup>25</sup>; y las figuras 7c y 7d representan los efectos principales de cada factor para el diámetro y espesor respectivamente.

Es posible observar que el daño tiene un efecto sobre la medición del diámetro y el espesor, resultando en un aumento de la exactitud en la medición de los diámetros al aumentar el grado de daño; comportamiento contrario para las mediciones de espesor, donde al aumentar el grado de daño aumenta el error en las mediciones realizadas con PA. Sin embargo, a pesar de verificar en múltiples ocasiones las

<sup>25</sup> MOLES, Michael. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Canada: Olympus NDT, 2007. [Consultado el 14-02-2020]

calibraciones y las 10 repeticiones hechas sobre cada barreno, el porcentaje de desviación máximo promedio para el diámetro es de 29,41%, mientras que para el espesor es de 81,89%, correspondiendo a mediciones bastante alejadas del valor real, comportamiento también observado en las visualizaciones C-Scan (Figura 6).

**Figura 7.** Diagrama de Pareto para el diámetro y espesor estandarizado.



En la figura 7c, donde están los efectos principales, el eje Y o de la ordenada corresponde al diámetro y el eje X a su vez al de las abscisas donde están ubicados el número de elementos, la profundidad de focalización y el grado de daño. El plan de inspección #5 fue el de mayor exactitud, mostrado en el anexo H, con una combinación de 12 elementos activos, profundidad de focalización 10,8 milímetros con un daño pequeño, por lo tanto, se recomienda para su uso en la inspección de tuberías. En cambio, el plan de inspección #1 fue el de mayor error y menor exactitud, mostrado también en el anexo H, con una combinación de 4 elementos activos, sin focalización y con el daño grande, por lo tanto, no se recomienda utilizar

este plan, consideración realizada bajo las presentes condiciones de inspección. Finalmente, se obtuvieron errores menores en la estimación del diámetro que en la estimación del espesor <sup>26</sup>. En la figura 7d, donde están los efectos principales, para el factor del número de elementos activos se observa que aumenta el efecto a los extremos de la línea o sea en 4 y 12 elementos y para el factor de la profundidad de focalización hay una pendiente positiva, lo que quiere decir que cuando pasa de no focalizado a focalizado hay mayor efecto, en cambio, para el factor de grado de daño, se muestra una pendiente negativa lo que significa que al aumentar su tamaño el efecto disminuye considerablemente generando aumentos considerables del error.

Las otras variables que influyen sobre el diámetro son: la interacción doble del daño con efecto negativo (CC) y la interacción del número de elementos con el daño con efecto positivo (AC), mientras que en el espesor son: la profundidad de focalización (B) y la interacción de la profundidad de focalización con el daño (BC). El resto de las variables de interacción doble no fueron incidentes a la hora de realizar las mediciones.

Con base en lo anterior es posible afirmar que las variables del ultrasonido estudiadas presentan bajo efecto en la variación de la exactitud, porcentaje de desviación, aspecto positivo para la técnica PA debido a que el inspector podría seleccionar valores arbitrarios y el resultado no dependería de ello, sin embargo, las condiciones del daño pueden influir negativamente en los errores bajo las condiciones de diseño del bloque fabricado para la presente investigación.

