

**ESTIMACIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO CON ARREGLO  
DE FASES DEL TAMAÑO DE DISCONTINUIDADES PLANARES INDUCIDAS  
ARTIFICIALMENTE**

**Ing. CARLOS ANDRÉS GALÁN PINILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**ESTIMACIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO CON ARREGLO  
DE FASES DEL TAMAÑO DE DISCONTINUIDADES PLANARES INDUCIDAS  
ARTIFICIALMENTE**

**Ing. CARLOS ANDRÉS GALÁN PINILLA**

**Trabajo de investigación presentado como requisito de grado para optar al  
título de Magister en ingeniería de materiales**

**DIRECTOR**

**JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ  
MAGISTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES**

**CODIRECTORA**

**LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ  
MAGISTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mi Madre, Gladys Galán, que desde la distancia siempre ha sido mi consejera, mi compañía, mi sostén, mi apoyo incondicional en todas las etapas vividas y con este logro puede ver el fruto de sus esfuerzos. Ella fue mi primera Maestra y de ella aprendí que las metas se logran con disciplina y constancia y a Germán por su apoyo y consejos. A mi esposa, Freya Lorena, quien especialmente en los momentos más difíciles estuvo a mi lado, brindándome seguridad, estabilidad emocional y fuerzas.

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios que me ha bendecido infinitamente.*

*A mis directores de proyecto M.Sc Julián Orlando Herrera y Luz Amparo Quintero Ortiz, por darme la oportunidad de trabajar, por guiarme durante el tiempo de esta investigación, y por la confianza depositada en mí.*

*A mi esposa Freya Lorena, a quién amo, y quién me apoyo y motivo para cumplir esta meta.*

*A mis familiares y amigos que me apoyaron y creyeron en mí.*

*A la Universidad Industrial de Santander, particularmente a la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales y todos sus maestros que me permitieron formar parte de esta Escuela.*

*Al grupo de investigación en desarrollo y tecnología de nuevos materiales GIMAT.*

*A Jorge Sagrero Rivera y CIDESI por toda su colaboración y aportes realizados durante la investigación.*

*A las hermanas Katherin y Andrea Pabón, por la amistad y ayuda en esta etapa de formación y a Yaddy por su gran servicio y atención en la Escuela.*

*A los técnicos de laboratorio Ambrosio Carrillo, Mario Navarrete, Javier, Oscar Domingo y Sergio, adscritos a la escuela de ingeniería metalúrgica.*

*A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a la realización de este proyecto de grado.*

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	21
1.2.3 HIPÓTESIS.....	21
2. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	22
2.1.1 CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LAS DISCONTINUIDADES PLANARES.....	25
2.2 GENERALIDADES DEL ULTRASONIDO CON ARREGLO DE FASES.....	28
2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL HAZ ULTRASÓNICO.....	31
2.2.2 PATRONES DE ESCANEAMIENTO Y PRESENTACIONES DEL PHASED ARRAY. .....	33
2.2.3 CURVAS DE DIMENSIONAMIENTO..	35
2.3 DIMENSIONAMIENTO DE DISCONTINUIDADES CON PAUT.....	36
2.4 MÉTODOS PARA GENERAR DISCONTINUIDADES.....	37
2.4.1 MECANIZADO.....	39
2.4.2 TIPOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN..	40
2.4.3 ALGUNOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECTROEROSIÓN.....	42
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	44
3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	45

3.2 ETAPA 2: DISEÑO DE MUESTRAS CON DISCONTINUIDADES ARTIFICIALES.....	47
3.2.1 Actividad 1. ....	47
3.2.2 Actividad 2: Variables de estudio del PAUT.....	49
3.2.3 Actividad 3: Diseño de las muestras de estudio. ....	49
3.3 ETAPA 3: ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ESTUDIO .....	51
3.3.1 Actividad 1: Selección del método de fabricación de las discontinuidades. ...	51
3.3.2 Actividad 2. Fabricación de las muestras. Inmediatamente se presentan las actividades relacionadas con la fabricación de las muestras mecanizadas y soldada. ....	53
3.4 ETAPA 4: CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ELABORADAS .....	57
3.4.1 Actividad 1: Caracterización física, química y metalográfica.....	59
3.4.2 Actividad 2: Dimensionamiento, empleando microscopía óptica. ....	59
3.5 ETAPA 5: MEDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES CON PAUT.....	61
3.5.1 Actividad 1: Planes de inspección.....	61
3.5.2 ACTIVIDAD 2: Adquisición y procesamiento de los datos de PAUT.....	63
3.6 ETAPA 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
3.7 ETAPA 7: ELABORACIÓN Y DIFUSIÓN DEL INFORME FINAL .....	69
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
4.1 DISEÑO DE MUESTRAS CON DISCONTINUIDADES ARTIFICIALES .....	70
4.1.1 Análisis geométrico de las discontinuidades.....	70
4.1.2 Variables de estudio de Phased Array.....	71
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ELABORADAS.....	73
4.2.1 Caracterización física.....	74
4.2.2 Caracterización química.. ....	74

4.2.3 Caracterización metalográfica.....	76
4.2.4 Dimensionamiento empleando microscopía óptica.....	77
4.3 MEDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EMPLEANDO PHASED ARRAY	81
4.3.1 Planes de inspección.....	81
4.3.2 Medición de las discontinuidades con patrón de barrido sectorial S-scan. ..	82
4.3.3 Medición de las discontinuidades con patrón de barrido electrónico E-scan. .....	110
4.3.4 Resultados sobre muestra soldada.....	124
5. CONCLUSIONES .....	128
6. RECOMENDACIONES.....	131
BIBLIOGRAFÍA.....	132
ANEXOS.....	135

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Dimensiones empleadas en investigación.....	26
<b>Tabla 2.</b> Criterios de aceptación y rechazo por ultrasonido.....	27
<b>Tabla 3.</b> Patrones de escaneo y presentaciones gráficas del equipo Omniscan. .	34
<b>Tabla 4.</b> Iteración de una onda ultrasónica con un defecto .....	38
<b>Tabla 5.</b> Etapas que ocurren durante un proceso de electroerosión. ....	40
<b>Tabla 6.</b> Estado del arte .....	45
<b>Tabla 7.</b> Diseño de experimentos.....	50
<b>Tabla 8.</b> Número de muestras. ....	51
<b>Tabla 9.</b> Condiciones de operación del equipo YAWJET. ....	54
<b>Tabla 10.</b> Procedimiento de soldadura para falta de penetración. ....	58
<b>Tabla 11:</b> Parámetros constantes de operación del equipo .....	62
<b>Tabla 12.</b> Equipo empleado.....	65
<b>Tabla 13.</b> Diseño de experimentos multinivel para S-scan y E-scan. ....	69
<b>Tabla 14.</b> Resultados análisis composición química. ....	76
<b>Tabla 15.</b> Dimensiones de las discontinuidades mecanizadas.....	79
<b>Tabla 16.</b> Planes de inspección S-Scan empleando ondas transversales. ....	82
<b>Tabla 17.</b> Efectos según el ANOVA.....	97
<b>Tabla 18.</b> Planes de inspección S-Scan empleando ondas longitudinales.....	102
<b>Tabla 19.</b> Efectos según el ANOVA.....	105
<b>Tabla 20.</b> Valores de porcentaje de error para todos los planes de inspección S-scan .....	108
<b>Tabla 21.</b> Planes de inspección E-Scan. ....	111
<b>Tabla 22.</b> Valores de porcentaje de error para todos los planes de inspección E-scan. ....	123

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Palpadores ultrasónicos: a) Palpador convencional, b) Sonda PAUT ..	30
<b>Figura 2.</b> Formación del haz.....	33
<b>Figura 3.</b> Esquema de la metodología del proyecto. ....	44
<b>Figura 4.</b> Esquema de la ubicación del palpador. ....	48
<b>Figura 5.</b> Esquema del proceso de mecanizado. ....	52
<b>Figura 6.</b> Procesos de elaboración de las muestras. ....	55
<b>Figura 7.</b> Preparación de la junta. ....	57
<b>Figura 8.</b> Parámetros medidos en el microscopio óptico.....	60
<b>Figura 9.</b> Montaje de las muestras en el microscopio. ....	61
<b>Figura 10.</b> Adquisición de los datos de PAUT.....	64
<b>Figura 11.</b> Procedimiento de calibración. ....	66
<b>Figura 12.</b> Medición con Omnipc.....	67
<b>Figura 13.</b> Esquema del haz ultrasónico. ....	71
<b>Figura 14.</b> Dimensiones de las muestras. ....	73
<b>Figura 15.</b> Dimensiones de las ocho discontinuidades a mecanizar. ....	75
<b>Figura 16.</b> Análisis de la microestructura acero ASTM A36. ....	77
<b>Figura 17.</b> Resultados de la caracterización dimensional de la muestra soldada. .....	80
<b>Figura 18.</b> Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra 4. ....	84
<b>Figura 19.</b> Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M4. ....	86
<b>Figura 20.</b> Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M6. ....	88
<b>Figura 21.</b> Visualizaciones S-scan y C-scan para las muestras M1, M3 y M5. ...	89
<b>Figura 22.</b> Resultados de tamaño PAUT para las muestras M1, M2, M4 y M7....	90
<b>Figura 23.</b> Resultados de amplitud de señales para las muestras M1, M2, M4 y M7.....	92
<b>Figura 24.</b> Resultados de tamaño PAUT para las muestras M3, M5, M6 y M8....	92

<b>Figura 25.</b> Resultados de amplitud de señales para las muestras M3, M5, M6 y M8.....	93
<b>Figura 26.</b> Resultados de tamaño PAUT para las muestras M3 y M5.....	94
<b>Figura 27.</b> Resultados de tamaño y amplitud para las muestras M1, y M4. ....	95
<b>Figura 28.</b> Resultados de tamaño y amplitud para las muestras M3 y M6. ....	96
<b>Figura 29.</b> Diagrama de Pareto estandarizado para tamaño medido con PAUT..	98
<b>Figura 30.</b> Diagrama de Pareto estandarizado para amplitud de las señales. ....	99
<b>Figura 31.</b> Gráfica de efectos principales. ....	100
<b>Figura 32.</b> Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M1 y M5.....	103
<b>Figura 33.</b> Resultados de tamaño y amplitud de las señales para las ocho muestras. ....	104
<b>Figura 34.</b> Diagramas de Pareto estandarizado y de efectos principales. ....	106
<b>Figura 35.</b> Visualizaciones E-scan y C-scan con onda transversal. ....	112
<b>Figura 36.</b> Visualizaciones E-scan y C-scan con onda longitudinal. ....	113
<b>Figura 37.</b> Tamaño para E-scan empleando onda transversal.....	114
<b>Figura 38.</b> Resultados de amplitud de las señales para las ocho muestras.....	115
<b>Figura 39.</b> Resultados de tamaño y amplitud para las muestras M1, M3, M4 y M6. ....	116
<b>Figura 40.</b> Diagrama de Pareto estandarizado y de efectos principales para E-scan con onda transversal. ....	119
<b>Figura 41.</b> Tamaño para E-scan angular y onda longitudinal.....	120
<b>Figura 42.</b> Amplitud para E-scan y onda longitudinal. ....	121
<b>Figura 43.</b> Diagrama de Pareto estandarizado y de efectos principales para E-scan con onda longitudinal. ....	122
<b>Figura 44.</b> Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M2 y soldada. ....	124
<b>Figura 45.</b> Puntos donde se realizaron las mediciones con el microscopio .....	125
<b>Figura 46.</b> Resultados de tamaño para la muestra soldada y las muestras M2-M7. ....	126

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A. TABLAS DE DATOS DE TAMAÑO PAUT Y AMPLITUD DE LAS SEÑALES.....</b>	<b>137</b>
---	------------

## RESUMEN

**TITULO:** ESTIMACIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO CON ARREGLO DE FASES DEL TAMAÑO DE DISCONTINUIDADES PLANARES INDUCIDAS ARTIFICIALMENTE\*.

**AUTOR:** CARLOS ANDRÉS GALÁN PINILLA\*\*.

**PALABRAS CLAVE:** Discontinuidades planares, dimensionamiento, ultrasonido con arreglo de fases PAUT.

### DESCRIPCIÓN:

Los componentes metálicos durante su fabricación y servicio están expuestos a variados esfuerzos y daños derivados de los procesos de fabricación, ambientes agresivos y/o cargas mecánicas. Dentro de las discontinuidades que se pueden producir están las planares, tales como las faltas de fusión, las laminaciones y las grietas, stress corrosion cracking, entre otras, con gran probabilidad de concentrar esfuerzos y ocasionar una falla. En este sentido, la identificación oportuna se realiza mediante Ensayos No Destructivos, destacándose la técnica avanzada de inspección por ultrasonido por arreglo de fases PAUT, la cual ofrece información detallada de la discontinuidad con representaciones gráficas en tiempo real de los defectos y facilidad de controlar los parámetros, tales como la amplia variedad de ángulos de refracción y la modificación de la apertura activa del haz. Pese a esto, no existen procedimientos establecidos para seleccionar los parámetros de PAUT y de esta forma tener exactitud en la detección de discontinuidades, siendo necesaria investigación al respecto. Ahora, debido a las limitaciones reportadas de la técnica para estimar de manera exacta el tamaño real de las discontinuidades cuando cambian sus características geométricas como la inclinación, el tamaño y la morfología, se diseñaron ocho muestras con discontinuidades mecanizadas y una muestra soldada con falta de penetración para estudiar el efecto en el dimensionamiento mediante PAUT. Los resultados obtenidos permitieron concluir que la profundidad de focalización afecta significativamente el dimensionamiento de las discontinuidades, obteniendo menores porcentajes de error para focalización del haz ultrasónico al final del campo cercano o sin focalizar, presentando comportamientos diferentes para las ondas longitudinales y transversales. Con este trabajo se contribuye en la investigación y caracterización de materiales mediante PAUT para el dimensionamiento exacto de discontinuidades mediante esta técnica, puesto que aún no existen condiciones de operación óptimas para esta técnica.

---

\*Trabajo de investigación

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales; Maestría en Ingeniería de Materiales. Director: Julián Orlando Herrera Ortiz, MSc en Materiales. Codirector: Luz Amparo Quintero Ortiz, MSc en Materiales.

## ABSTRACT

**TITLE:** ESTIMATION BY PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING SIZE OF ARTIFICIALLY INDUCED PLANAR DISCONTINUITIES\*

**AUTHOR:** CARLOS ANDRÉS GALÁN PINILLA\*\*

**KEYWORDS:** Planar Discontinuities, Sizing, phased array ultrasonic testing PAUT.

### DESCRIPTION:

The metallic components during their manufacture and service are exposed to varied stress and damages derived from the manufacturing processes, aggressive environments or mechanical loads. Within the discontinuities that can be produced are the planar, such as lack of fusion, laminations and cracks, stress corrosion cracking, among others, with great probability of concentrating stress and cause a failure. In this sense, The timely identification is made by non-destructive testing, emphasizing the advanced technique of Phased array ultrasonic testing PAUT, which offers detailed discontinuity information with real-time graphic representations of the defects and ease of controlling the parameters, such as the wide variety of angles of refraction and the modification of the active aperture of the beam. In spite of this, there are no procedures established to select the parameters of PAUT and thus to have accuracy in the detection of discontinuities, being necessary investigation in this respect. Due to the limitations of the technique to accurately estimate the actual size of the discontinuities when they change their geometric characteristics like the inclination, Size and morphology, eight samples with mechanized discontinuities and a welded sample with no penetration were designed to study the effect on sizing using PAUT. The obtained results allowed to conclude that the depth of targeting significantly affects the dimensioning of the discontinuities, obtaining lower percentages of error for the focus of the ultrasonic beam at the end of the near field or without focusing, obtaining different behaviors for the longitudinal and transverse waves. This work contributes to the research and characterization of materials by PAUT for the exact dimensioning of discontinuities by this technique, since there are still no optimal operating conditions for this technique

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales; Maestría en Ingeniería de Materiales. Director: Julián Orlando Herrera Ortiz, MSc en Materiales. Codirector: Luz Amparo Quintero Ortiz, MSc en Materiales.

# INTRODUCCIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Los componentes metálicos durante su fabricación y servicio están expuestos a variados esfuerzos y daños derivados de los procesos tales como soldadura<sup>1</sup>, conformación plástica (forja, laminación, trefilado, extrusión, etc) o fundición, así como estar bajo efectos de cargas mecánicas y ambientes agresivos, los cuales pueden generar discontinuidades produciendo fallas a corto plazo o reducciones en su capacidad de carga<sup>2</sup>.

Dentro de este grupo de discontinuidades están las planares (con dos dimensiones significativas) tales como las faltas de fusión, las laminaciones, los diferentes tipos de grietas, entre otras, con gran probabilidad de concentrar esfuerzos generando el crecimiento de éstas hasta la materialización de una falla<sup>3</sup>.

En la identificación oportuna de estas discontinuidades se emplean diferentes Ensayos No Destructivos END, los cuales han sido una herramienta útil para la detección de discontinuidades en líneas de tuberías, tanques de almacenamiento, recipientes sujetos a presión y plantas nucleares, entre otros. Dentro de estos ensayos se destacan las técnicas ultrasónicas, como el ultrasonido por arreglo de fases PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing), el cual aporta información en cuanto a la forma, tamaño, y ubicación de las discontinuidades presentes en los distintos materiales de aplicación industrial<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> SATHISH, T, y PATNAIK M. «Evaluation of Stress Intensity Factor of Welded Structural Steel Component.» International journal of research in aeronautical and mechanical engineering 1 (2013): 1-18.