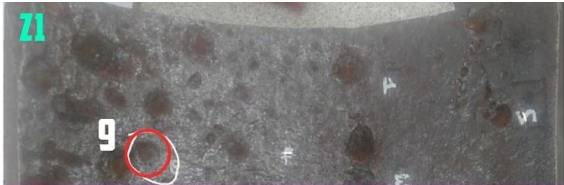

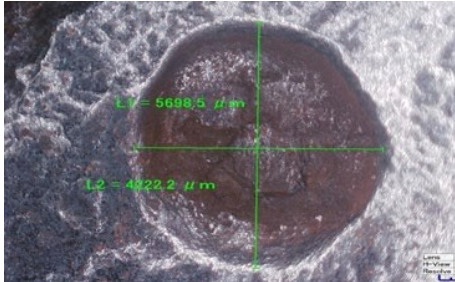

#### **4.4 CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL CON MICROSCOPIA ÓPTICA DE LA TUBERÍA.**

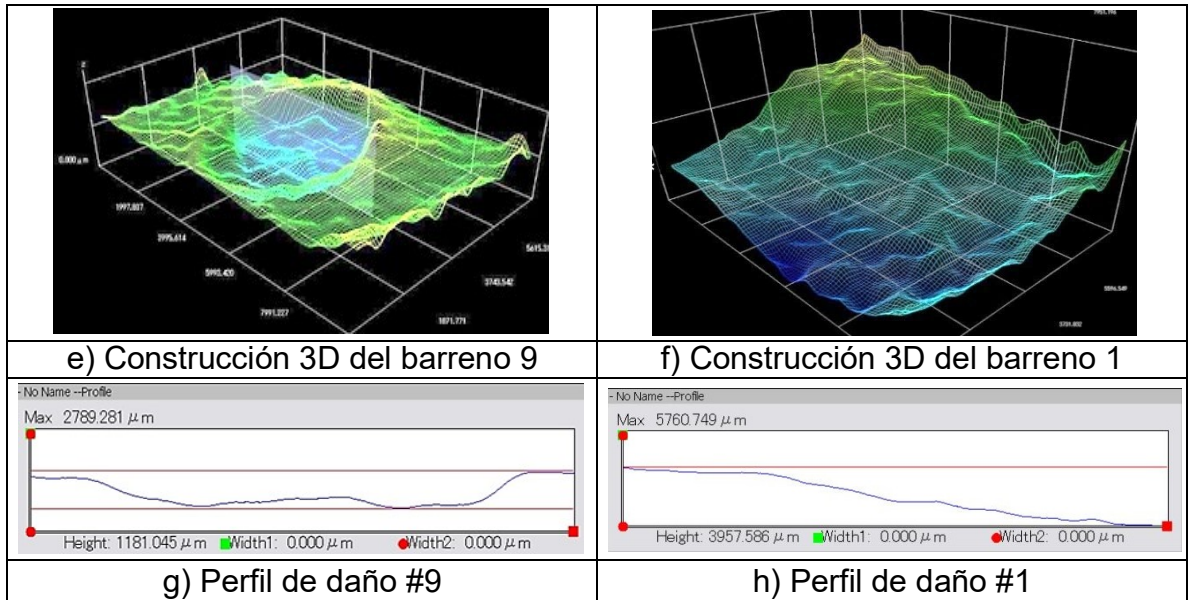
---

<sup>26</sup> ALKHALIFAH, Tariq, Nondestructive Testing Resolution: Electromagnetic Waves versus Seismic Ones, Riyadh, Saudi Arabia, 2005. [Consultado el 26-03-2020]

En la figura 8 se observa la caracterización dimensional con el microscopio óptico sobre la tubería que tiene un espesor de 9 mm, el cual es el valor máximo registrado después de sacada de servicio medido con un calibrador Vernier analógico en una zona sana. La imagen está dividida en 2 columnas, la figura 8a, representa la zona 1 (Z1) en donde se ubica el daño 9 y la segunda columna ubicada en la parte derecha muestra la zona 2 (Z2) está el daño 1, ver figura 8 b. Se escogieron esos barrenos por su similitud con el bloque patrón respecto a la morfología circular, sin embargo, no tienen fondo perfectamente plano, ni periferia perfectamente circular. En la figura 8c y 8d se muestran las macrografías de los daños, en la figura 8e y 8f las construcciones 3D y en las figuras 8g y 8h los perfiles de los daños.

**Figura 8.** Sección de tubería con los daños seleccionados y caracterizados dimensionalmente con el microscopio óptico confocal HIROX KH7700 35X.

ZONA 1	ZONA 2
	
a) Sección de tubería, zona 1	b) Sección de tubería, zona 2
	
c) Macrografía daño 9	d) Macrografía daño 1



En la tabla 5 se encuentran las medidas de espesor (material remanente en la perforación) obtenidas con el microscopio HIROX sobre la sección de tubería, las cuales presentaron una profundidad de 1,18 mm para el daño #9 y 3,96 mm para el daño #1(ver figuras 8g y h). Estas medidas son las de referencia para determinar las desviaciones de las mediciones obtenidas con los mapeos realizados.

**Tabla 5.** Dimensión de espesor en milímetros obtenidas con en el microscopio óptico confocal HIROX KH7700 de la sección de tubería.

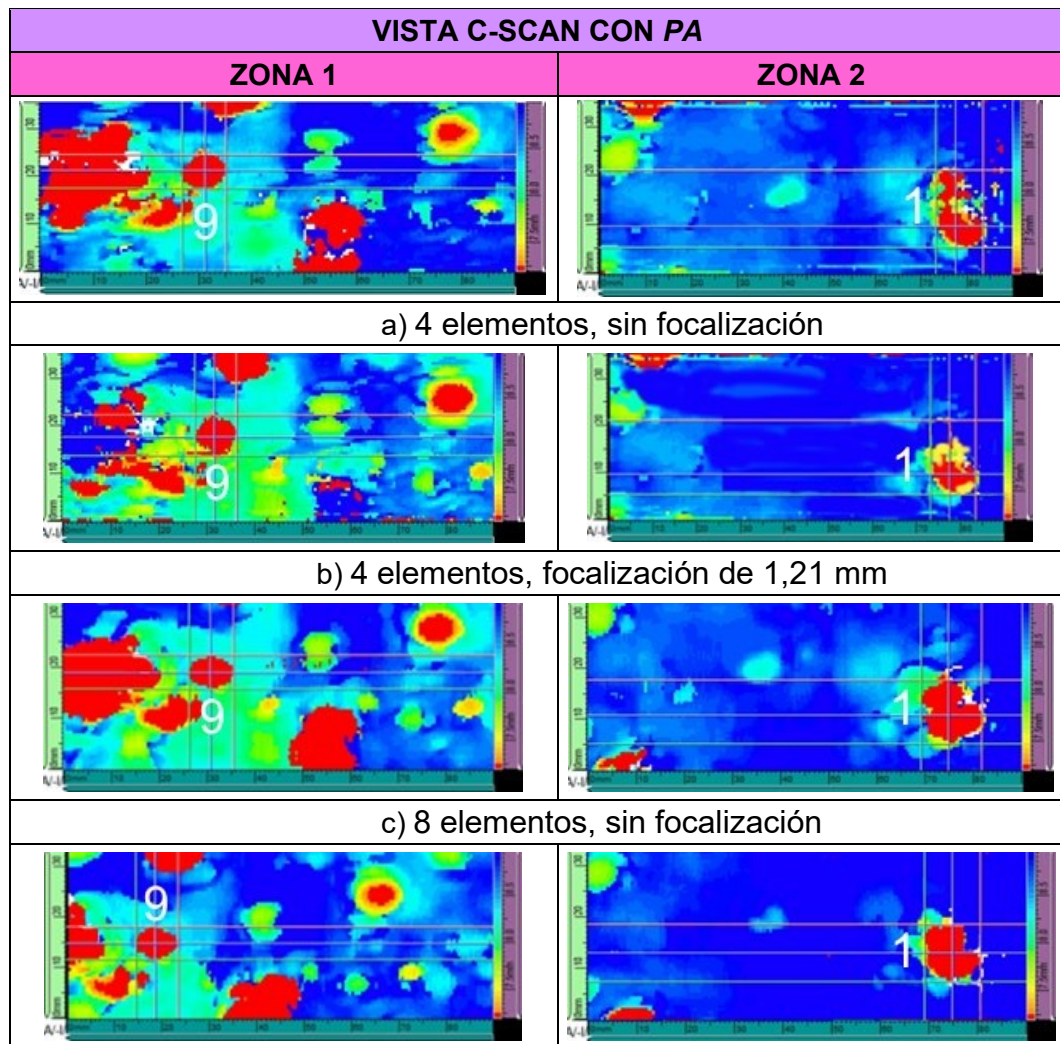
	ZONA 1	ZONA 2
FACTORES	DAÑO 9 [mm]	DAÑO 1 [mm]
ESPESOR [mm]	7,82	5,04

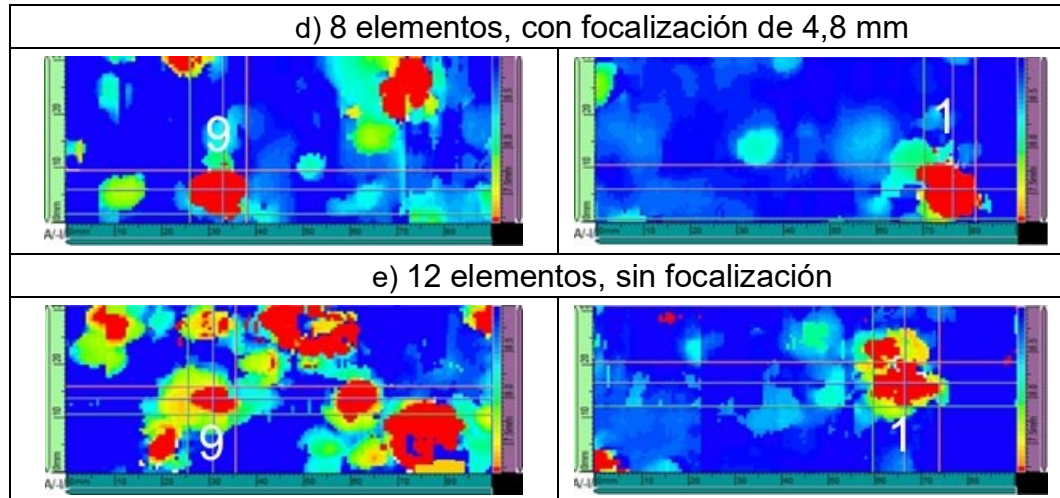
#### 4.1 MEDICIÓN DE LOS DAÑOS EMPLEANDO PA SOBRE LA TUBERÍA (MAPEO DE CORROSIÓN C-SCAN)