<sup>2</sup> DIETER, George, y David Bacon. Mechanical metallurgy. London: McGraw-Hill, 1988.

<sup>3</sup> GTC-110, ICONTEC. Guía para la inspección visual de soldaduras GTC 110. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2004.

<sup>4</sup> MICHAEL, Moles, y otros. Introduction to phased array ultrasonic technology applications. tercera. Canada: Olympus NDT, 2007.

A pesar de la alta flexibilidad del PAUT para potencializar las capacidades del ultrasonido convencional con la posibilidad de obtener representaciones gráficas en tiempo real de los defectos y la facilidad de controlar los parámetros, tales como la amplia variedad de ángulos de prueba y la modificación de la apertura activa del haz, entre otros<sup>5</sup>, no contemplados en la técnica de ultrasonido convencional; la técnica presenta limitaciones para estimar el tamaño real de las discontinuidades cuando cambian sus características típicas como inclinación y morfología; afectando la propagación, reflexión, difracción, transmisión, atenuación y difusión de la energía del haz ultrasónico<sup>6,7,8,9</sup>.

Lo anterior ha generado diversos estudios, los cuales han reportado resultados parciales sobre el problema. Por ejemplo, el efecto de la orientación de las discontinuidades planares sobre la detección y dimensionamiento es una de las variables de gran influencia, la cual afecta la amplitud de las señales ultrasónicas<sup>10</sup>. En este sentido, Paritosh y colaboradores<sup>11</sup> registraron desviaciones en las profundidades de las discontinuidades planares con diferente inclinación, empleando focalización del haz con escaneo lineal a 0° y obteniendo registro solo de los extremos de la discontinuidad cuando su inclinación llega a un ángulo de 16°.

---

<sup>5</sup> KASS, Daniel, MICHAEL, Moles, y TOM, Nelligan. Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications. Canada: Olympus NDT, 2010.

<sup>6</sup> ARMITT, Tim, Lavender International NDT, y Sheffield. «Phased Arrays Not The Answer To Every Application.» ECNDT Proceedings - We.3.1.3, 2006: 1-15.

<sup>7</sup> MIKA, Kemppainen, y VIRKKUNEN, Iikka. «Crack Characteristics and Their Importance to NDE.» Journal of Nondestructive evaluation 30 (2011): 143-157.

<sup>8</sup> ARMITT, Tim, «Phased Arrays Not The Answer To Every.» Proceedings ECNDT, paper We3.1.3 11 (2006).

<sup>9</sup> H, Wirdelius, y Osterberg E. Study of defecto characteristics essential for NDT testins methods ET, UT and RT. Sweden: SKI, 2000.

<sup>10</sup> MIKA, Kemppainen, y VIRKKUNEN, Iikka. «Crack Characteristics and Their Importance to NDE.» Journal of Nondestructive evaluation 30 (2011): 143-157.

<sup>11</sup> PARITOSH, NANEKAR, KUMAR ANISH, Y JAYAKUMAR T. «Characterization of planar flaws by synthetic focusing of sound beam using linear arrays.» Nondestructiv eTestingand Evaluation, 2015: 9-14.

Por otra parte, Tim, Peter, & Jason<sup>12</sup> confirmaron que cuando una falla crece y varía de ángulo, inspecciones repetidas de ésta muestran disminución en la amplitud de las señales, afectando la estimación del tamaño de la discontinuidad<sup>13</sup>. Otros investigadores reportan que el tamaño y la morfología de la discontinuidad dificulta la inspección y análisis de las señales ultrasónicas<sup>14,15</sup>, siendo uno de los casos más críticos las grietas de fatiga térmica por tener aperturas muy estrechas, tamaños pequeños y puntas muy agudas. Adicionalmente, encontraron una gran influencia de la apertura de la grieta y la forma de las puntas o tip en la interacción con el haz ultrasónico<sup>16,17</sup>.

Además de lo anterior, otros investigadores reportan la influencia de las tensiones residuales, la rugosidad de la superficie de fractura, las zonas de deformación plástica y el relleno de la discontinuidad con sustancias extrañas entre otros, como factores influyentes en el dimensionamiento de las discontinuidades<sup>18,19</sup>.

Por otro lado, investigaciones realizadas en este campo han aportado en el desarrollo de muestras de referencia utilizadas en entrenamiento de personal en la técnica de phased array y ultrasonido convencional, permitiendo incluir variables de

---

<sup>12</sup> TIM, Armit, Ciorau Peter, y Coulas Jason. A contribution to quantifying the sources of errors in paut. NDT.Net, 2012.

<sup>13</sup> H, WIRDELIUS, Y PERSSON G. «Simulation based validation of the detection capacity of an ultrasonic.» International Journal of Fatigue 41 (2012): 23-29.

<sup>14</sup> TIM, ARMITT, Y SHEFFIELD, Op. Cit

<sup>15</sup> MIKA, Kemppainen. Realistic artificial flaws for nde qualification - a novel manufacturing method based on thermal fatigue. Espoo: Helsinki University of Technology, 2006

<sup>16</sup> LIKKA, Virkkunen, MIKA, Kerppainen, y PITKAMEN, Jorma. «Effect of Crack Opening on UT Response.» EC.NDT, 2006

<sup>17</sup> LIKKA, Virakkunen, MIENTTINEN, Kaisa, y PACKALÉN Tapani. «Virtual flaws for NDE training and qualification.» 11th European Conference on Non-Destructive Testing. Prague Czech Republic: ECNDT, 2014

<sup>18</sup> E, Ginzl, y Johnson D. «Phased-Array Resolution Assessment Techniques.» The e-Journal of Nondestructive Testing, 2008.

<sup>19</sup> NARDONI, Certo M, FEROLDI M, POSSENTI L, FILOSI A, y Calzoni Riva. «Sizing the height of discontinuities, their Characterisation in planar / volumetric by phased array technique based on diffracted echoes.» MENDT, 2010: 1-11.

importancia para estas inspecciones<sup>20</sup>. Sin embargo, en muchos casos se han convertido en desarrollos propios de empresas y su costo de adquisición es elevado.

Con base en todo lo anterior, surge la pregunta de investigación: ¿Qué influencia tienen la inclinación, tamaño y morfología de los extremos de discontinuidades planares en el dimensionamiento mediante PAUT?

Teniendo en cuenta las potencialidades dadas de la técnica de ultrasonido PAUT y las diferentes variables y características de las discontinuidades, se plantea diseñar probetas con discontinuidades inducidas artificialmente que permitan un amplio proceso experimental y comparar los diferentes planes de inspección con barridos electrónicos y sectoriales empleando incidencia angular y normal, obtenidos de las probetas elaboradas con discontinuidades inducidas.

Con la ejecución de la investigación se pretende obtener información que permita comprender la influencia de las variables en el comportamiento del ultrasonido con arreglo de fases PAUT, su afectación y desviación en las mediciones de discontinuidades planares. Además, contribuiría en el manejo adecuado de las características del haz de PAUT para evitar un mal uso, aportando soluciones prácticas al campo investigativo, académico e industrial.

Con base en lo anterior, con la presente investigación se fortalecería la línea de investigación en Ensayos No Destructivos que se ha venido desarrollando en el grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales GIMAT desde hace varios años, llevando a cabo tesis de maestría y trabajos de grado relacionadas con la evaluación de la integridad estructural de materiales como

---

<sup>20</sup> EDWARD, Ginzel, y Steve James. «Variables to consider in the fabrication of ultrasonic reference blocks.» The e-Journal of Nondestructive Testing 19 (2014).

hormigón<sup>21,22</sup>, polímeros<sup>23</sup>, aceros y otras aleaciones<sup>24</sup>. Además se aportará en los trabajos que se han venido realizando en los últimos cuatro años, en la formación de personal en cuanto a la inspección de materiales metálicos consistiendo en el entrenamiento de personal, diseño y elaboración de patrones soldados en acero con defectos controlados inducidos<sup>25</sup>, y la realización de inspecciones con estos ensayos en dependencias de la UIS, como el Campo Escuela Colorado<sup>26</sup> y la sección de Mantenimiento Tecnológico.

La posibilidad de realizar la inspección empleando solamente la técnica PAUT reduce las limitaciones ofrecidas por técnicas complementarias y/o alternativas como por ejemplo TOFD y la radiografía industrial, restringidos por el espesor y la geometría. Además se obtendría reducción del tiempo en la configuración del equipo, análisis de datos y costos de operación asociados con protocolos de seguridad, medios de registros de datos y tiempos para la entrega de resultados<sup>27</sup>. De esta forma este trabajo de investigación busca contribuir en una mejor aplicación de la técnica en la inspección y evaluación de la integridad mecánica de componentes metálicos.

---

<sup>21</sup> CRUZ, Ricardo, QUINTERO, Luz, y Julián Herrera. «Evaluación del efecto de barras de refuerzo en concreto sobre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico (vpu).» Revista Colombiana de Materiales, 2013: 107-113.

<sup>22</sup> CRUZ, Ricardo, QUINTERO, Luz Elkin Expinosa, y Carlos Galán. «Evaluación de ensayos no destructivos para identificar deterioro en puentes de concreto.» Revista Colombiana de Materiales, 2013: 55-60.

<sup>23</sup> QUINTERO, Luz, ARCINIEGAS, Javier, y Jaime Meneses. «Análisis de técnicas de inspección no destructiva en tubería flexible con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos.» Revista Colombiana de Materiales, 2013: 78-85

<sup>24</sup> MENDOZA, Edward, y QUINTERO, Luz. Diseño de una metodología no destructiva para la captura digital y el dimensionamiento en 3d de discontinuidades externas en tuberías de transporte de hidrocarburos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.

<sup>25</sup> CHINOME, Ivan, PABON, diego, QUINTERO, Luz y HERRERA Julian. Elaboracion de muestras soldadas en t empleando tubería, para su evaluación mediante ensayos no destructivos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2015.

<sup>26</sup> ABRIL, Sergio, CONTRERAS, Juan, QUINERO, Luz y MUÑOZ, Campo. Determinación del estado actual del tramo colector principal del sector sur (pc44 - estación separadora) del campo escuela colorado-uis mediante ensayos no destructivo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013.

<sup>27</sup> DANIEL, Kass, MOLES, Michael y NELLIGAN, Tom, Op. Cit.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

Estimar mediante la técnica de ultrasonido con arreglo de fases el tamaño de discontinuidades planares inducidas artificialmente.

### **1.2.2 Objetivos específicos:**

- ✓ Diseñar muestras con discontinuidades planares variando su tamaño, orientación y morfología de los extremos, para su evaluación por Phased Array.
- ✓ Caracterizar dimensionalmente las muestras elaboradas con defectología inducida mediante microscopía óptica para establecer la referencia de las discontinuidades inducidas.
- ✓ Evaluar el efecto del tamaño y orientación de las discontinuidades inducidas sobre su dimensionamiento con arreglos de fases de la técnica ultrasónica.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos mediante ultrasonido por arreglo de fases de las discontinuidades inducidas artificialmente con discontinuidades generadas en procesos de soldadura.

**1.2.3 Hipótesis:** La inclinación, tamaño y morfología de las discontinuidades planares afectan significativamente su dimensionamiento mediante PAUT y altera la amplitud de la señal y las representaciones gráficas de las mismas.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

El concepto de varios elementos encapsulados en una sonda no es reciente, donde a finales de los años 60's se publicaron trabajos con circuitos electrónicos que establecían un desfase entre los pulsos ultrasónicos, requiriendo equipos muy robustos con muchas limitaciones en su funcionamiento, siendo sin duda los diferentes trabajos de investigación los que dieron lugar al desarrollo de la técnica. En este aspecto se pueden encontrar aportes generados al modificar los parámetros del PAUT, el tipo y tamaño de las discontinuidades, su detección y dimensionamiento. A continuación se presentan algunas de estas investigaciones.

**Jorma Pitkänen y colaboradores (2006<sup>28</sup>)**, evaluaron el efecto de la apertura y los esfuerzos residuales en la respuesta del ultrasonido, en la detección y en el dimensionamiento de grietas. El estudio se desarrolló generando una grieta, variando su apertura y aplicando sobre ella diferentes ciclos térmicos controlados con el fin de evaluar su efecto sobre las señales ultrasónicas obtenidas. Concluyen que en la mayoría de los casos, la estimación del tamaño se ve afectada con variaciones de hasta 11 dB por el fenómeno de la “conversión de modo de la onda” cuando se pasa de una grieta abierta a una cerrada, y variaciones hasta de 14 dB cuando se inducen tensiones residuales sobre la zona de inspección. Sugieren la elaboración de patrones que permitan estimar cuantitativamente el efecto de cada variable en la amplitud de las señales.

**Jérôme Poguet y Peter Ciorau (2010<sup>29</sup>)**, estudiaron las tolerancias de los parámetros involucrados en la técnica Phased array como el pitch, profundidad

---

<sup>28</sup> JORMA, Pitkaen, OY, Posiva, LAUKKANEN, Anssi, MIKA, Kemppainen y IIKKA, Virkunen. Effect of stress on ultrasonic response in detection and sizing of cracks. EC NDT - Materials Testing 49 (2006): 299-309.

<sup>29</sup> JÉRÔME, Poguet; PETER, Ciorau. The Influence of PAUT Parameters on Crack Height, Location and Pattern and Height Sizing. Proceedings 8th Int. Nucl. NDE Conf.-paper Th. 3.B.2. 2010.

focal, y resolución angular para la visualización, ubicación y dimensionamiento de grietas de fatiga y de corrosión bajo tensión. Registrando que pequeños cambios de estos parámetros afectaban de forma considerable el resultado obtenido al evaluar la misma discontinuidad, y afirman que el rango de tolerancia y el efecto que causa en el dimensionamiento depende de la discontinuidad y aplicación.

**H. Wirdelius y G. Persson (2012)**, empleando un procedimiento con la técnica ultrasonido convencional y muestras con discontinuidades inducidas artificialmente, evaluaron la probabilidad de detección de fallas POD en función de diferentes profundidades y tamaños del defecto, con el fin de encontrar resultados óptimos en función de una discontinuidad determinada, material, rango de tamaños del defecto y otras características.

**Tim Armitt y colaboradores (2012<sup>30</sup>)**, realizaron estudios donde se relacionaban diferentes fuentes de error en el dimensionamiento y ubicación de grietas. Los errores son agrupados con base a las limitaciones de los equipos, piezas de prueba, características de defectos, condiciones de inspección, concluyendo que las tolerancias de las variables antes mencionadas son muy estrechas para obtener errores menores de  $\pm 0.5$  [mm]. El proceso experimental confirma la alta flexibilidad y capacidad de la técnica PAUT; sin embargo, aseguran que un buen resultado se obtiene como la combinación de un buen plan de inspección, una alta redundancia para el dimensionamiento y validación que confirme la mejor configuración para cada tipo de inspección.

Diferentes trabajos realizados empleando la técnica de ultrasónico con arreglo de fases de autores como el **Jochen H. Kurz y colaboradores (2013<sup>31</sup>)** aseguran que es conveniente realizar un proceso experimental para cada tipo de discontinuidad y elaborar, mediante conceptos estadísticos, curvas de probabilidad de detección de

---

<sup>30</sup> TIM, Armitt; PETER, Ciorau; JASON, Coulas. A contribution to quantifying the sources of errors in paut. [online], 2012 [cited 12 Noviembre 2016]. Disponible en NDT.Net.

<sup>31</sup> JOCHEN, Kurz; ANNE, Jüngert; DUGAN, Sandra; GERD, Dobmann. Reliability considerations of NDT by probability of detection. Engineering Failure Analysis. 2013. P. 609-617.

falla empleando patrones con discontinuidades artificiales y con discontinuidades reales conocidas. De esta manera se tendrá una relación que permita estimar la probabilidad con que cada defecto es encontrado y caracterizado.

Otros autores como **B. DUPONT y F. BERTHELOT (2014<sup>32</sup>)** estudiaron mediante **técnicas** ultrasónicas con sondas matriciales la caracterizaron de indicaciones y su comparación con los resultados obtenidos al destruir las muestras. Los análisis permitieron concluir que en algunos casos se presenta una diferencia entre el tamaño real y el tamaño estimado con la reflectividad de las ondas. La orientación del defecto, la geometría y la proximidad con otros defectos fueron parámetros influyentes en la amplitud de la señal, pudiendo en algunos casos particulares sobreestimar o subestimar el tamaño.

**Edward Ginzle y colaboradores (2015<sup>33</sup>)**, con investigaciones llevadas a cabo en Materials Research Institute se han realizado gran cantidad de aportes relacionados con la técnica ultrasónica de manera experimental y empleando software de simulación como CIVA y ESBeamtool. Se destacan los resultados publicados en trabajos recientes, donde registran un método para visualizar las ondas ultrasónicas en un material foto-elástico con propiedades acústicas similares a las del acero, logrando comprender muchos conceptos planteados teóricamente sobre la teoría de ondas y sobre las interferencias constructivas y destructivas. Este método permitió obtener imágenes y videos de la formación del frente de onda producido por un pulso excitando diferentes grupos de cristales de la sonda, con ángulos de refracción diferentes y con otros montajes permitiendo una comprensión visual de la interacción y formación del haz de ultrasonido con arreglo de fase.

---

<sup>32</sup> B. DUPONT, F. BERTHELOT. «Characterization of small defects using total focusin method.» 11th European Conference on Non-Destructive Testing ECNDT, 2014: 1-6.

<sup>33</sup> GINZEL, Edward, y STEVE, James. Variables to consider in the fabrication of ultrasonic reference blocks. The e-Journal of Nondestructive Testing 19 (2014).