En la figura 9 se muestran las visualizaciones C-Scan para las dos zonas de la tubería en las cuales se caracterizaron dos daños, en la zona 1 está ubicado el daño #9. En la tabla 6, se muestran los resultados obtenidos de los 6 planes de inspección

utilizados, registrando los respectivos espesores sobre cada uno de los daños en las zonas de la tubería. Con base en estos resultados se puede comprobar que el comportamiento para la medición del espesor con *PA* en la tubería fue igual al espesor del bloque, donde al tener mayores pérdidas, siendo daños más severos, el porcentaje de error es alto, mientras que daños de menor severidad presentan menores desviaciones. Sin embargo, las desviaciones en la estimación de los espesores en la sección de tubería fueron mucho más bajas que los obtenidos en el bloque patrón, siendo el promedio del porcentaje de desviación máxima para el daño D1 de 28,58%, mientras en el bloque patrón el promedio máximo fue de 81.89%.

**Figura 9.** Mapeo de corrosión C-Scan aplicado sobre la sección de tubería.





**Tabla 6.** Dimensiones de espesor en milímetros obtenidas con PA sobre los dos daños de la sección de tubería.

Plan de inspección		ESPESOR [mm]			
		D*9 ZONA 1	%*	D1 ZONA 2	%
1	4 E-SF*	7,01	10,36	7,04	39,7
2	4 E-F	6,66	14,83	6,60	30,95
3	8 E-SF	6,48	17,13	5,74	13,89
4	8 E-F	6,60	15,60	5,95	18,06
5	12 E-SF	6,71	14,19	6,36	26,19
6	12 E-F	7,19	8,06	7,19	42,66
<b>Promedio</b>		<b>6,78</b>	<b>13,36%</b>	<b>6,48</b>	<b>28,58</b>
<b>E:</b> Elementos activos; <b>SF:</b> Sin Focalizar; <b>F:</b> Focalizado. <b>*D:</b> Daño; <b>%*:</b> Porcentaje de desviación calculado respecto al espesor de referencia					

A pesar de observar la misma tendencia en la desviación para la medición de espesor tanto en el bloque como en la sección de tubería, los errores fueron muy inferiores en esta última, señal que se interpreta como una morfología del barreno del bloque patrón inadecuada para la valoración exacta de esta técnica.

Aunque se han investigado, realizado y hecho múltiples publicaciones con la técnica y equipos de PA se encontraron muy pocas referencias relacionadas con la investigación en el caso del mapeo de corrosión utilizando la vista C-Scan con la

técnica de *PA* con haz a cero grados. En las pocas referencias encontradas se documenta que existen errores; en este estudio a pesar de que las calibraciones de velocidad, retardo de zapata y sensibilidad que fueron hechas según la norma ASTM E2700-14 con la verificación del sonido y con curva TCG (curva de corrección de la ganancia con el tiempo) se encontraron porcentajes de error muy altos, por lo cual se hicieron múltiples repeticiones y verificaciones intentando disminuir el porcentaje de error, sin embargo no fue posible reducirlo a valores aceptables.

## 5. CONCLUSIONES

Del presente desarrollo de investigación, el cual se enfocó en evaluar el efecto de ciertas variables empleadas en el mapeo de corrosión localizada con la técnica PA en un bloque con defectos ideales y en una tubería de acero de bajo carbono de transporte de hidrocarburos, bajo las condiciones de la presente investigación se concluye:

Se diseñó el plano del bloque con 3 barrenos al cual se les indujo perdidas de material por medio de 3 barrenos *FBH* y por medio de taladrado manual para obtener una morfología que se acercara a uno de fondo plano, controlando la profundidad mediante el mecanizado obteniendo daños con 13%, 47% y 87% respectivamente con diámetro constante de 1 cm.

Al aplicar el método de *Phased Array* para mediciones en barrenos ideales mecanizados en el bloque patrón estadísticamente se determinó que el grado de daño es el factor que tiene mayor efecto sobre las mediciones de las discontinuidades presentes en un bloque, registrándose errores máximos de 29,41% para el diámetro y 81,98% para el espesor.

La focalización electrónica del haz ultrasónico y el número de elementos activos del palpador no presenta efecto significativo sobre los resultados, permitiendo ser elegidos a criterio del inspector sin afectar las mediciones.

Para hacer inspección de corrosión con la técnica *Phased Array* se debe tener en cuenta la severidad del daño de corrosión presente en la tubería como factor principal, ya que dependiendo de la relación  $D/t$  se pueden obtener resultados finales más exactos.

La aplicación de la técnica de ultrasonido *Phased Array* en la inspección de daños por corrosión en una sección de tubería fuera de servicio permitió obtener información sobre la morfología del daño y espesor remanente con porcentajes de error máximos de 28,58%, siendo menores a los obtenidos en el estudio de los barrenos ideales *FBH* del bloque patrón.

A pesar del porcentaje de error, variables involucradas y tiempo asociados a los barridos la técnica de *Phased Array* ofrece información que difícilmente puede ser obtenida usando otros métodos de ensayos no destructivos para inspección de tuberías.

## 6. RECOMENDACIONES

Para los futuros trabajos con la técnica de *PA* se recomienda probar con distintos tamaños de daño además de diferentes mecanismos de ellos, posteriormente observar si los porcentajes de error siguen siendo altos analizando si existe una dependencia con el daño.

También se sugiere hacer un proyecto de investigación con el procedimiento realizado en este trabajo, pero modificando la geometría de los barrenos a estudiar.

## BIBLIOGRAFÍA

ALKHALIFAH, Tariq, Nondestructive Testing Resolution: Electromagnetic Waves versus Seismic Ones, Riyadh, Saudi Arabia, 2005.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Piping inspection Code: In-service inspection, Rating, Repair, and Alteration of piping Systems. API 570. Fourth Edition. Washington, DC 20005. 2016.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. "ASTM E 18 - 16: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials", ASTM 2016.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. "ASTM E 3 - 11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", ASTM 2011.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. "ASTM E 3 - 15: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys", ASTM 2015.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessels Code Section V. Two Park avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2013. s.f.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. "ASTM E114 Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Contact Testing", ASTM 2015.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. ASME, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. "ASTM E797 Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact

Method”, ASTM 2015.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. “ASTM E1316 Standard Terminology for Nondestructive Examinations”, ASTM 2020.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. “ASTM E2700 – 14: Standard Practice for Contact ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays”, ASTM 2014.

CHETVORNO, Phased array animation with arrow 10frames 371x400px 100ms.gif. Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication [En línea] [20 de diciembre de 2019] Disponible en: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Phased\\_array\\_animation\\_with\\_arrow\\_10frames\\_371x400px\\_100ms.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Phased_array_animation_with_arrow_10frames_371x400px_100ms.gif)

Cursillo de medidores de espesor, Apéndice 9.3 Velocidades del sonido sobre un material. [en línea] [7 de agosto del 2019] Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>

DUXBURY, David; RUSSELL, Jonathan y LOWE, Michael. The effect of variation in phased array element performance for Non-Destructive Evaluation (NDE), 2019.

ECHEVARRIA, Ricardo. Ultrasonido. Universidad Nacional De Comahue, Facultad de Ingeniería: Laboratorio de ensayos no destructivos. 2002.

FIDAHOUSSEN, Alex; CALMON, Pierre y LAMBERT, Marc. Ultrasonic array reconstruction methods for the localization and the characterization of defects in complex geometry configurations. Cofrend - Congrès Toulouse 2008

GALÁN, Carlos. Estimación de la técnica de Ultrasonido con Arreglo de Fases del tamaño de Discontinuidades Planares Inducidas Artificialmente., Bucaramanga,

2017. Tesis de grado (Msc Ingeniero Metalúrgico) Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

GORRI, José Antonio; Albareda, Alfons y Toribio, Eliezer. Oscilaciones y Ondas. Barcelona, España: Iniciativa Digital Politécnica, 2008.

KURSZ, Jochen, *et al.* Probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering NDT in probabilistic damage assessments, 16 Abril, 2012.

Kwan, Chi-Hang; Painchaud, Guillaume y Lepage, Benoit. Mapa de influencia acústica bajo la técnica TFM. Simposio de investigación ASNT, 2019. [en línea] [8 de septiembre del 2019] Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/es/resources/white-papers/tfm-acoustic-influence-map/>.

LYASOTA; Igor; RYNCARZ, Tomasz; KOZUB, Barbara. Acoustic emission study of pressure vessels material degradation processes after long-term operation in the refinery industry, 2019. [En línea] [13 de agosto de 2019] Disponible en: <<https://www.ndt.net/article/ewgae2018/papers/7.pdf>>

Manual del usuario Olympus, Software OmniScan MXU Versión 4.1 Revisión A. Junio, 2013.