De esta manera se han venido registrando aportes significativos. Sin embargo, todavía no hay una solución al problema planteado, razón por la cual las investigaciones continúan con el objetivo de comprender la interacción del ultrasonido y sus variables involucradas para lograr resultados exactos en cuanto a la evaluación de discontinuidades planares en componentes metálicos.

**2.1.1 Características dimensionales de las discontinuidades planares.** Las discontinuidades planares son consideradas altamente críticas para el funcionamiento de componentes metálicos, debido a que son concentradores de esfuerzo que a corto o a largo plazo pueden generar fallas catastróficas y las técnicas no destructivas son el único medio que permite detectarlas de manera oportuna. En este sentido se han desarrollado investigaciones para determinar la exactitud que ofrece cada técnica y la confiabilidad que se obtiene en las mediciones. En el caso particular de la presente investigación nos enfocamos en las discontinuidades mecanizadas que han sido diseñadas por otros investigadores para la técnica de ultrasonido por arreglo de fases “PAUT”, información que nos permitirá diseñar las muestras. En la tabla 1 se presentan EL RESUMEN DE LOS ARTICULOS Y CODIGOS CONSULTADOS estos resultados.

En la tabla 2 se presentan los criterios de aceptación y rechazo de los códigos ASME y API, para ultrasonido, indicando las dimensiones máximas permitidas o el rechazo independientemente del tamaño.

**Tabla 1.** Dimensiones empleadas en investigación.

DIMENSIONES DE LAS DISCONTINUIDADES DISEÑADAS Y MECANIZADAS PARA INVESTIGACIONES						
	*P	*L	*A	**α	Forma	Resultados encontrados
Paritosh <sup>34</sup>	24 - 25	5,5	2	90°, 74°, 62°, 54°, 48°, 39°.	Plana	Dificultad para dimensionar ranuras con los ángulos de inclinación mayores y menores, detectando todas las discontinuidades fueron identificadas. El proceso de mecanizado fue por electroerosión.
Souad Bannouf <sup>35</sup>	10	40	~1	90°	/	Mediante simulación se identificaron los ecos ultrasónicos de la esquina de la discontinuidad con baja amplitud de las señales. Recomienda validar resultados experimentalmente y agregar discontinuidades volumétricas.
Satyanaraya <sup>36</sup>	5- 25	20	0,5	90°	/	Implementó procesamiento de señales mediante "Finite Difference Domain Time" y obtuvo exactitud del 98%, además, un aumento en la amplitud de las señales de hasta 60% en la visualización A-scan.
Kemppainen <sup>37</sup>	0,1 - 0,8	/	/	90°	/	El estudio lo oriento en determinar a partir de que tamaño se detectan las grietas y concluyo que una grieta de 0,2 [mm] tiene una probabilidad de 0% en detectarse y una probabilidad alta de detectarla a partir de 1 [mm].
Poguet <sup>38</sup>	12	35	3	90°	plana	Con la investigación concluyen algunos parámetros de PAUT con los que se obtienen mejores resultados en el dimensionamiento de grietas.
Wirdelius <sup>39</sup>	2, 5, 10, 20.	5- 40	0,3	0°, 45°	/	Reporto que las discontinuidades planares con 2 mm de profundidad presentan dificultad para dimensionarlas.
Ciorau <sup>40</sup>	6	40	2	50°-90°	Plana	Registro tamaños de las discontinuidades inferiores al tamaño real
*P: Tamaño de la discontinuidad, *L: Largo de la discontinuidad, A: Ancho de la discontinuidad, **α: Ángulo de inclinación.						

<sup>34</sup> Paritosh, Op. Cit.,

<sup>35</sup> Souad Bannouf, Op. Cit.,

<sup>36</sup> Satyanaraya, Op. Cit.,

<sup>37</sup> Kemppainen, Op. Cit.,

<sup>38</sup> Poguet, Op. Cit.,

<sup>39</sup> Wirdelius, Op. Cit.,

<sup>40</sup> Ciorau, Op. Cit.,

**Tabla 2.** Criterios de aceptación y rechazo por ultrasonido.

<b>DIMENSIONES DE LAS DISCONTINUIDADES DISEÑADAS Y MECANIZADAS PARA INVESTIGACIONES</b>	
<b>Criterio de aceptación y rechazo bajo ASME. Sec VIII-Div 2, parágrafo 7.5.4<sup>41</sup>.</b>	<b>Criterio de aceptación y rechazo bajo ASME. Sec VIII. Div 2, tabla 7.9<sup>42</sup>.</b>
Imperfecciones que sean interpretados como grietas, faltas de fusión o falta de penetración son inaceptables independientemente de la longitud.	La relación entre el ancho de la discontinuidad y el espesor de la lámina $a/t \leq 0,087$ , ( $a=1,3$ [mm] para un espesor de 15 [mm]) y una longitud del defecto menor a 6,4 [mm]. El caso anterior se aplica para un rango de espesor de lámina de 13 [mm] a 25 [mm]
Todas las imperfecciones lineales son inaceptables si exceden la amplitud de referencia y la longitud supera 6 [mm] para espesores menores a 19 [mm].	
<b>CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO POR ULTRASONIDO BAJO ASME B31.3. CAPÍTULO VI. ED 2014<sup>43</sup>.</b>	
Discontinuidades de tipo lineal son inaceptables si la amplitud de la indicación excede el nivel de referencia y su longitud es superior a 6 [mm] para espesores nominales de pared menores a 19 [mm].	
<b>CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO POR ULTRASONIDO BAJO API 1104<sup>44</sup>.</b>	
Indicaciones lineales abiertas a la superficie que excedan 25 [mm] en una longitud continua de 300 [mm] o que excedan el 8% de una soldadura y las grietas en cualquier dimensión son considerados defectos.	

<sup>41</sup> American Society Of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessels Code section V. Two Park Avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2013.

<sup>42</sup> Ibid.,

<sup>43</sup> American Society Of Mechanical Engineers. Process piping. Two Park Avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2012.

<sup>44</sup> American Petroleum Institute. Welding of pipelines and related facilities. Washington, API Publishing Services. API, 2013.

La fabricación de bloques de referencia y de calibración se ha convertido es una estrategia de mercado de las empresas con muescas, entallas o ranuras con dimensiones en un rango de tamaño casi que ilimitado. El tamaño mínimo reportado por las empresas para la fabricación de las entallas alcanza los 0,05 [mm] de ancho, con posibilidad de garantizar gran variedad de formas en el extremo o punta de la discontinuidad, ya sea de forma plana, cóncavo, convexo, en V, irregular con formas particulares y profundidad deseada por el cliente. La limitación que tienen estos bloques es el elevado costo que presentan para la adquisición, el cual supera en la mayoría de casos los mil dólares.

## **2.2 GENERALIDADES DEL ULTRASONIDO CON ARREGLO DE FASES (PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING PAUT)**

La técnica de ultrasonido por arreglos de fases PAUT es una técnica de inspección que emplea ondas de la misma naturaleza que el sonido, pero con frecuencias entre un rango de 1 a 15 [MHz], para su uso en la evaluación de materiales sin modificar sus propiedades. Las ondas ultrasónicas son vibraciones mecánicas inducidas a velocidades constantes en un medio elástico (la pieza de ensayo) por la excitación con un voltaje eléctrico de los cristales piezoeléctricos embebidos en una sonda siguiendo leyes focales<sup>45</sup>.

La técnica PAUT, emplea sondas con una gran cantidad de cristales piezoeléctricos que pueden ser controlados independientemente, contrario a lo contemplado en la técnica de ultrasonido convencional donde solo se controlan uno o dos cristales (monocristal o dual)<sup>46</sup>. Los equipos de PAUT controlan electrónicamente un número de cristales que se activan instantáneamente generando palpadores virtuales

---

<sup>45</sup> MOLES, Michael. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Canada: Olympus NDT, 2007.

<sup>46</sup> Ibid.,

(Virtual Probe Aperture VPA), con la posibilidad de generar haces en un rango de ángulos sin cambiar la zapata o cuña acoplada a la sonda. Contrario a lo que ocurre en la técnica de ultrasonido convencional donde se cuenta con un solo cristal cuyo diámetro es fijo y el ángulo refractado es único de cada zapata acoplada<sup>47,48</sup>.

Las sondas empleadas en el PAUT, al tener gran cantidad de cristales embebidos (típicamente de 16 o hasta 256), cuenta con fuentes puntuales que son pulsadas de manera controlada. Lo anterior genera que dos o más ondas con la misma frecuencia, pero con diferente retardo de tiempo, resulten en interferencias constructivas que forman un frente de onda con mayor energía que la generada por un palpador convencional del mismo diámetro<sup>49</sup>. La figura 1 presenta una comparación gráfica entre un palpador monocristal empleado en ultrasonido convencional y una sonda multicristal empleada en la técnica PAUT.

La técnica PAUT es toda una tecnología que proporciona la habilidad de modificar ciertas características de haz ultrasónico, mediante la aplicación de retardos de tiempo de disparo de los cristales individuales, una vez el ultrasonido está en el material es independiente del método de generación, razón por la cual el perfil ultrasónico presenta un campo cercano y un campo lejano, al igual que un ángulo de divergencia y atenuación a medida que viaja en el material.

Por otra parte, la transformación de un tipo de onda en otro “conversión de modo” permite que puedan obtenerse ondas transversales o superficiales empleando una sonda de PAUT con haz longitudinal acoplado sobre una zapata con un ángulo de incidencia adecuado siguiendo la ley de Snell. Esta conversión ocurre cuando las ondas ultrasónicas generadas por cada cristal inciden oblicuamente sobre una

---

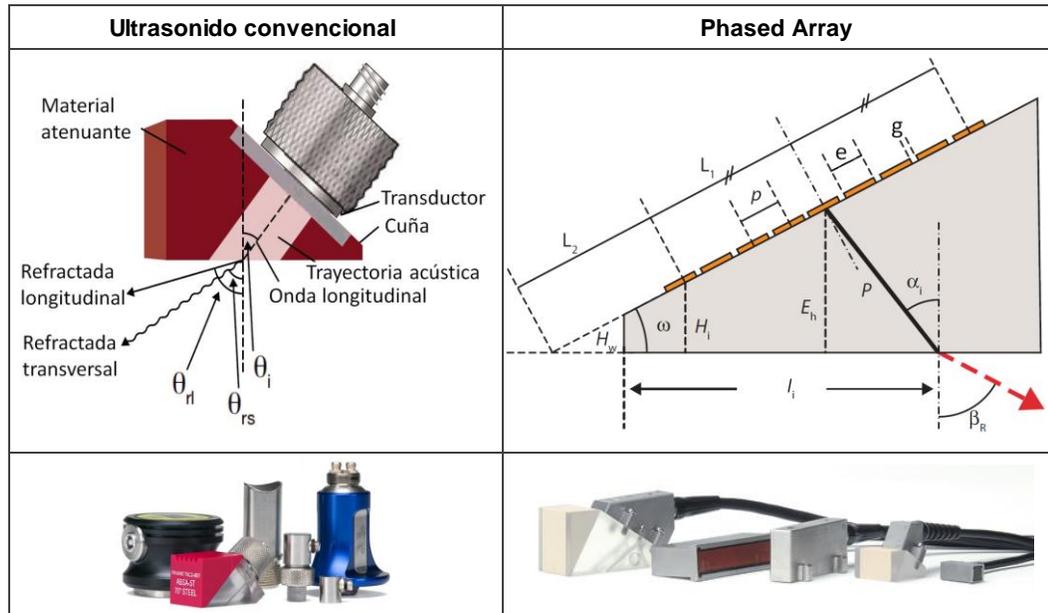
<sup>47</sup> Ibid.,

<sup>48</sup> Moles, Op. Cit.,

<sup>49</sup> Moles, Op. Cit.,

superficie entre dos materiales con velocidades acústicas diferentes, con la interacción de la geometría de la pieza o las discontinuidades<sup>50</sup>.

**Figura 1.** Palpadores ultrasónicos: a) Palpador convencional, b) Sonda PAUT <sup>51</sup>.



Todas las características implementadas por la técnica PAUT permiten controlar la excitación de los cristales individuales de la sonda multielemento detallada anteriormente, permitiendo generar haces focalizados a profundidades variables sin emplear lentes o cuñas especiales, además de la posibilidad de modificar electrónicamente los parámetros como el ángulo de refracción dentro de un rango determinado y la modificación de la apertura virtual dentro de las principales ventajas en cuanto a la generación del ultrasonido<sup>52</sup>.

Las aplicaciones más importantes de esta técnica están relacionadas con inspección de soldadura, detección de grietas y la realización de mapeos de

<sup>50</sup> Moles, Op. Cit.,

<sup>51</sup> Moles, Op. Cit.,

<sup>52</sup> Moles, Op. Cit.,

corrosión en una amplia variedad de componentes metálicos empleados en industrias como la aeronáutica, petroquímica y metalmecánica. Las características anteriores presentan grandes ventajas sobre el ultrasonido convencional, simplificando en gran medida la inspección de componentes, el análisis de los datos y el registro visual de manera permanente de los resultados obtenidos<sup>53</sup>.

**2.2.1 Características del haz ultrasónico.** La formación del haz ultrasónico es controlada por medio de la aplicación de retardos de tiempos en el disparo de los elementos transductores independientes que conforman la sonda. Los tiempos de retardo se encuentran en el orden de  $\mu\text{s}$ , con exactitudes de ns, por lo que la formación del haz es realizada en fracciones de segundos<sup>54</sup>.

Durante la transmisión, la unidad de adquisición envía la señal a la unidad de Phased Array por medio de un disparador, para convertir la señal en pulsos de alto voltaje con un tiempo de retardo definido en la ley focal. Cada elemento recibe solo un pulso, creando un haz con las características deseadas; el haz golpea el defecto reflejándose o rebotando. Estas señales reflejadas son captadas por los elementos de la sonda aplicando las acciones inversas a las del proceso de emisión, como se observa en la figura 2.

Los haces ultrasónicos generados por las sondas multicristal pueden ser enfocados en un pequeño diámetro en un punto focal dentro del campo cercano del ultrasonido, mejorando considerablemente la resolución y el dimensionamiento de defectos cercanos. Una vez el ultrasonido converge en una profundidad focal, el haz se expande de nuevo creando un haz en forma de reloj de arena. La profundidad y el tipo de enfoque se puede modificar mediante las leyes focales que se aplican a los cristales, permitiendo obtener focalizaciones de diferentes tipos dependiendo de las

---

<sup>53</sup> Moles, Bird, y otros, Op. Cit.,

<sup>54</sup> Moles, Bird, y otros, Op. Cit.,

capacidades del equipo, dentro de las que se encuentran la focalización en una proyección vertical, cuya profundidad es variable, en una proyección horizontal cuya profundidad es constante, con igual trayectoria acústica para todos los haces o focalización en un plano específico  $xz$ <sup>55</sup>.

Como consideración se tiene que solamente es posible focalizar los haces en la zona de convergencia o campo cercano N según la geometría del haz ultrasónico, que para el caso de Phased Array depende de la frecuencia  $f$  de la sonda, el número de cristales activos o tamaño virtual  $L$  y la velocidad de sonido en la pieza de ensayo, además de un factor de tamaño del cristal obtenido como una relación entre las dimensiones corto y largo del elemento<sup>56,57</sup>.

Algunas aplicaciones requieren que el tamaño del haz sea reducido en un área de interés para discriminación de zonas, o inspecciones con alta resolución. La focalización es usada principalmente para incrementar la resolución en fallas pobremente espaciadas, incrementar la respuesta de fallas pequeñas y la señal de difracción de la punta para mejorar el dimensionamiento<sup>58</sup>.

---

<sup>55</sup> Kass, Moles y Nelligan, Op. Cit.,

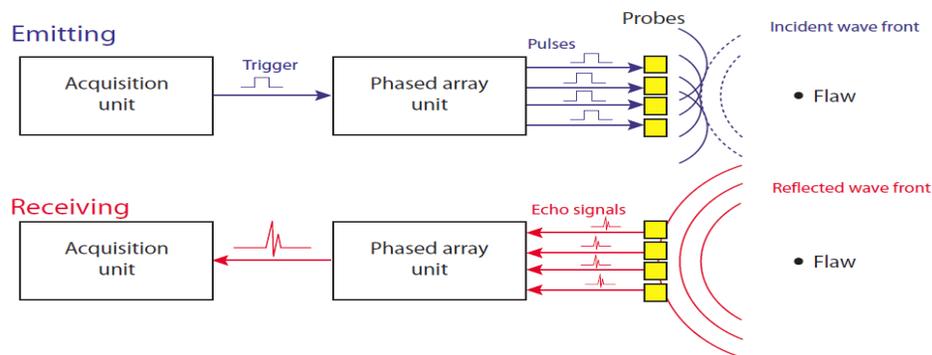
<sup>56</sup> GINZEL, Eduard, EKHLAS, Golshani A, M. MATHESON, y BROWN B. «Near Field Length Compensation Options.» The e-Journal of Nondestructive Testing 19 (2014): 1-18.

<sup>57</sup> Kass, Moles y Nelligan, Op. Cit.,

<sup>58</sup> Moles, Bird, y otros, Op. Cit.,

**2.2.2 Patrones de escaneo y presentaciones del phased array.** En la tabla 3 se presentan algunas de las características más importantes de los patrones de escaneo y las presentaciones gráficas que se pueden obtener fácilmente de los datos adquiridos. Los arreglos que tienen los cristales dentro de la sonda permiten programar la generación de patrones de escaneos electrónico E-scan y sectoriales S-scan.