Manual del curso sobre corrosión interna en tubería, Nace international, Julio, 2007, cap 1, p.2

Manual del curso sobre corrosión interna en tubería, Nace international, Julio, 2007, cap 1, p.5

MARINO, Jose Pablo Estudio de integridad Estructural mediante Ultrasonidos Phased Array. Concepción, Chile, 2014

MOLES, Michael, *et al.* Introduction to phased array ultrasonic technology applications. tercera. Canada: Olympus NDT, 2007.

MOLES, Michael. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Canada: Olympus NDT, 2007.

OLYMPUS OMNISCAN MX2, Software MXU – 4.3R1, Palpador 5L64-A12, Cuña SA10-N55S; SA 10-0L, [en línea] [20 de diciembre de 2019] Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/es/probes/pa/universal/>

OLYMPUS NDT. Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications. Canada, 2010. p.31.

OLYMPUS NDT. Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications. En: NDT Field Guides 2010, Canada

RIOUX, Philippe, *et al.* Novel Imaging Techniques for Defects Characterization in Phased Array Inspection, 2019.

SANTOS DE LA CRUZ, Eulogio, *et al.* El Ultrasonido y su Aplicación, Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial-UNMSM, vol. 8, p. 25-26-27-28, junio 2005.

SOUAD, Bannouf; OLIVIER, Casula y CLAIRE, Prada. Evaluation of multi-elements methods applied to complex geometries. Institute Langevin, France. Cofrend-Congrès, 2011.

VILA CASADO, Gustavo. Corrosión, electroquímica, mecanismos y métodos de control. Bogotá, 1989.

# ANEXOS

## Anexo A. Reporte del OmniScan realizado sobre el daño 1 de la sección de tubería



### OmniScan Report

Report Date	Report Version	File Name	Inspection Date	Inspection Version	Save Mode
2020 / 06 / 21	OmniPC - 4.4R4	zona1-8e-sf0003.opd	2019 / 12 / 12	MXU - 3.2R2	Report
OmniScan Type	OmniScan Serial #	Module Type	Module Serial #	Data File Name	
OmniScan MX2	OMNI2-101521	OMNI-M-PA1664	OMNI-800247	zona1-8e-sf####	

PA1

Setup

A-0.00 Sk:090 L:001					
Beam Delay	Start (Half Path)	Range (Half Path)	Max. Acq Rate	Type	Averaging Factor
0.0 µs	-3.42 mm	35.00 mm	35	PA	1
Scale Type	Scale Factor	Video Filter	Pretrig.	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)	22.43 dB	PE (Pulse-Echo)	Longitudinal	5890.0 m/s	100.00 ns
Scan Offset	Index Offset	Probe 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	55.13 mm	22.00 mm	20.00 %	I-edge	Max Peak
A	5.01 mm	9.19 mm	10.00 %	I-edge	Max Peak
B	13.99 mm	8.98 mm	10.00 %	I-edge	Max Peak
TCG Point Number	Position (Half Path)	Gain			
1	0.00 mm	0.0 dB			
2	10.00 mm	13.0 dB			
3	19.18 mm	17.5 dB			

Calculator

Element Qty. Used	First Element	Last Element	Resolution	Wave Type	Material Velocity
8	1	64	1.0	Longitudinal	5890.0 m/s
Start Angle	Stop Angle	Angle Resolution	Focus Depth	Law Configuration	Beam Skew
0.00°	N/A	N/A	500.00 mm	Linear at 0°	0.00°

**Anexo B.** Planes de inspección de PA

PLANES DE INSPECCIÓN	NÚMERO DE ELEMENTOS	PROFUNDIDAS DE FOCALIZACIÓN [mm]
Plan de inspección 1	4	SF*
Plan de inspección 2	4	1,21
Plan de inspección 3	8	SF
Plan de inspección 4	8	4,8
Plan de inspección 5	12	SF
Plan de inspección 6	12	10,8

SF\*: Sin focalización

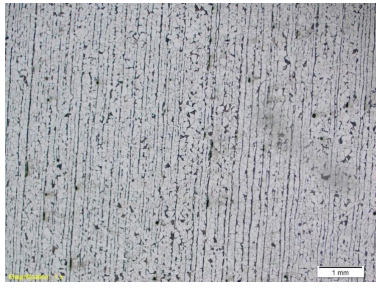
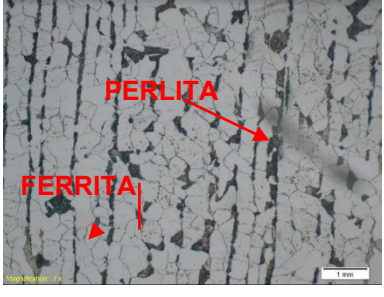
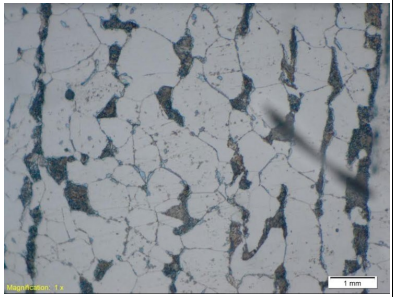
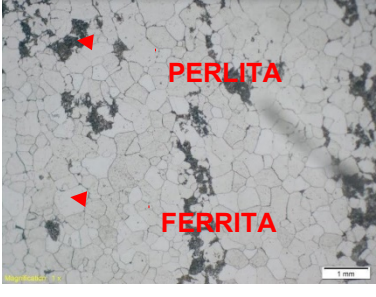
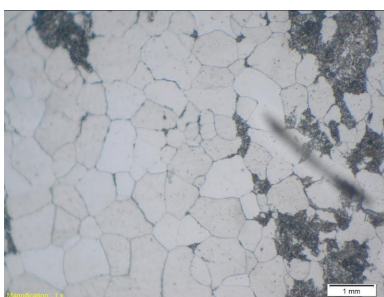
**Anexo C.** Toma de dureza de la placa patrón ASTM A36

TOMA	DUREZA [HRB]
1	70
2	71
3	75
4	72
<b>PROMEDIO</b>	72

**Anexo D.** Composición química placa patrón ASTM 36

COMPOSICIÓN QUIMICA PLACA PATRÓN ASTM A36 [%]										
Espectrometría de Emisión óptica (Ensayo de chispa)										
Elemento	C	Mn	Si	P	S	Fe	Mo	Cr	Ni	W
[%]	0,19	0,75	0,16	0,02	<0,0150	98,58	0,01	0,01	0,02	0,1
Requisitos Químicos Norma ASTM A36										
Elemento	C	Mn	Si	P	S					
Máximo [%]	0,26	0,8	0,4	0,04	0,05					

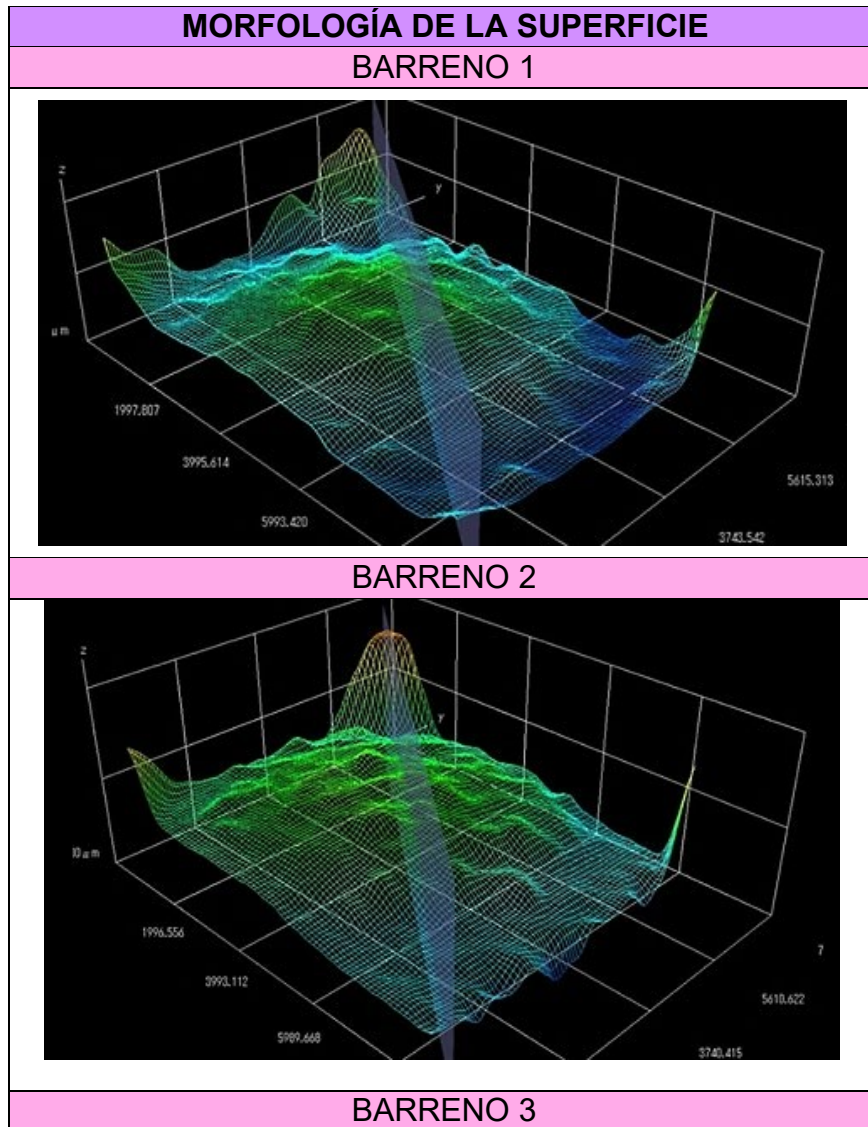
**Anexo E. Microestructura placa patrón acero ASTM A36**