**Figura 2.** Formación del haz<sup>59</sup>.



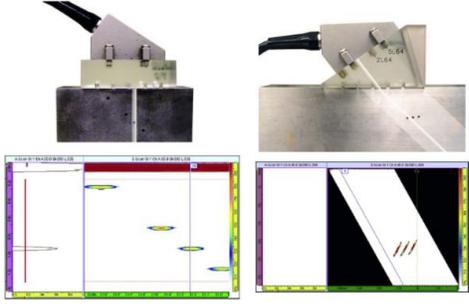
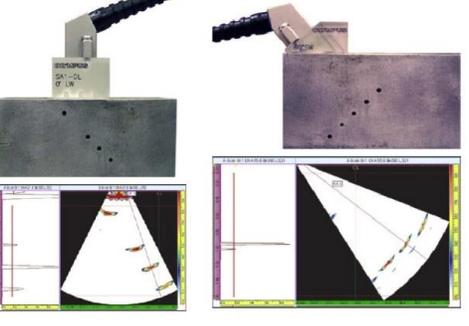
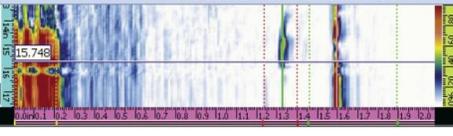
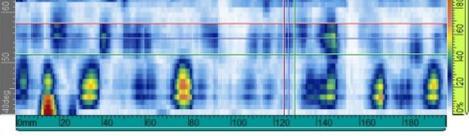
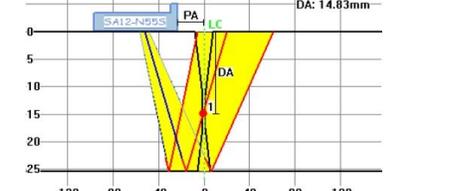
El E-scan se caracteriza por pulsar un grupo de elementos seleccionados VPA con el mismo ángulo, de manera tal que solo un grupo de cristales es excitado, paso siguiente está ley focal es multiplexada a los elementos siguientes a lo largo de la longitud de la sonda de arreglo lineal, haciendo un barrido lineal sin necesidad de mover la sonda o palpador.

En la práctica el barrido electrónico es en tiempo real, obteniendo datos de la sección cubierta permitiendo escaneos. Este tipo de barrido ahorra tiempo en la inspección puesto que no se requiere de un movimiento mecánico de la sonda cubriendo el área de interés que se está inspeccionando, obteniendo una representación gráfica como la mostrada en la tabla 3<sup>60</sup>.

<sup>59</sup> Moles, Bird, y otros, Op. Cit.,

<sup>60</sup> Moles, Op. Cit.

**Tabla 3. Patrones de escaneo y presentaciones gráficas del equipo Omniscan.**

Patrones de escaneo y presentación del Omniscan MX2		
Escaneo electrónico E-	<p>La misma ley focal que se aplica al primer VPA que se multiplexea a los grupos de elementos activos a lo largo de la sonda. La exploración se realiza con un ángulo constante, con flexibilidad para escanear con haz normal y con haz angular con un ángulo definido en la ley focal. Este barrido electrónico reemplaza el movimiento mecánico del palpador convencional. El E-scan presenta una imagen bi-dimensional de amplitud Vs tiempo de todas las leyes focales para el mismo ángulo de refracción.</p>	
Escaneo sectorial S-scan	<p>Escaneo que emplea una apertura VPA fija pero con tiempos de retardo para hacer un barrido con una serie de ángulos. La exploración se realiza entre un rango de ángulos definido empleando zapatas o cuñas normales o angulares. Este escaneo permite inspeccionar el componente con diferentes ángulos aumentando la probabilidad de detección de fallas y reduciendo tiempos de inspección. El S-scan presenta una imagen bi-dimensional de amplitud Vs tiempo de todas las leyes focales para diferentes ángulos de refracción.</p>	
A-scan	<p>Representación donde se registran dos parámetros de un eco: La amplitud y el tiempo o distancia en el que se produce. El eje vertical representa la amplitud, el eje horizontal el tiempo o la distancia, la línea de colores son compuertas o herramientas de medición.</p>	
B-Scan	<p>Representación de la sección transversal de una pieza. En el eje vertical se tiene el eje de ultrasonido o profundidad y en el eje horizontal la longitud de barrido. Los colores representan la amplitud de los ecos graficado.</p>	
C-scan	<p>Representación de datos como una vista superior de la pieza de ensayo. Los colores representan la amplitud de los ecos graficados. La sonda hace un barrido electrónico en una dirección a lo largo del eje escaneo.</p>	
Ray tracing	<p>Representación de corte transversal de la pieza bajo ensayo, de la propagación de los haces ultrasónicos en dicha pieza, los límites de la puerta de medición, de la zapata y de la forma de la soldadura. Durante la inspección permite resaltar dinámicamente el reflector.</p>	

El S-scan se caracteriza por pulsar un grupo fijo de elementos de tal manera que el barrido del haz de sonido se realice a través de una serie de ángulos, obteniendo una representación gráfica como la mostrada en la tabla 3. Estos dos patrones de escaneo pueden simultáneamente generar representaciones gráficas A-scan, B-scan, C-scan y Ray tracing detallados en la tabla 3.

**2.2.3 Curvas de dimensionamiento.** La configuración de los equipos para la evaluación del tamaño o dimensionamiento de las discontinuidades debe contemplar la atenuación o caída de amplitud de las indicaciones respecto a la distancia o profundidad a la que se encuentran. En ultrasonido convencional se utilizaba según el código ASME la curva DAC distancia amplitud corrección, presentando una curva con la amplitud de una señal del mismo diámetro a profundidades mayores<sup>61</sup>.

En la técnica de ultrasonido por arreglo de fases PAUT, debido a que la formación del haz se basa en la variación de retardos de los elementos o grupos de elementos, se debe normalizar la amplitud de respuesta de cada ley focal para compensar tanto las variaciones de atenuación de elemento a elemento en la cuña y en la energía de los diferentes ángulos refractados.

La corrección de ganancia en función del tiempo (Time-Corrected Gain TCG) aumenta la ganancia aplicada a la señal como una función del tiempo que retarda los ecos en el regreso. El resultado es que los picos de los ecos de las fallas de referencia del mismo tamaño se muestran a la misma altura en la pantalla independientemente de su posición en la pieza, siendo esta una característica propia de la tecnología del Phased Array para el dimensionamiento facilitando el análisis gráfico en las diferentes presentaciones. Cuando se usa la inspección

---

<sup>61</sup> Boiler and Pressure Vessels Code 2013

PAUT, una curva TCG tiene mejor aplicación puesto que la corrección de la amplitud también puede ser visualizada en las demás representaciones así como en el A-scan<sup>62</sup>.

### **2.3 DIMENSIONAMIENTO DE DISCONTINUIDADES CON PAUT**

El dimensionamiento de las discontinuidades depende de muchos factores que están involucrados en la inspección con PAUT<sup>63</sup>. Estos factores se pueden dividir en los dependientes de la técnica de ultrasonido por arreglo de fases PAUT, la capacidad de equipo empleado y los relacionados con el comportamiento físico del ultrasonido y su interacción con los materiales y las discontinuidades<sup>64</sup>, todos de alta importancia durante la inspección.

En cuanto a los factores dependientes de la técnica PAUT se encuentran todas aquellas variables que se pueden manipular para llevar a cabo la inspección, como el tipo de arreglo o patrón de escaneo sectorial o electrónico, el número de cristales activos VPA, el rango de ángulos y su paso, el paso de la ley focal multiplexada en el escaneo electrónico, si el haz está o no focalizado, el tipo de zapata acoplado a la sonda entre otros como influyentes directamente en el resultado obtenido. Por otra parte el personal encargado debe contar con capacitación formal tanto en ultrasonido convencional como el PAUT evitando incluir variables subjetivas en los resultados<sup>65</sup>.

En cuanto al comportamiento físico del ultrasonido al interactuar con el material es afectado por la velocidad de propagación, el coeficiente de atenuación y la

---

<sup>62</sup> Moles, Op. Cit.

<sup>63</sup> DUXBURY, David, RUSSELL, Jonathan, y LOWE, Michael. «The effect of variation in phased array element performance.» *Ultrasonics* 53 (2013): 1065-1078.

<sup>64</sup> C, WAITES, Y WHITTLE J. «The estatus os performance demostratrion and evaluation developments.» *ritish Institute of Non-Destructive Testing*, 1998: 810-813.

<sup>65</sup> Moles, Op. Cit.,

estructura interna del material, además la temperatura de la pieza como aspectos a considerar en el comportamiento del ultrasonido<sup>66</sup>. Por otra parte la interacción del ultrasonido con las discontinuidades es complejo y su resultado puede conducir a que existan cambios en la onda, pudiendo ocurrir reflexión, refracción y difracción, influyendo en la energía de la onda que regresa a la sonda para ser procesada por el equipo<sup>67</sup>. Pequeñas variaciones dimensionales, morfológicas y de ubicación respecto al haz ultrasónico incidente puede llegar a realizar dimensionamiento de discontinuidades subestimando o sobreestimando sus dimensiones, siendo estas las empleadas para aplicar los respectivos criterios de aceptación o rechazo para el funcionamiento del componente. En la tabla 4 se muestran algunos de los fenómenos que ocurren cuando una onda ultrasónica incide sobre un reflector de tipo natural y artificial fabricado mediante métodos de mecanizado o arranque selectivo de material<sup>68</sup>.

## 2.4 MÉTODOS PARA GENERAR DISCONTINUIDADES

Existen en la actualidad variados métodos que permiten obtener discontinuidades en materiales para fines investigativos y académicos, obteniendo discontinuidades lo más realistas posibles. Diferentes autores han desarrollado métodos complejos que permiten obtener discontinuidades reales de manera controlada<sup>69,70</sup>, de manera que son totalmente representativas y morfológicamente iguales a las generadas en procesos industriales, como la obtención de grietas de fatiga térmica de manera intencional; sin embargo estos métodos requieren de mucho tiempo,

---

<sup>66</sup> JORMA, Pitkaen, OY, Posiva, LAUKKANEN, Anssi, KEMPPAINEN, Mika, y VIRKUNEN, Iikka. «Effect of stress on ultrasonic response in detection and sizing of cracks.» EC NDT - Materials Testing 49 (2006): 299-309.

<sup>67</sup> MIKA y IIKKA, Op. Cit.,

<sup>68</sup> MIKA y IIKKA, Op. Cit.,

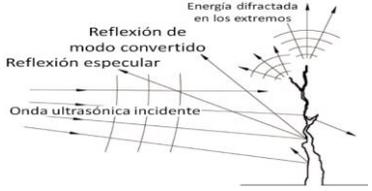
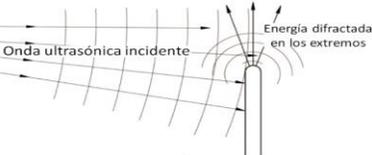
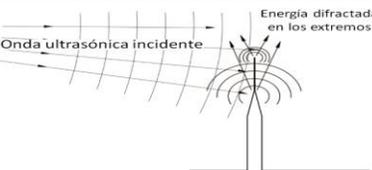
<sup>69</sup> MIKA, KEMPPAINEN. Realistic artificial flaws for nde qualification - a novel manufacturing method based on thermal fatigue. Espoo: Helsinki University of Technology, 2006.

<sup>70</sup> LIKKA, KAISA Y TAPANI, Op. Cit.,

experimentación y equipos, donde aún en la actualidad los métodos desarrollados no obtienen una repetibilidad y control dimensional del 100%.

Otros autores<sup>71</sup> han obtenido muestras a las cuales le inducen defectos mediante algún tipo de mecanizado, realizando un arranque de material de manera controlada, y repetible, controlando parámetros como el tamaño, inclinación, ubicación, entre otros de manera fácil y económica. Dentro de los métodos de mecanizado la electroerosión es uno de los más adecuados con el fin de inducir estos defectos artificiales reproduciendo algunas de las características de las discontinuidades reales. A continuación se describe el proceso de mecanizado de materiales metálicos<sup>72</sup>.

**Tabla 4.** Interacción de una onda ultrasónica con un defecto<sup>73</sup>

<p>Fenómenos que ocurren cuando una onda ultrasónica incidente interactúa con una grieta. La energía se divide en los modos convertidos, en la difracción de los extremos y en la reflexión especular de interés.</p>	
<p>Interacción de una onda ultrasónica con un reflector artificial con el extremo abierto y redondeado: La energía se divide en la difracción del extremo y en la reflexión de la superficie.</p>	
<p>Interacción de una onda ultrasónica con un reflector artificial con el extremo cerrado y alargado: La energía se divide en la difracción de los extremos y en la reflexión de la superficie.</p>	

<sup>71</sup> GINZEL Y JAMES, Op. Cit.,

<sup>72</sup> JUEZ, José, y INOCENTE, Cambero. Manual de técnicas para la conformación mecánica. España: Universidad de Extremadura, 2009.

<sup>73</sup> Mika, Op. Cit.,

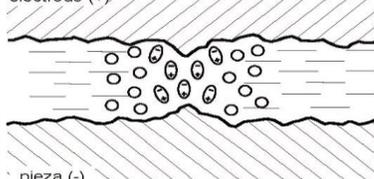
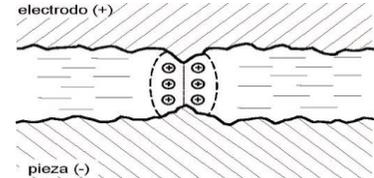
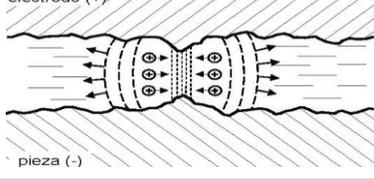
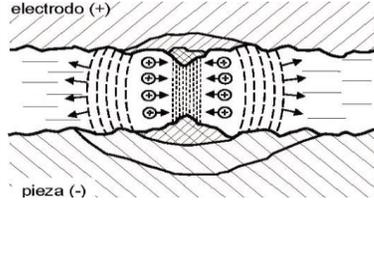
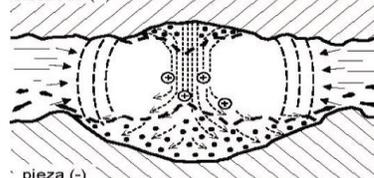
**2.4.1 Mecanizado.** El proceso de mecanizado de materiales metálicos puede ser realizado mediante variados procesos removiendo el material sobrante de acuerdo con el plano de la pieza que se desea obtener. Estos procesos empleados en el arranque de material se pueden clasificar en dos grandes grupos: de contacto directo o sin contacto directo.

La selección del método está directamente relacionado con la geometría de la pieza y el tipo de arranque que se requiera hacer. A fin de obtener muestras como las planteadas para este proyecto, los métodos de electroerosión son los más adecuados, puesto que permiten hacer arranque de material de manera controlada y con dimensiones muy finas.

La electroerosión es un proceso de mecanizado de descarga eléctrica, el cual consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico, para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo. Las etapas que ocurren durante un proceso de electroerosión se detallan a continuación en la tabla 5.

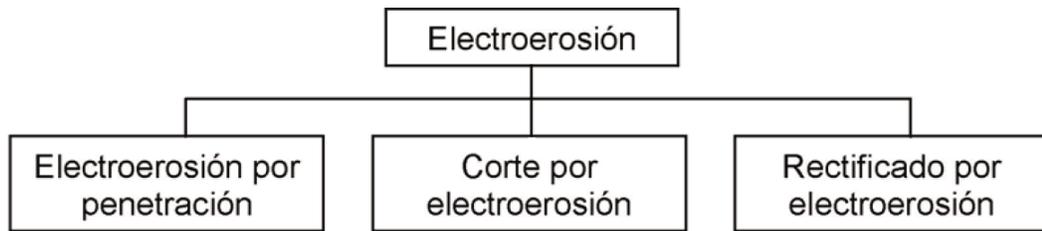
Durante la electroerosión se va efectuando en la pieza un proceso de copiado, a nivel microscópico de la forma del electrodo, lo que dará lugar a la obtención de un negativo exacto de éste, salvando, claro está, la longitud de las chispas, conocido como GAP, medida que habrá que tener en cuenta en el momento de la fabricación de los electrodos.

**Tabla 5.** Etapas que ocurren durante un proceso de electroerosión<sup>74</sup>.

Descripción de la etapa	Esquema
<p>El mecanizado por electroerosión se efectúa mediante el salto de chispas eléctricas entre dos electrodos sometidos a una tensión eléctrica y sumergidos ambos en un líquido dieléctrico. La intensificación del campo eléctrico tiene como efecto la ionización y polarización de las partículas</p>	
<p>Al estar ambos medios en un medio dieléctrico la tensión que se aplique a ambos ha de ser suficiente como para crear un campo eléctrico mayor a la rigidez eléctrica del líquido. De esta forma se da lugar a la formación del canal de descarga rodeado de iones positivos.</p>	
<p>Bajo la acción de este campo eléctrico, iones libres positivos y electrones se encontraran acelerando creando un canal de descarga que se vuelve conductor, punto donde salta la chispa. Ello provoca colisiones entre los iones (+) y los electrones (-), formando un canal de plasma</p>	
<p>Bajo el efecto de los choques se crean altas temperaturas en ambos polos y alrededor del plasma se forma una bola de gas. Las altas temperaturas a las que llegan los dos polos, van fundiendo y vaporizando el material de la pieza, mientras que el electrodo apenas se desgasta ligeramente. La corriente aumenta de 10 a 100 millares de amperios por segundo, alcanzando temperaturas de miles de grados en fracciones de segundo.</p>	
<p>El resultado de la intensa acción térmica es la fusión de un reducido volumen de material. Al final de la descarga, el dieléctrico arrastra los residuos existentes en el cráter y enfría la superficie, impidiendo la conducción de calor hacia el interior del metal. Luego el ciclo correspondiente la siguiente descarga da inicio.</p>	

**2.4.2 Tipos de mecanizado por electroerosión.** Distinguiendo según la forma del electrodo y según el movimiento relativo de éste con relación a la pieza, se pueden hacer la siguiente subdivisión dentro del concepto general de mecanizado por electroerosión.

<sup>74</sup> JUEZ, José, Op. Cit.,



La electroerosión por penetración se basa en el avance continuo, y servocontrolado, de un electrodo-herramienta que penetra en el electrodo-pieza en presencia de un líquido dieléctrico. Según la forma del electrodo y según la profundidad que se dé a las formas erosionadas en la pieza, se podrán obtener tanto formas pasantes como formas ciegas de geometrías complicadas. El líquido dieléctrico utilizado en penetración hoy en día es aceite mineral especial para erosión, y ciertas máquinas que funcionan con agua u otros líquidos.

La diferencia básica entre la electroerosión por hilo y la electroerosión por penetración es que la forma del electrodo no influye directamente en la forma de la pieza a obtener, ya que lo único que se pretende es realizar un corte en la pieza y no obtener una copia con la forma del electrodo. En este tipo de electroerosión hay que destacar que el electrodo tiene forma de hilo. En este tipo de electroerosión, el líquido dieléctrico habitualmente utilizado es el agua des-ionizada y el hilo es de diámetro pequeño, normalmente de 0,25 o 0,3 [mm].

El rectificado por electroerosión se da con un movimiento de rotación del electrodo, con lo que el comportamiento se asemeja a una operación de rectificado convencional, pero el arranque de material se realiza mediante descargas eléctricas, sin contacto directo entre electrodo y pieza.

**2.4.3 Algunos factores que influyen en la electroerosión.** El tipo de impulsos, así como la potencia y energía de los mismos son factores que influyen en los resultados obtenidos del proceso.

Se denomina impulso a la tensión aplicada a ambos electrodos durante un tiempo determinado y pueden ser clasificados como impulso de vacío y arco voltaico.

El impulso vacío puede ocurrir cuando el gap (distancia entre electrodos) se hace demasiado grande, porque el servo no lo ha mantenido constante y se produce un impulso en el cual no hay descarga eléctrica. Este tipo de impulso no es erosivo, y si se dan muchos impulsos de este tipo baja el rendimiento de la máquina.

Cuando el gap se hace demasiado pequeño, sin llegar a tocarse los electrodos, se produce un arco voltaico. Entonces, si la tensión de descarga ( $U_f$ ) es menor de 20 V, se forman arcos voltaicos, en los que la intensidad no es controlable. El servo sistema de control tiene como misión mantener el gap en una distancia tal, que la tensión de descarga quede fijada en un valor óptimo que está en función del tipo de máquina y del material del electrodo y la pieza.

Si no se produce descarga (impulso vacío) el servo sistema de control debe reaccionar rápidamente acercando los electrodos; si, por el contrario, se producen cortocircuitos o arcos voltaicos el servo sistema de control debe reaccionar rápidamente alejando los electrodos.

Por otra parte, la energía de los impulsos durante el proceso de electroerosión depende de los parámetros eléctricos elegidos. Sin embargo, dado que durante la erosión existen una multitud de factores que influyen en el proceso y hacen que éstos disten mucho de ser óptimos.

La rugosidad superficial obtenida en procesos de mecanizado por electroerosión es de tipo multidireccional. Esta depende del tiempo de impulso, el nivel de intensidad

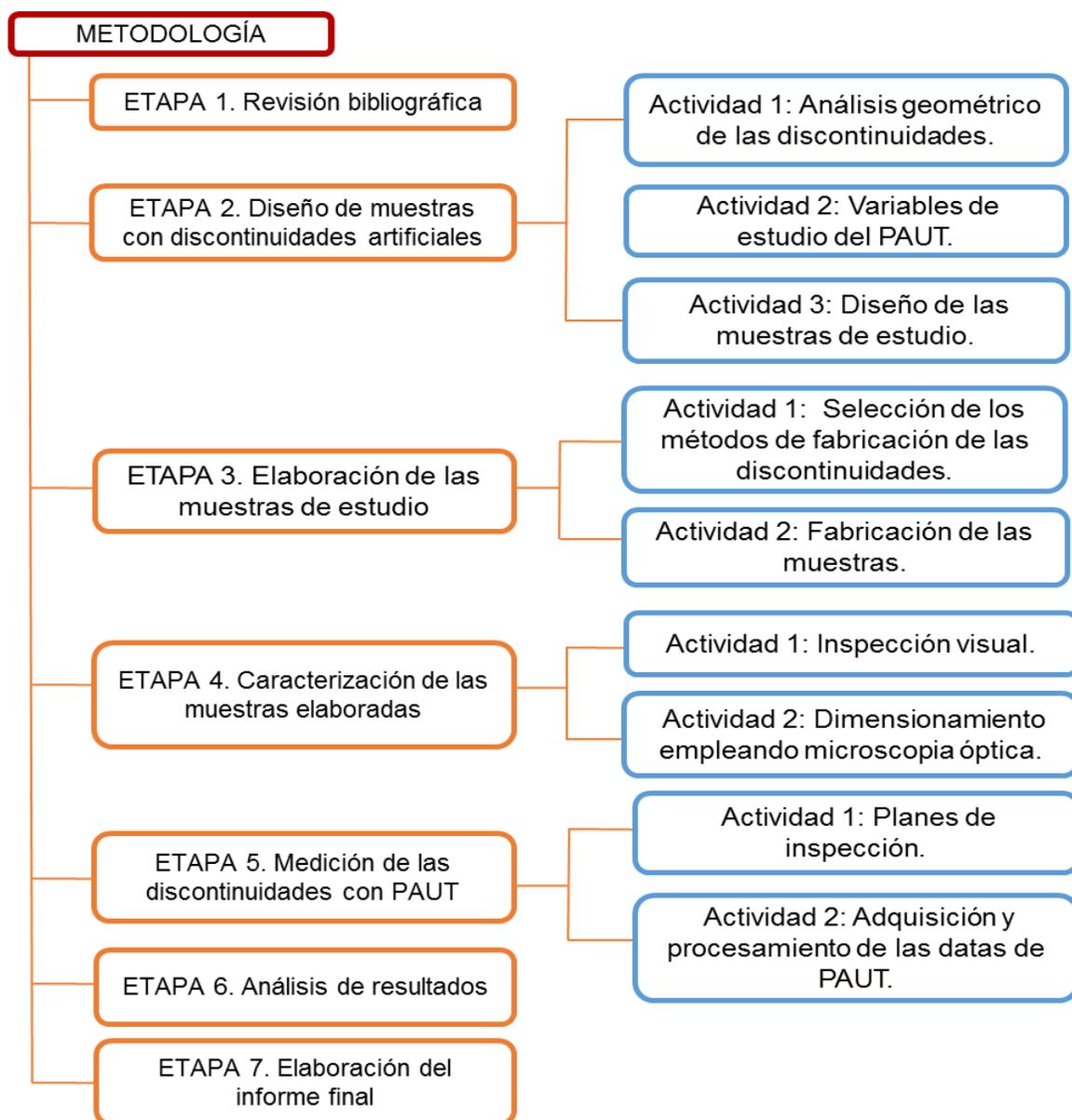
y la pareja de materiales de electrodo y pieza, aumentando con el tiempo de impulso y nivel de intensidad.

El arranque de material crece, al crecer el tiempo de impulso hasta que llega a un máximo a partir del cual decrece. Para tiempos de impulsos cortos, los desgastes son grandes y disminuyen al aumentar el tiempo de impulso hasta llegar a valores muy pequeños y tanto el gap como la rugosidad aumentan al aumentar el tiempo de impulso.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 3 se presentan las siete (7) etapas de la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de la presente investigación: Seguidamente se describen cada una de ellas.

**Figura 3.** Esquema de la metodología del proyecto.



### 3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se revisaron diferentes recursos bibliográficos con énfasis en las diferentes características geométricas de los defectos planares que se presentan en los materiales metálicos. Además, se revisaron los procesos de fabricación para la generación de las diferentes discontinuidades en las muestras a elaborar. Igualmente, se estudiaron las variables de PAUT. Esta información fue la base para el diseño de las muestras con discontinuidades, su elaboración y el posterior análisis de resultados. A continuación en la tabla 6 se presentan las investigaciones y normas de mayor trascendencia relacionados con el presente proyecto de investigación.

**Tabla 6.** Estado del arte

ESTADO DEL ARTE		
AUTORES	TÍTULO	RESULTADOS ENCONTRADOS
<b>Paritosh y Col.</b> <sup>75</sup>	“Characterization of planar flaws by synthetic focusing of sound beam using linear arrays”.	Dificultad para dimensionar ranuras con los ángulos de inclinación mayores y menores, detectando todas las discontinuidades fueron identificadas. El proceso de mecanizado fue por electroerosión.
<b>Souad Bannouf y Col.</b> <sup>76</sup>	“Simulation study to improve the detection of planar defects located under shrinkage cavities”.	Mediante simulación se identificaron los ecos ultrasónicos de la esquina de la discontinuidad con baja amplitud de las señales. Recomienda validar resultados experimentalmente y agregar discontinuidades volumétricas.
<b>Satyanaraya y col</b> <sup>77</sup>	“Sizing Cracks in Power Plant Components Using Array Based. Journal of nondestructive testing”.	Implementó procesamiento de señales mediante "Finite Difference Domain Time" y obtuvo exactitud del 98%, además, un aumento en la amplitud de las señales de hasta 60% en la visualización A-scan.
<b>Kemppainen y Col</b> <sup>78</sup>	“Effect of stress on ultrasonic response in detection and sizing of cracks”.	El estudio lo oriento en determinar a partir de que tamaño se detectan las grietas y concluyo que una grieta de 0,2 [mm] tiene una probabilidad de 0% en detectarse y una probabilidad alta de detectarla a partir de 1 [mm].

<sup>75</sup> Paritosh, Op. Cit.,

<sup>76</sup> Souad Bannouf, Op. Cit.,

<sup>77</sup> Satyanaraya, Op. Cit.,

<sup>78</sup> Kemppainen, Op. Cit.,

<b>Poguet y Col<sup>79</sup>.</b>	“A contribution to outer surface crack height sizing by paut”	Con la investigación concluyen algunos parámetros de PAUT con los que se obtienen mejores resultados en el dimensionamiento de grietas.
<b>Wirdelius y Col<sup>80</sup>.</b>	“Study of defecto characteristics essential for NDT testins methods ET, UT and RT”.	Reporto que las discontinuidades planares con 2 mm de profundidad presentan dificultad para dimensionarlas.
<b>Ciorau y Col<sup>81</sup>.</b>	“A contribution to quantifying the sources of errors in paut”.	Registro tamaños de las discontinuidades inferiores al tamaño real.
<b>Jorma Pitkänen y col<sup>82</sup>.</b>	“Effect of Crack Opening on UT Response”.	la mayoría de los casos, la estimación del tamaño se ve afectada con variaciones de hasta 11 dB por el fenómeno de la “conversión de modo de la onda” cuando se pasa de una grieta abierta a una cerrada, y variaciones hasta de 14 dB cuando se inducen tensiones residuales sobre la zona de inspección
<b>Tim Armitt<sup>83</sup>.</b>	“A contribution to quantifying the sources of errors in paut”.	Los errores son agrupados con base a las limitaciones de los equipos, piezas de prueba, características de defectos, condiciones de inspección, concluyendo que las tolerancias de las variables antes mencionadas son muy estrechas para obtener errores menores de $\pm 0.5$ [mm].
<b>Jochen H y Col<sup>84</sup>.</b>	“Reliability considerations of NDT by probability of detection”	Realizar un proceso experimental para cada tipo de discontinuidad y elaborar, mediante conceptos estadísticos, curvas de probabilidad de detección de falla empleando patrones con discontinuidades artificiales y con discontinuidades reales conocidas.
<b>B. Dupont y Col<sup>85</sup>.</b>	“Characterization of small defects using total focusin method”.	Diferencias entre el tamaño real y el tamaño estimado con la reflexión de las ondas. La orientación del defecto, la geometría y la proximidad con otros defectos fueron parámetros influyentes en la amplitud de la señal.
<b>Edward Ginzel y Col<sup>86</sup>.</b>	“Phased-Array Resolution Assessment Techniques”.	Visualizar las ondas ultrasónicas en un material foto-elástico con propiedades acústicas similares a las del acero.

<sup>79</sup> Poguet, Op. Cit.,

<sup>80</sup> Wirdelius, Op. Cit.,

<sup>81</sup> Ciorau, Op. Cit.,

<sup>82</sup> Jorma Pitkänen, Op. Cit.,

<sup>83</sup> Tim Armitt, Op. Cit.,

<sup>84</sup> Jochen H, Op. Cit.,

<sup>85</sup> B. Dupont, Op. Cit.,

<sup>86</sup> Edward Ginzel, Op. Cit.,

<b>ASME<sup>87</sup>.</b>	Sec VIII-Div 2, párrafo 7.5.4. Sec VIII. Div 2, tabla 7.9.	Criterio de aceptación y rechazo.
<b>ASME B31.3<sup>88</sup>.</b>	CAPÍTULO VI.	Criterio de aceptación y rechazo.
<b>API 1104<sup>89</sup>.</b>	“Welding of pipelines and related facilities”	Criterio de aceptación y rechazo.

### 3.2 ETAPA 2: DISEÑO DE MUESTRAS CON DISCONTINUIDADES ARTIFICIALES

En esta etapa se llevaron a cabo tres actividades, a saber: Análisis geométrico de las discontinuidades, variables de estudio del PAUT, y diseño de las muestras. Seguidamente, se describe cada actividad:

**3.2.1 Actividad 1. Análisis geométrico de las discontinuidades.** En esta actividad se determinó la geometría, orientación, tamaño y morfología de las discontinuidades planares a fabricar y evaluar, a partir de dimensiones reales que se presentan en los materiales metálicos a nivel industrial y aquellas generadas artificialmente para procedimientos de calibración, investigación o capacitación empleando las técnicas de ultrasonido convencional y con arreglo de fases (ver sección 2,1 y 2,2). Se contemplaron además las exigencias de los códigos de fabricación ASME, AWS y API.

De acuerdo con lo anterior, para la presente investigación se determinó diseñar discontinuidades planares, con ángulos de orientación a 90° y 55° respecto a la

---

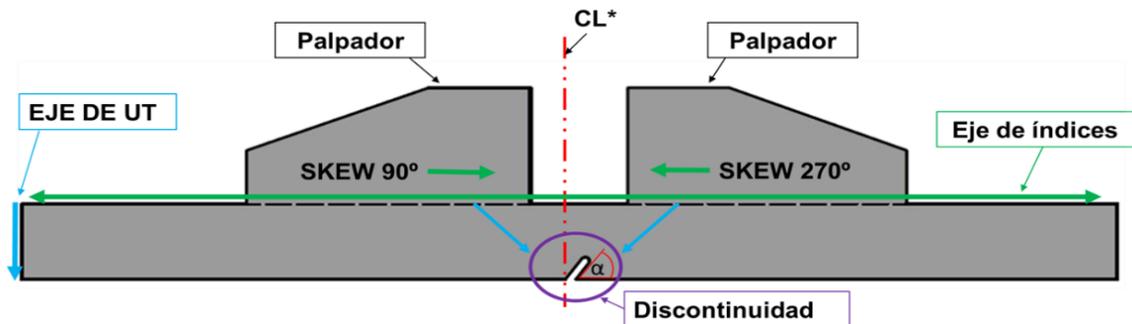
<sup>87</sup> ASME, Op. Cit.,

<sup>88</sup> ASME B31.3, Op. Cit.,

<sup>89</sup> American Petroleum Institute. Welding of pipelines and related facilities. Washington, API Publishing Services. API, 2013.

superficie de la muestra (ver figura 4). Las orientaciones anteriores permiten inspeccionar la discontinuidad con el haz ultrasónico incidente de manera perpendicular y paralelo a ésta, cuando se ubica el palpador por el lado izquierdo y lado derecho respectivamente (skew  $90^\circ$  y  $270^\circ$ ) como se observa en la figura 4. Para las discontinuidades a  $90^\circ$ , la inspección es realizada solo, por un lado, “skew”  $90^\circ$ , debido a que la incidencia del haz ultrasónico angular es igual independiente del “skew” con que se realice inspección. Los tamaños (profundidades) seleccionados para las discontinuidades fue de 2,5 [mm] y 5 [mm]; y por último se seleccionó la morfología de la punta “TIP” de la discontinuidad con forma plana y redondeada.

**Figura 4.** Esquema de la ubicación del palpador.



Con anterioridad se realizó la selección del material a utilizar, teniendo en cuenta los criterios técnicos, con base en la información analizada de artículos de investigación, y los siguientes aspectos: buena soldabilidad, microestructura homogénea, tamaño de grano fino, facilidad de adquirir a nivel comercial los bloques de calibración para ultrasonido, que tuviera un nivel alto de aplicación industrial y que los costos de adquisición no fueran elevados. El material seleccionado con las

características anteriores para la fabricación de las muestras mecanizadas y la soldada fue el acero de bajo carbono ASTM A36<sup>90</sup>.