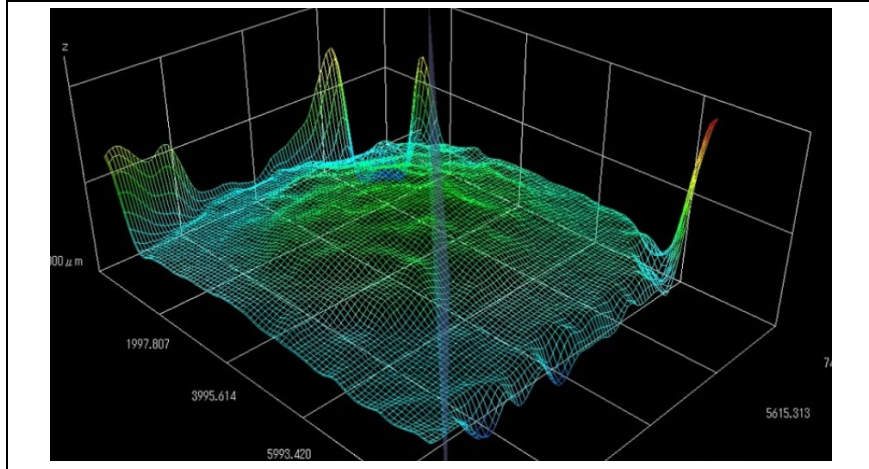
MICROESTRUCTURA PLACA PATRÓN ACERO ASTM A36			
<b>SECCIÓN LONGITUDINAL</b>			
	Microestructura a 100x.	Microestructura a 500x.	Microestructura a 1000x.
	<b>SECCIÓN TRANSVERSAL</b>		
Microestructura a 500x.		Microestructura a 1000x.	Microestructura a 100x sin ataque químico.

**Anexo F.** Equipo de PA usado en el trabajo de investigación.

<b>EQUIPO DE PA</b>	
<b>OMNISCAN-MX2</b>	<b>PALPADOR OLYMPUS 5L64</b>
	
<b>ZAPATA</b>	<b>ENCODER</b>
	

**Anexo G.** Morfología superficial de los barrenos de la placa patrón.





**Anexo H.** Promedio de porcentaje de daño para los planes de inspección.

Plan de inspección		DIÁMETRO [mm]						ESPESOR [mm]						% de error
		B*1	%*	B2	%	B3	%	B*1	%**	B2	%	B3	%	
1	4 E-SF*	13,9 5	32,86	11,66	17,42	8,49	14,67	12,87	4,89	8,59	5,92	3,64	43,31	19,85%
2	4 E-F	13,5 9	29,43	13,01	31,02	8,89	10,65	13,09	6,68	8,73	7,64	7,01	175,98	43,57%
3	8 E-SF	14,9 7	42,57	12,95	30,41	8,83	11,26	12,82	4,48	8,61	6,17	3,00	18,11	18,83%
4	8 E-F	13,4 4	28,00	13,50	35,95	9,55	4,02	13,02	6,11	8,69	7,15	5,01	97,24	29,75%
5	12 E-SF	12,5 4	19,43	12,59	26,79	9,90	0,50	13,09	6,68	8,75	7,89	4,04	59,06	20,06%
6	12 E-F	12,4 0	18,10	13,39	34,84	12,16	22,21	13,29	8,31	9,03	11,34	5,01	97,24	32%

**E:** Elementos activos; **SF:** Sin Focalizar; **F:** Focalizado. **\*B:** Barreno; **%:** Porcentaje de desviación calculado respecto al diámetro de referencia; **%\*\*:** Porcentaje de desviación calculado respecto al espesor de referencia