**3.2.2 Actividad 2: Variables de estudio del PAUT.** En esta actividad se identificaron las variables de la técnica Phased Array que permitieron determinar las dimensiones externas de las muestras, las cuales fueron: rango de ángulos de refracción para las ondas transversales, cantidad o número de cristales activos con los patrones de escaneo sectorial y electrónico, tipo de onda longitudinal y/o transversal, desplazamiento máximo de la zapata en el eje de índice. Además, se tuvo en cuenta el espesor de las placas, de tal manera que la segunda reflexión del ultrasonido esté por fuera de la parte frontal o testa de la zapata en el rango de ángulos de inspección. Con base en esta información se determinaron las dimensiones externas mínimas de las muestras. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

**3.2.3 Actividad 3: Diseño de las muestras de estudio.** Para el diseño de las muestras también se tuvo en cuenta el equipo de PAUT y las recomendaciones técnicas de la norma ASTM E2700-14<sup>91</sup> y ASME Sección V<sup>92</sup>, además de los resultados obtenidos en las actividades anteriores. A partir de la información derivada, se diseñaron ocho muestras de estudio teniendo en cuenta el espesor, la distancia de barrido y de índices, así mismo las discontinuidades a inducir con su respectiva distribución, orientación, morfología y tamaño. También se consideró para el diseño, el alcance dimensional (tamaño mínimo alcanzado por el método de mecanizado) de la técnica de fabricación empleada para mecanizar las discontinuidades.

---

<sup>90</sup> American Society For Testing and Materials (ASTM), "ASTM A36 / A36M - 14: Standard Specification for Carbon Structural Steel", ASTM 2014.

<sup>91</sup> American Society For Testing and Materials (ASTM), "ASTM 2700 - 09: Standard Practice for Contact ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays", ASTM 2009.

<sup>92</sup> American Society Of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessels Code section V. Two Park Avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2013.

Con el fin de hacer el análisis de los resultados de manera adecuada y con base en la información obtenida se realizó un diseño experimental para determinar el número de muestras, empleando tres factores y dos niveles: El primer factor consiste en la inclinación de las discontinuidades respecto al haz ultrasónico refractado seleccionando dos niveles: el inferior que corresponde al caso donde el haz incide de manera perpendicular en la discontinuidad, obteniendo una reflexión total o especular del frente de onda (ver tabla 7) con una ubicación del palpador correspondiente a “skew” de 90°. Para la misma discontinuidad, al ubicar la sonda con “skew” 270°, el frente de onda incide de manera paralela a la discontinuidad, llevando a cabo la inspección con la inclinación de la indicación más desfavorable respecto al haz. (Ver tabla 7). Para el nivel superior la inclinación de la discontinuidad se diseñó a 90° respecto a la superficie de la muestra y se ubicó la sonda únicamente con “skew” 90°.

**Tabla 7.** Diseño de experimentos.

FACTORES	NIVELES	VALOR	VARIABLES RESPUESTA
Inclinación	Superior (+)	$\alpha = 90^\circ$	· Amplitud de las señales · Tamaño de las discontinuidades
	Inferior (-)	$\alpha = 55^\circ$	
Tamaño	Grande (+)	5 mm	
	Pequeño (-)	2,5 mm	
Morfología (punta de la discontinuidad)	Redondeada (+)		
	Plana (-)		

El segundo factor corresponde al tamaño de las discontinuidades seleccionando dos niveles: la discontinuidad pequeña con 2.5 [mm] de profundidad y grande con 5 [mm] de profundidad.

El tercer factor fue la morfología de la punta de la discontinuidad, determinando dos niveles: La forma plana y la forma redondeada como se observan en la tabla 7.

Para todos los factores las variables de respuesta fueron: la amplitud obtenida de las señales en la visualización A-scan y el tamaño obtenido de las discontinuidades

mediante PAUT. La combinación de factores y niveles arrojó un total de ocho (8) muestras a elaborar para el diseño de experimentos que se presenta en la tabla 8.

**Tabla 8.** Número de muestras.

Combinación de factores		Combinación de niveles		
		Inclinación	Tamaño	Morfología
1	Muestra 1	-	-	-
a	Muestra 2	+	-	-
b	Muestra 3	-	+	-
c	Muestra 4	-	-	+
ab	Muestra 5	+	+	-
bc	Muestra 6	-	+	+
ac	Muestra 7	+	-	+
abc	Muestra 8	+	+	+

Con base en esto se diseñaron las ocho muestras de estudio cuyas características se presentan en el capítulo análisis de resultados (en la figura 15).

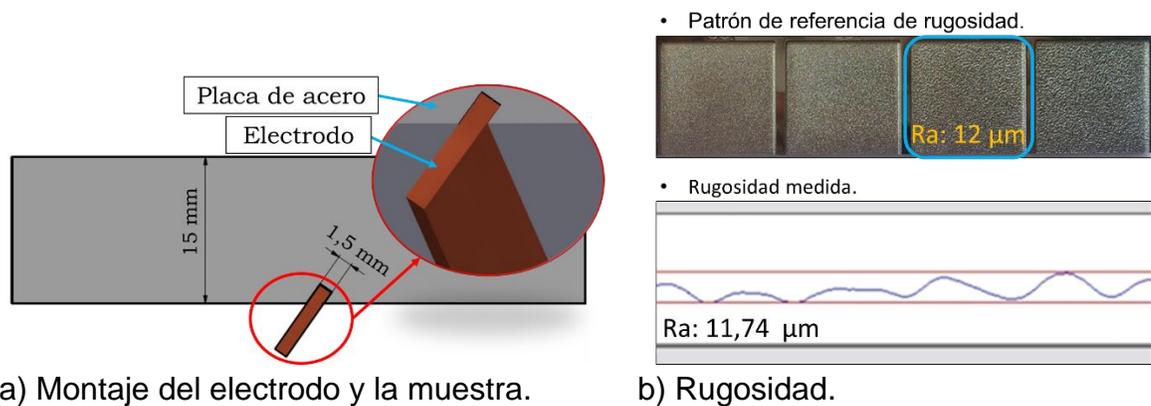
### 3.3 ETAPA 3: ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ESTUDIO

En esta etapa se llevaron a cabo dos actividades: Selección de los métodos de fabricación de las discontinuidades y fabricación de las muestras. En seguida, se describen cada una de ellas.

**3.3.1 Actividad 1: Selección del método de fabricación de las discontinuidades.** A continuación, se presentan las técnicas seleccionadas tanto para la fabricación de las muestras con discontinuidades artificiales, como para la generada mediante proceso de soldadura.

**Discontinuidades artificiales.** Con base en la facilidad de mecanizar las discontinuidades tipo ranura, la disponibilidad local, y los costos de manufactura, se seleccionó el método de fabricación mediante electroerosión por penetración, para la elaboración de las discontinuidades en las muestras de estudio diseñadas, como se observa en la figura 5a. Se tuvieron en cuenta las tolerancias dimensionales, el tiempo de fabricación y los tamaños mínimos alcanzados por el método, con una rugosidad esperada entre 12 y 15 [ $\mu\text{m}$ ]. En la figura 15b se observa en un patrón de referencia resaltando la rugosidad esperada y en la parte inferior la rugosidad medida por medio del microscopio óptico en una muestra mecanizada.

**Figura 5.** Esquema del proceso de mecanizado.



Las tolerancias dimensionales del mecanizado por electroerosión con las condiciones de operación seleccionadas son de hasta 0.64 [mm]. Los tiempos de erosión requeridos, una vez elaborados los electrodos y los montajes se estimaron de 3 y 6 horas para las muestras con discontinuidad de 2.5 [mm], y las de 5 [mm] respectivamente. En cuanto al tamaño mínimo, la dimensión crítica es el ancho correspondiente a 1 [mm] sin el “GAP” (distancia entre electrodo y pieza) y la punta “TIP” de la discontinuidad. Sin embargo, el electrodo presentó un desgaste leve en los vértices de la morfología plana; estos radios se midieron con valores de hasta de 0.257 [mm].

**Discontinuidad real.** Esta muestra con una discontinuidad real de proceso de soldadura permitió determinar la relación con los resultados obtenidos en las muestras mecanizadas con electroerosión, tomando como referencia las mediciones obtenidas en la caracterización dimensional empleando el microscopio óptico marca HIROX modelo KH7700.

La muestra con discontinuidad real se elaboró mediante soldadura por arco con electrodo metálico revestido SMAW, partiendo de resultados obtenidos en trabajos de grado realizados en el Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales GIMAT<sup>93</sup>.

**3.3.2 Actividad 2. Fabricación de las muestras.** Inmediatamente se presentan las actividades relacionadas con la fabricación de las muestras mecanizadas y soldada.

**Muestras mecanizadas.** Se realizaron las actividades de preparación de las placas de acero, iniciando con el corte a escuadra, el cual se hizo mediante oxicorte automatizado (ver figura 6a). Seguidamente se realizó el pulido y preparación de las placas de acero, de manera que estas no presentaran rebabas o contornos irregulares (ver figura 6b), además, estas fueron almacenadas en desecador como se presenta en la figura 6c, para evitar la posterior formación de capas de óxido sobre la superficie.

Luego para cada muestra se diseñó y elaboró un electrodo, obteniendo los ocho electrodos para el proceso de electroerosión correspondiente a las discontinuidades respectivas; debido a que los electrodos presentan desgaste solo se utilizaron para generar un mecanizado. La forma específica de cada electrodo fue obtenida

---

<sup>93</sup> Chinome, Ivan, diego Pabon, Luz Quintero, y Julian Herrera. Elaboracion de muestras soldadas en T empleando tubería, para su evaluación mediante ensayos no destructivos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2015.

mediante corte por hilo con las características dimensionales diseñadas (figuras 6d, 6e y 6f). Finalmente se realizó la electroerosión empleando el equipo marca YAWJET modelo Y-505 (figura 6g), garantizando que todas las muestras fueran mecanizadas con las condiciones de operación presentadas en la tabla 9.

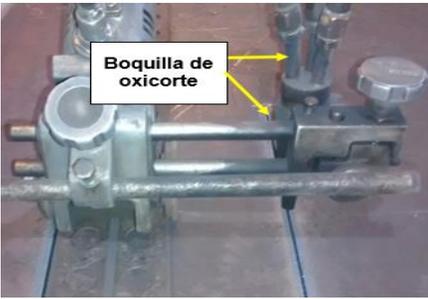
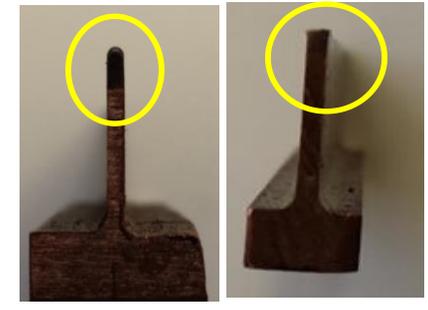
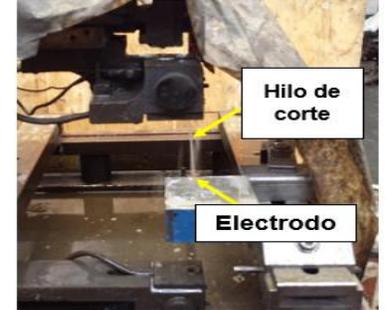
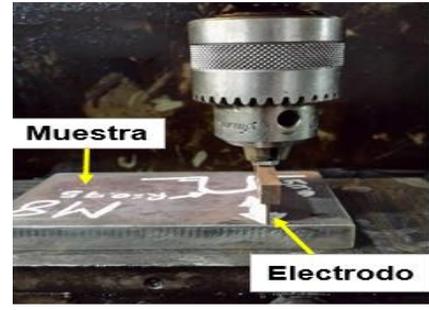
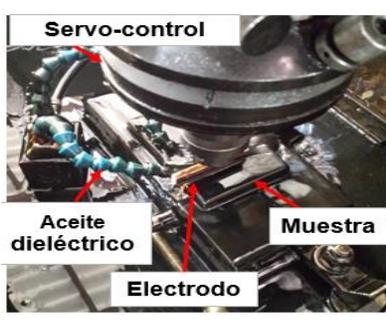
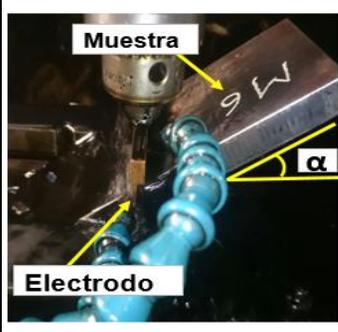
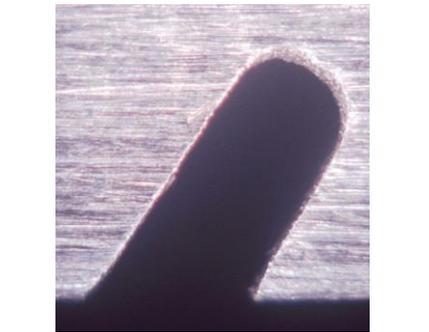
**Tabla 9.** Condiciones de operación del equipo YAWJET.

CONDICIONES DE OPERACIÓN YAWJET Y-505			
Distancia entre la pieza el electrodo "GAP" [mm]	0,1 - 0,15	Voltaje [V]	20 - 140
Amperaje [Amp]	0,5 - 1	Velocidad de avance [mm/seg]	0,014

Para los mecanizados se puso la muestra metálica sobre la mesa del equipo, nivelándola y ubicándola con el respectivo ángulo según correspondiera, tal y como se observa en las figuras 6j y 6k. Las muestras se sujetaron mediante un electroimán disponible en el equipo.

Antes de iniciar el mecanizado, el equipo fue calibrado dimensionalmente midiendo la placa, el electrodo, las distancias de separación y su ubicación (ver figura 6i), esta información fue almacenada en el equipo para control del servo-motor, realizando el mecanizado de forma automatizada; durante todo el proceso se garantizó el suministro de aceite dieléctrico sobre el electrodo.

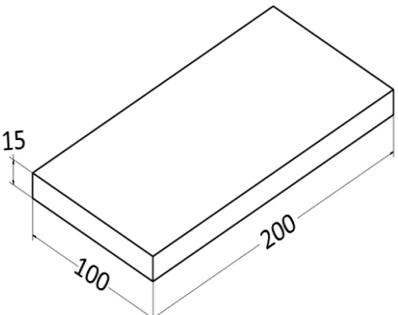
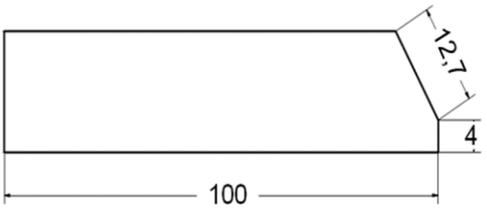
**Figura 6.** Procesos de elaboración de las muestras.

			
<p>a) Corte de las muestras</p>	<p>b) Aspecto final de las muestras</p>	<p>c) Ubicación de las muestras</p>	<p>d) Electrodo (vista frontal)</p>
			
<p>e) Electrodo (vista lateral)</p>	<p>f) Corte por hilo del electrodo</p>	<p>g) Equipo YAWJCT</p>	<p>h) Montaje del mecanizado</p>
			
<p>i) Calibración dimensional</p>	<p>j) Electro-erosión discontinuidad de inclinación superior</p>	<p>k) Electro-erosión discontinuidad de inclinación inferior</p>	<p>l) Ejemplo de discontinuidad mecanizada</p>

**Muestra soldada.** Para la obtención de la muestra soldada se elaboró el procedimiento de soldadura presentado en la tabla 10, donde se tuvo en cuenta el diseño de una junta que permitiera obtener falta de penetración. Dicha junta presentó una separación de raíz de 1.2 [mm] y una altura del hombro de la soldadura de 4 [mm], facilitando la formación de este defecto durante el proceso de soldadura, (ver tabla 10). El material base fue ASTM A36 con espesor nominal de 15 mm, igual al empleado para fabricar las muestras mecanizadas. Para este material se seleccionaron los electrodos con base en la especificación AWS A5.1, utilizando el electrodo E6010 de 3.175 [mm] (1/8 de pulgada) de diámetro para el pase de raíz y un electrodo E 7018 de 3.175 [mm] (1/8 de pulgada) de diámetro, para los pases de relleno y de presentación. Con base en la información anterior se elaboró el procedimiento de soldadura, el cual se presenta en la tabla 10.

Para la elaboración de la muestra soldada se realizó el corte de las placas con dimensiones de 100 [mm] por 200 [mm] (ver figura 7a) mediante oxicorte, estas dimensiones se determinaron teniendo en cuenta las distancias requeridas por los palpadores empleados por la técnica de Phased Array. Una vez cortadas, se realizó la preparación de los biseles empleando una pulidora manual con disco abrasivo, obteniendo las dimensiones establecidas en la figura 7b. Finalmente, se realizó el montaje punteando a lado y lado de la junta para asegurar la distancia entre biseles y el alineamiento, como se muestra en la figura 7c. La ejecución de la soldadura inició con el pase de raíz, empleando una intensidad de 120 [Amp] para garantizar la fusión en la raíz y obtener penetración completa de la soldadura. Seguidamente, a 60 milímetros aproximadamente, el proceso se detuvo y se continuó soldando con una intensidad de 80 [Amp] para que no fundiera la totalidad del bisel, obteniendo la falta de penetración mostrada en la figura 7d.

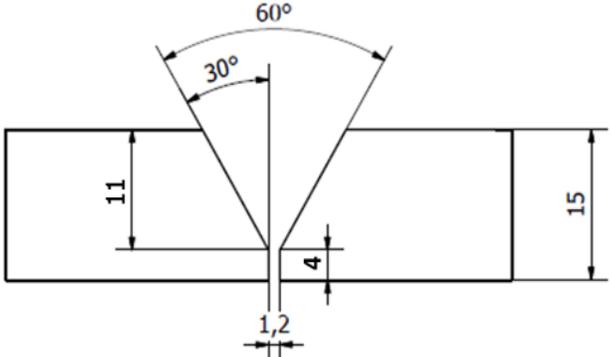
**Figura 7.** Preparación de la junta.

<b>PREPARACIÓN DE LA JUNTA</b>	
	
<b>a. Diseño de las placas.</b>	<b>b. Diseño del bisel.</b>
	
<b>c. Punteo de las placas.</b>	<b>d. Soldadura final en el cordón de raíz.</b>
Dimensiones en milímetros	

### 3.4 ETAPA 4: CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ELABORADAS

En esta etapa se llevó a cabo la caracterización física y físico-química del material base y el dimensionamiento de las discontinuidades con microscopía óptica cofocal. A continuación, se explica cada actividad.

**Tabla 10.** Procedimiento de soldadura para falta de penetración.

QW - 482 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA WPS								
Nombre de la compañía: Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Industrial de Santander								
Especificaciones del procedimiento de soldadura N°01				Fecha: 05/08/2016				
Proceso de soldadura: Por arco eléctrico revestido - SMAW				Tipo: Manual				
 <p style="text-align: center;">DISEÑO DE LA JUNTA</p>				<p>JUNTAS (QW - 402)                      Diseño de la junta: Junta a tope bisel en "V"                      separación de raíz: 1,2 [mm]                      Respaldo: SI _ No X                      Material de respaldo                      Tipo: N.A.</p> <p>TÉCNICA (QW - 410)                      Cordoneado y oscilación máxima de 2,5 veces el diámetro del electrodo.                      Limpieza inicial y entre pasadas con cepillado manual y esmerilado con grata de alambre trenzado.</p>				
<p>METALES BASE (QW - 403)</p> <p>Especificación: Acero al carbono ASTM A36                      Tipo: Lámina                      Tamaño nominal: 15mm</p>				<p>METALES DE APORTE (QW-404)</p> <p>Especificación: ASME SFA. 5.1/5.5                      Clase AWS No. E-6010 y E-7018                      Diámetro: 1/8"                      Forma: Varilla</p>				
<p>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW - 409)</p> <p>Para electrodo: E-6010                      Corriente: Continua, Polaridad: inversa/positiva                      Intensidad: 60A- 90A Tensión 18V - 24V</p> <p>Para electrodo: E-7018                      Corriente: Continua, Polaridad: inversa / positiva                      Intensidad: 100 A - 120 A Tensión 20 V - 24 V</p>				<p>PRECALENTAMIENTO (QW - 406)</p> <p>Temperatura de precalentamiento: N.A.                      Temperatura entre pasadas máxima: N.A                      Mantenimiento del precalentamiento: N.A</p>				
Pases de soldadura	Proceso	Metal de relleno		Corriente		Rango de tensión [Volt]	Rango de velocidad de avance	Observaciones
		Clase	Diámetro	Tipo de polaridad	Rango de intensidad [Amp]			
1	SMAW	6010	1/8"	CD-PD	70-90*	18-24	0,053 in/ s	
1-2-3-4	SMAW	7018	1/8"	CD-PI	90-110	20-24	0,074 in/s	
5-6	SMAW	7018	1/8"	CD-PI	100-120	20-24	0,057 in/s	
<p>* En la zona del cordón con falta de penetración se aplicó una intensidad de corriente en el rango de 70-90 amperios en el pase de raíz. Para lograr penetración completa se aplicó una intensidad de 120 amperios.</p>								

**3.4.1 Actividad 1: Caracterización física, química y metalográfica.** La caracterización física consistió en la verificación mediante inspección visual de la integridad superficial, inspección con ultrasonido industrial, empleando un equipo de análisis de fallas marca Krautkramer modelo USM 35XS, con palpador de 5 MHz y un diámetro de ½" [pulg], con ondas longitudinales (haz normal), para verificar la ausencia de posibles laminaciones generadas durante el laminado en caliente y la obtención del espesor de las placas de acero. Finalmente, se realizaron mediciones de dureza según ASTM E18-14<sup>94</sup>.

La caracterización química se realizó por medio del ensayo de espectrometría de emisión óptica (ensayo de chispa), determinando cuantitativamente los elementos presentes. Con base en los resultados anteriores se comprobó que el material cumpliera con los requisitos establecidos en ASTM A36. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

La caracterización metalográfica se realizó siguiendo las especificaciones de preparación de las muestras y micro-ataque presentadas en ASTM E3-11<sup>95</sup> y ASTM E407-15<sup>96</sup>. Determinando la microestructura del acero en estudio.

**3.4.2 Actividad 2: Dimensionamiento, empleando microscopía óptica.** Mediante microscopía óptica cofocal, se llevó a cabo el dimensionamiento de las discontinuidades planares generadas por electroerosión y soldadura. Lo anterior permitió establecer los valores de referencia para comparar con los resultados obtenidos mediante la técnica de ultrasonido con arreglo de fases PAUT.

---

<sup>94</sup> American Society For Testing and Materials (ASTM), "ASTM E 18 - 16: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials", ASTM 2016.

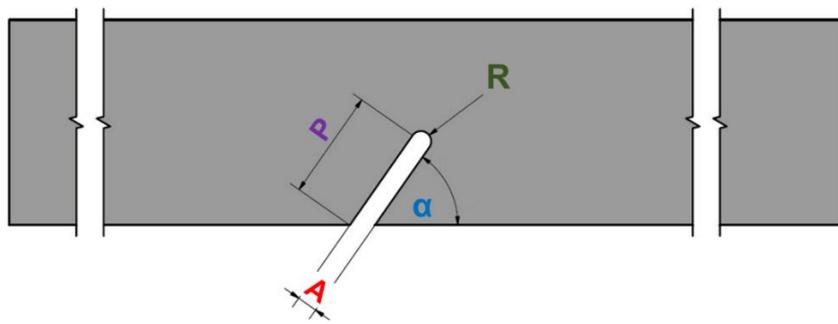
<sup>95</sup> American Society For Testing and Materials (ASTM), "ASTM E 3 - 11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", ASTM 2011.

<sup>96</sup> American Society For Testing and Materials (ASTM), "ASTM E 3 - 15: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys", ASTM 2015.

Las mediciones se realizaron en el microscopio marca HIROX, modelo KH-7700 empleando el lente MXF-10C y los objetivos OL-35 y OL-140, con aumentos entre 30x y 540x. Las características obtenidas de la discontinuidad fueron: la profundidad **P**, el ancho **A**, el radio de curvatura del fondo **R**, los ángulos de inclinación  $\alpha$  y la rugosidad de la superficie erosionada de las discontinuidades **Ra** (ver figura 8). En la figura 9 se presenta el montaje realizado para tomar las mediciones. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

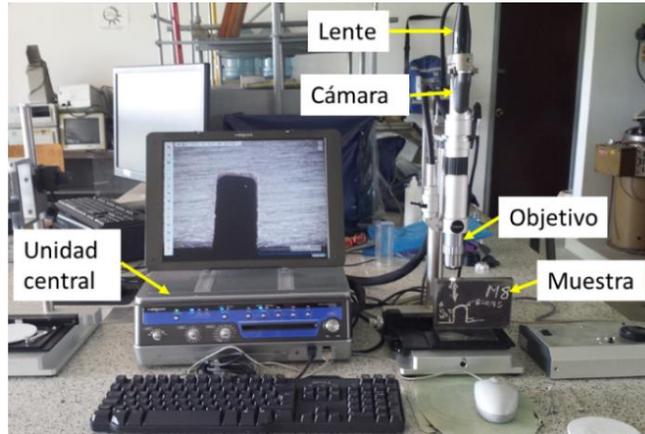
En la figura 8 se presentan los parámetros dimensionales tenidos en cuenta para el dimensionamiento mediante microscopía óptica. Previo a la toma de datos se verificó la correcta configuración del equipo en lo que refiere a lente objetivo y nivel de magnificación (aumentos) con el fin de obtener las dimensiones reales de la discontinuidad.

**Figura 8.** Parámetros medidos en el microscopio óptico.



Para el caso de la muestra soldada, la medición consistió en realizar reconstrucciones en 3D con el fin de conocer la forma y las dimensiones. Es preciso aclarar que esta reconstrucción es la representación puntual de un corte transversal del defecto.

**Figura 9.** Montaje de las muestras en el microscopio.



### **3.5 ETAPA 5: MEDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES CON PAUT**

Se realizó la medición de las discontinuidades planares empleando ultrasonido con arreglo de fases PAUT, con el fin de generar los datos para su posterior análisis. A continuación, se presentan los detalles de las actividades realizadas:

**3.5.1 Actividad 1: Planes de inspección:** Se diseñaron planes de inspección con diferentes arreglos de fases teniendo en cuenta los parámetros necesarios para adquisición de los datos por PAUT, tales como: resolución angular, la profundidad de focalización para el escaneo sectorial S-scan, y para el escaneo electrónico E-scan la apertura virtual del palpador y el paso o salto de elemento. Además, para los dos tipos de escaneo se emplearon ondas longitudinales y transversales. Los parámetros indicados en la tabla 11 se mantuvieron constantes para todos los planes de inspección.

Con el fin de realizar la menor cantidad de barridos y reducir la influencia o cambios entre diferentes barridos, se configuró el equipo en la opción multigrupo, cargando la mayor cantidad de leyes focales que puedan ser ejecutadas simultáneamente.

**Tabla 11:** Parámetros constantes de operación del equipo

PARÁMETROS CONSTANTES DE OPERACIÓN			
<b>Energía de la onda</b>	40 Volt	<b>Filtro de video</b>	Activo
<b>Filtro pasa banda</b>	4,8 MHz	<b>Rechazo</b>	0%

Para obtener la profundidad de focalización se realizaron los cálculos del campo cercano efectivo para los planes de inspección empleados, definiendo la máxima profundidad que puede ser empleada para la adquisición de resultados. La focalización la realiza electrónicamente el calculador de leyes focales del equipo. El campo cercano efectivo se dedujo a partir de la ecuación 1<sup>97</sup>.

$$N_{\text{eff}} = \frac{K \left( \frac{L_s \cos \beta}{\cos \alpha} \right)^2 f}{4 v_{pp}} - \frac{L_{\text{cuña}} v_{\text{cuña}}}{v_{pp}} \quad (1)$$

- $N_{\text{eff}}$ : Campo cercano efectivo.
- $f$ : Frecuencia de la sonda **[5MHz]**.
- $L_s$ : Apertura virtual **[9.6 mm]**.
- $\alpha$ : ángulo de incidencia.
- $\beta$ : ángulo de refracción.
- $v_{pp}$ : Velocidad del sonido en la pieza de prueba **[3250 m/s]**
- $L_{\text{cuña}}$ : Longitud del UT en la cuña.
- $K$ : Factor de conversión de campo cercano **[1.35]**.
- $v_{\text{cuña}}$ : Velocidad del sonido en la cuña **[2320 m/s]**

Para el caso particular de la investigación, en el escaneo sectorial, el campo cercano efectivo fue de 13.31 [mm] con base en un ángulo de refracción de 65°, y ángulo de incidencia de 40°.

<sup>97</sup> DANIEL, Kass, MOLES, Michael y NELLIGAN, Tom, Op. Cit.

**3.5.2 ACTIVIDAD 2: Adquisición y procesamiento de los datos de PAUT.** Para la adquisición de los datos de las discontinuidades inducidas, se emplearon los arreglos de fases y patrones de escaneo previamente diseñados, obteniendo los datos a través de la técnica ultrasónica pulso-eco de manera semiautomática, con ayuda de un “encoder”. Estos datos fueron guardados y procesados mediante el software OmniPC, obteniendo registros de manera visual y cuantitativa de cada discontinuidad.

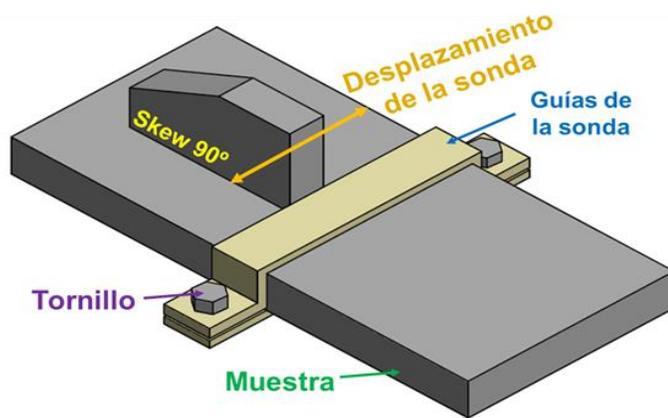
Con el fin de garantizar la ubicación y desplazamiento adecuado de la sonda sobre el eje de inspección (paralelo a la discontinuidad), con una distancia fija en el eje de índices, se diseñó una guía de manera que ésta pudiera ser sujeta a la muestra. En la figura 10 se observa el montaje respectivo para la adquisición de los datos. Todos los planes de inspección fueron implementados en el OMNISCAN, con la opción multi-grupo, de manera que en un solo barrido fueron adquiridos los datos correspondientes a los planes de inspección que ejecutaba simultáneamente el equipo.

Las muestras M1, M3, M4 y M6, corresponden a la inclinación inferior ( $55^\circ$ ), fueron inspeccionadas con “skew”  $90^\circ$  y  $270^\circ$ . Las muestras M2, M5, M7 y M8, con inclinación superior ( $90^\circ$ ) fueron inspeccionadas solo con “skew”  $90^\circ$ , debido a que los resultados son independientes del “skew” por el que se realice la inspección. En todas las muestras y para todos los planes de hizo una repetición de la inspección, obteniendo dos resultados, tomando como resultado final el promedio de ellos.

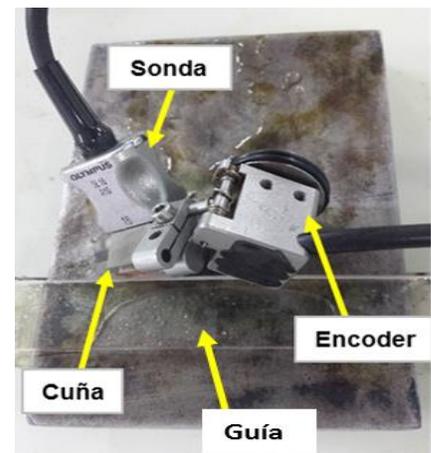
El acoplante empleado fue carboximetil-celulosa CMC, logrando una viscosidad media a partir de la adición de 12 gramos de CNS por litro de agua. El acoplante fue comparado con aceite monogrado obteniendo el mismo resultado. El acoplante se seleccionó siguiendo las características exigidas por el código ASME sección V

artículo 23<sup>98</sup>, donde la capa de éste entre la unidad de escaneo y la superficie a inspeccionar, debe asegurar la transmisión de la onda hacia el interior del material, para esto se requiere que esté libre de impurezas, burbujas o elementos químicos que puedan deteriorar el material en estudio. Con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados, se hicieron múltiples barridos en las muestras hasta lograr resultados con variaciones menores al 5% disminuyendo al máximo la influencia subjetiva en los resultados.

**Figura 10.** Adquisición de los datos de PAUT.



a) Ubicación del palpador sobre la guía.



b. Montaje experimental.

Seguidamente, se describe el procedimiento de inspección empleado para la adquisición adecuada de los datos.

### Procedimiento de inspección

El procedimiento de inspección se desarrolló con el fin de obtener los datos e información correspondientes a las variables ultrasónicas y geométricas de las discontinuidades a estudiar en el presente proyecto de investigación.

<sup>98</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.

Posteriormente. Se describen los pasos y requisitos que se tuvieron en cuenta para realizar los ensayos sobre las muestras diseñadas en las etapas anteriores. El equipo con el que se realizaron las mediciones pertenece a la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS con las características presentadas en la tabla 12 y figuras 11a y 11b.

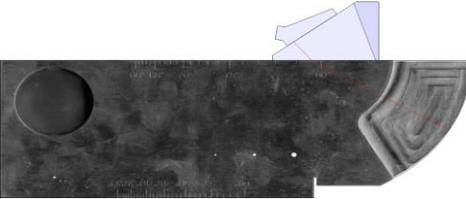
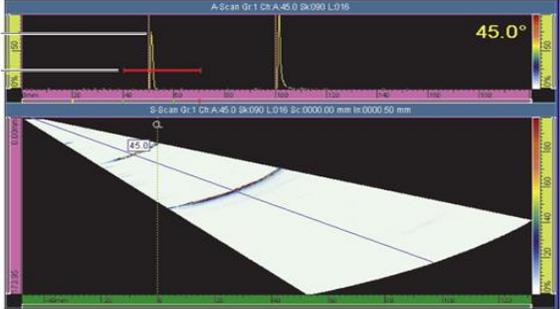
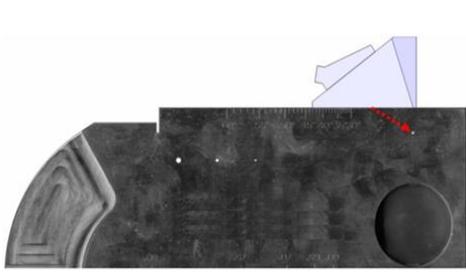
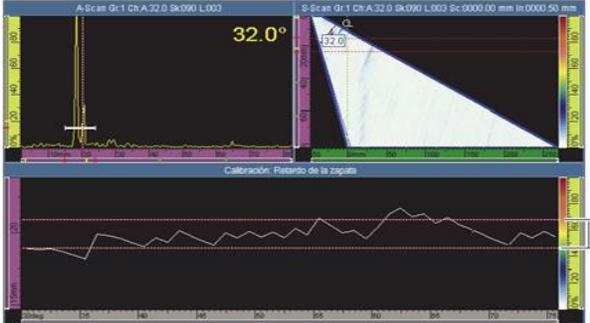
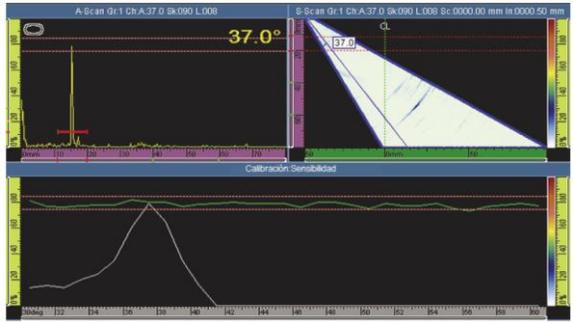
**Tabla 12.** Equipo empleado.

<b>EQUIPO Y ACCESORIOS DE ULTRASONIDO</b>			
<b>Equipo</b>	OLYMPUS OMNISCAN MX2	<b>Módulo</b>	OMNI-M-PA 16-64
<b>Software</b>	MXU-4.3R1	<b>Multigrupo</b>	SI
<b>Palpador</b>	5L16-A10	<b>Palpador</b>	5L64-A12
<b>Cuña</b>	SA10-N55S; SA10-0L	<b>Cuña</b>	SA12-N55S ; SA12-0L
<b>Encoder</b>	12 steps/mm	<b>Software</b>	OMNIPC 4.3R1

Previo a la calibración, mediante el asistente del equipo se configuraron las leyes focales, los patrones de barrido y los desplazamientos con los planes de inspección indicados previamente. Lo anterior permitió simular gráficamente la muestra con el haz ultrasónico, verificando el cubrimiento de la zona de interés.

*Calibraciones:* Se realizaron las calibraciones de velocidad del sonido, retardo de zapata, sensibilidad, construcción de la curva TCG y la distancia recorrida por el codificador o “encoder” con base en los requerimientos técnicos indicados en ASME sección V artículo 4 y el apéndice mandatorio 5. Para la calibración de velocidad se empleó un bloque IIW tipo 1 del mismo material seleccionado para las muestras, ubicando el palpador como se observa en la figura 11c y 11d. La calibración del retardo de zapata permitió definir la posición cero de entrada de los haces ultrasónicos a la pieza, empleando un reflector tipo barreno como se observa en la figura 11e y 11f.

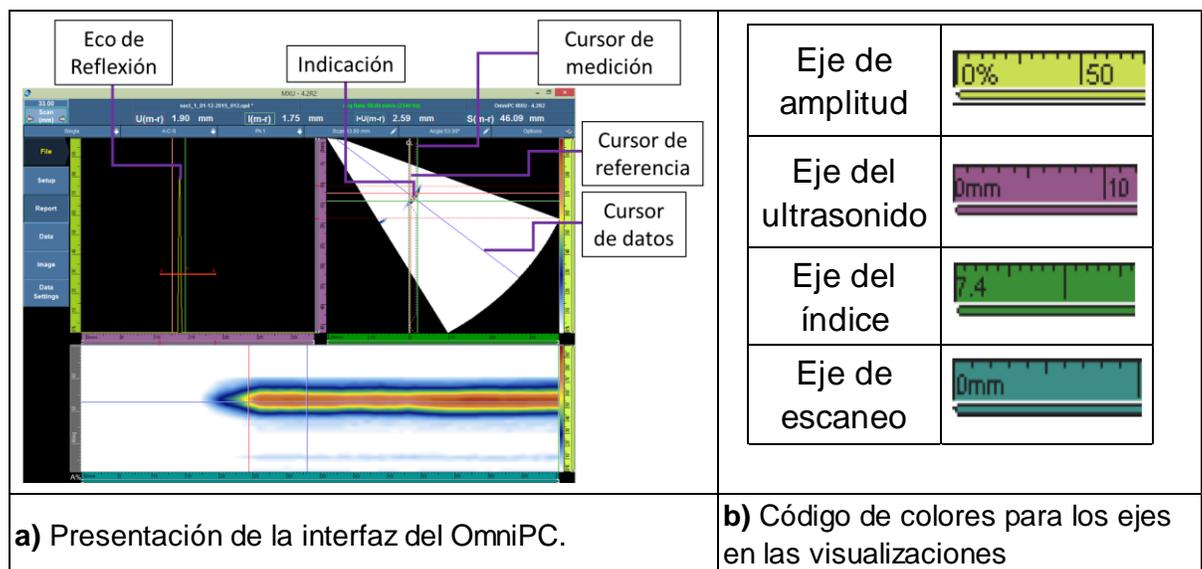
**Figura 11.** Procedimiento de calibración.

	
<p><b>a) OMNISCAN MX2.</b></p>	<p><b>b) Palpadores.</b></p>
	
<p><b>c) Calibración de velocidad.</b></p>	<p><b>d) Visualizaciones en pantalla.</b></p>
	
<p><b>e) Calibración de retardo de zapata y sensibilidad.</b></p>	<p><b>f) Visualizaciones en pantalla de la calibración del retardo de zapata.</b></p> 
<p><b>e) Calibración de retardo de zapata y sensibilidad.</b></p>	<p><b>g) Visualizaciones en pantalla para la calibración de sensibilidad.</b></p>

Seguidamente se normalizó la ganancia para todas las leyes focales, obteniendo una amplitud de las señales de 80% al ubicar el palpador sobre el barreno de referencia como se observa en las figuras 11e y 11g. Finalmente se obtuvo la curva TCG, la cual permite obtener una amplitud de la señal del 80% independientemente de la profundidad a la que se encuentre cada barreno.

*Dimensionamiento de discontinuidades.* Con el fin de analizar los resultados obtenidos del dimensionamiento de las discontinuidades se emplearon los datos que el equipo omniscan genera, los cuales fueron cargados al software OmniPc, en el cual se emplearon los cursores de referencia y medición y las compuertas en la pantalla para realizar las mediciones sobre las indicaciones, como se observa en la figura 12a. Los cursores fueron ubicados empleando la caída de los 6 dB de la señal, en el color que correspondiera a una amplitud del 50% de la señal más alta como se describe en ASTM E 2700-09.

**Figura 12.** Medición con Omnipc.



En la figura 12b se presenta el código de colores para cada eje de las visualizaciones. El color verde representa el eje perpendicular a la discontinuidad, el eje azul representa el eje de escaneo paralelo a la discontinuidad y el eje de color violeta representa el eje de ultrasonido o espesor de la pieza de estudio.

### **3.6 ETAPA 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

A partir del diseño experimental de las muestras presentado en la tabla 7 y los factores de los planes de inspección, se elaboró un diseño de experimentos factorial multinivel, el cual es presentado en la tabla 13. Debido a que las variables son diferentes para el tipo de escaneo y tipo de onda empleado, fue requerido hacer un análisis estadístico para cada uno de ellos. Los resultados estadísticos fueron obtenidos con el programa Startgraphics Centurión XV.

Para el escaneo sectorial se seleccionaron tres valores de resolución angular: el primero con una resolución angular muy alta de  $0.3^\circ$ , el segundo con una resolución de  $0.5^\circ$  y finalmente una resolución angular de  $1.5^\circ$ , resoluciones angulares ubicados dentro de los límites de operación para una inspección con escaneo sectorial y palpador lineal. Los anteriores valores de resolución angular se combinaron con cinco valores de profundidad de focalización, de 3 [mm], 6 [mm], 9 [mm], 12 [mm] y sin focalizar el haz ultrasónico. Los valores de profundidad de focalización corresponden a variaciones de 3 [mm] hasta alcanzar el valor máximo de 12 [mm], con el objetivo de evaluar el efecto de la profundidad de focalización sobre la medición de las discontinuidades. El escaneo sectorial con onda longitudinal no permitió focalizar el haz ultrasónico, evaluándose solamente la variación de la resolución angular.

Para el escaneo electrónico se seleccionaron cuatro tamaños virtuales del palpador VPA, seleccionando 4, 8, 12 y 16 elementos respectivamente, los cuales permiten

evaluar el efecto del tamaño virtual del palpador “VPA” hasta el valor permitido de 16 cristales activos. Cada “VPA” se aplicó con salto de uno y dos elementos, valores normalmente empleados para este tipo de inspecciones.

**Tabla 13.** Diseño de experimentos multinivel para S-scan y E-scan.

FACTORES	NIVELES	VALOR	VARIABLES RESPUESTA
Inclinación	Superior (+)	$\alpha = 90^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Amplitud de las señales</li> <li>· Tamaño PAUT de las discontinuidades</li> </ul>
	Inferior (-)	$\alpha = 55^\circ$	
Tamaño	Grande (+)	5 mm	
	Pequeño (-)	2,5 mm	
Morfología (punta de la discontinuidad)	Redondeada (+)		
	Plana (-)		
<b>ESCANEADO SECTORIAL S-SCAN</b>			
Resolución angular	0,3°, 0,5°, 1,5°.		
Profundidad de focalización	Sin Focalizar, 0; 3; 6; 9; 12 [mm]		
Tipo de onda	Transversal		
	Longitudinal		
<b>ESCANEADO ELECTRÓNICO E-SCAN</b>			
Número de elementos activos	4, 8, 12 y 16 [Elementos]		
Salto de elemento	1 y 2 [elementos]		

### 3.7 ETAPA 7: ELABORACIÓN Y DIFUSIÓN DEL INFORME FINAL

Los resultados obtenidos fueron analizados y se realizó el informe final de la investigación, el cual fue presentado por escrito y sustentado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

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

### 4.1 DISEÑO DE MUESTRAS CON DISCONTINUIDADES ARTIFICIALES

En esta etapa se llevaron a cabo tres actividades a saber: Análisis geométrico de las discontinuidades, variables de estudio de Phased Array y diseño de las muestras, de las cuales se presentan los resultados obtenidos a continuación.

**4.1.1 Análisis geométrico de las discontinuidades.** Como actividad previa al análisis geométrico de las discontinuidades se seleccionó el material para la elaboración de la totalidad de las muestras, determinando como el más adecuado el acero ASTM A36. Este material es empleado en gran variedad de aplicaciones industriales, ya que presenta una alta soldabilidad y es fabricado en forma de placas, barras y perfiles usados para la construcción de puentes, estructuras metálicas, obras civiles, tanques de almacenamiento, entre otros, con costos de adquisición bajos. Además, este acero presenta una microestructura homogénea de granos de ferrita proeutectoide y perlita, los cuales son microconstituyentes comunes en gran cantidad de aceros estructurales. Así mismo, comercialmente se encuentran bloques de calibración para este material, de manera que los equipos de ultrasonido son calibrados con facilidad y rapidez.

A partir de la revisión bibliográfica sobre las dimensiones de discontinuidades generadas artificialmente para patrones de calibración, investigación o capacitación o empleadas en las técnicas de ultrasonido, se determinó la orientación respecto al haz ultrasónico, el tamaño y la morfología del extremo de las discontinuidades planares a mecanizar y evaluar.

**4.1.2 Variables de estudio de Phased Array.** A partir de las variables de Phased Array a evaluar, las cuales fueron: rango de ángulos de refracción de las ondas ultrasónicas, número de elementos activos del palpador y tipo de onda, se determinaron el espesor mínimo y las dimensiones externas de las muestras. Lo anterior se realizó mediante el asistente del equipo Olympus MX2 en el cual se efectuó una configuración de inspección con los ángulos de refracción críticos entre  $30^\circ$  y  $70^\circ$ , de tal manera que la segunda pierna de las leyes focales con ángulo mayor incidieran por fuera de la testa de la zapata obteniendo un espesor crítico de 15 [mm], logrando la configuración señalada en la figura 13. En la figura 14 se muestran las dimensiones externas de las placas.

**Figura 13.** Esquema del haz ultrasónico.



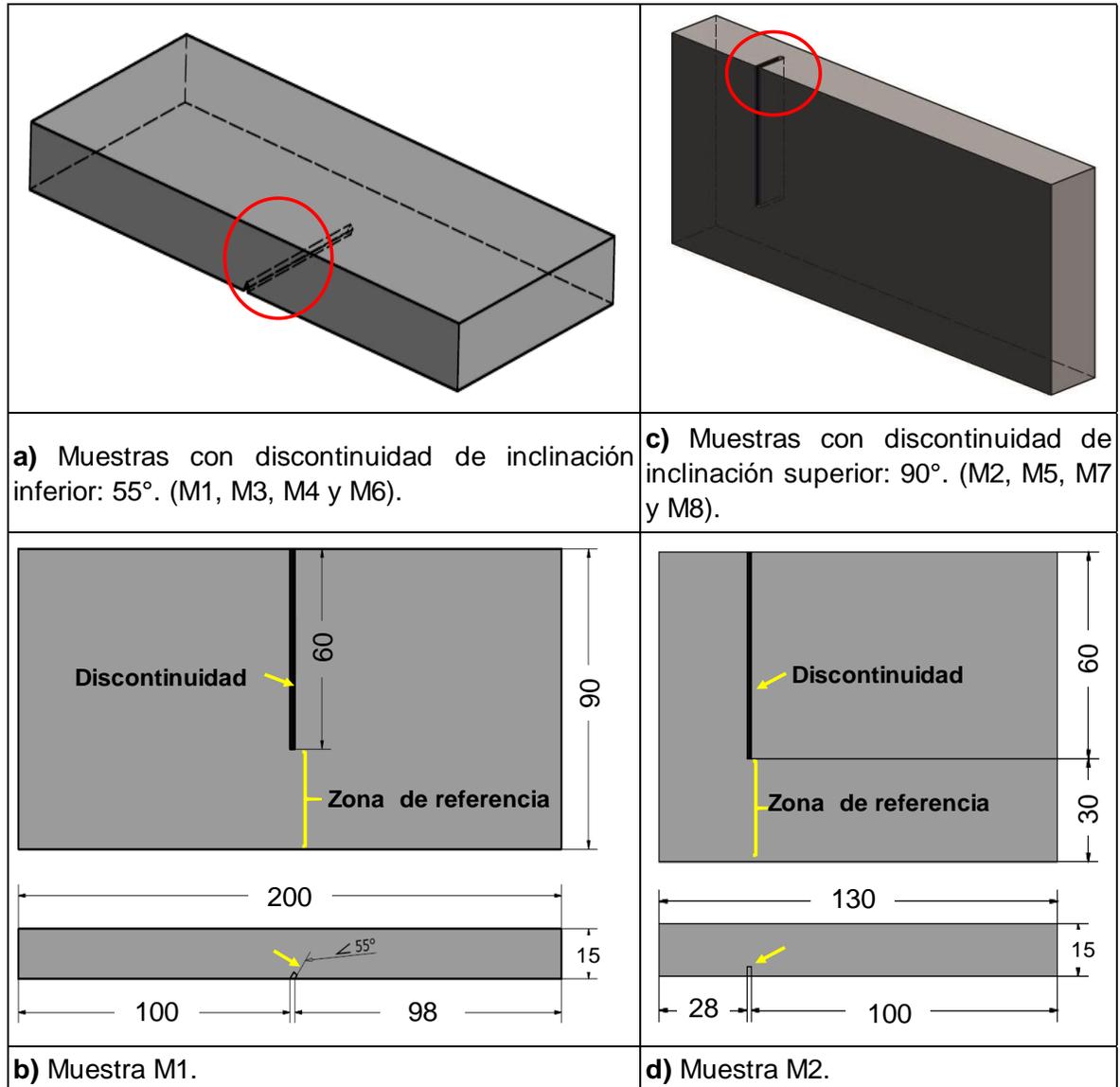
**4.1.3 DISEÑO DE LAS MUESTRAS.** Una vez determinadas las dimensiones externas de las muestras, se finalizó el diseño con la distribución de las discontinuidades, de tal forma que en cada muestra se mecanizó una discontinuidad siguiendo el diseño de experimentos. El largo de las muestras en la cual se mecanizó una discontinuidad con inclinación de  $55^\circ$  (Muestras M1, M3, M4 y M6) fue de 200 [mm], permitiendo el acople del palpador por los dos lados (figura 14a y

14b). El largo de las muestras en la cual se mecanizó una discontinuidad con inclinación de  $90^\circ$  (Muestras M2, M5, M7 y M8) fue de 130 [mm], como se aprecia en la figura 14c y 14d.

Las muestras se diseñaron con un ancho de 90 [mm], mecanizando la discontinuidad con una longitud de 60 [mm] conservando una zona de 30 [mm] de referencia sin discontinuidad para identificar el cambio en la visualización C-scan una vez el haz ultrasónico incide sobre esta (ver figura 14b y 14d).

En la figura 15 se presenta la geometría de las discontinuidades correspondientes a las ocho muestras de estudio, con la respectiva inclinación, con el tamaño, el ancho y la morfología del extremo plana o redondeada. En este sentido, se seleccionaron dos valores de inclinación de la discontinuidad, de  $55^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto a la superficie del material, los ángulos anteriores han sido identificados por autores como ángulos críticos, permitiendo realizar inspección donde el haz ultrasónico incide de manera perpendicular, paralelo y oblicuo. En cuanto a la morfología de la punta de la discontinuidad se seleccionó la forma plana la cual ha sido estudiada por algunos autores y la forma redondeada porque permite comparar el comportamiento del ultrasonido al incidir en formas diferentes, las cuales pueden presentar reflexión diferente del ultrasonido. Finalmente se seleccionaron dos tamaños de discontinuidad, que están dentro del gran rango de dimensiones reportadas en la bibliografía, seleccionando el tamaño pequeño de 2,5 [mm] garantizando que la forma de la punta no estuviera sobre la superficie de la placa de acero, y de 5 [mm] de profundidad, el cual corresponde al doble del tamaño pequeño seleccionado.

**Figura 14.** Dimensiones de las muestras.



## 4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ELABORADAS

Inmediatamente se presenta la caracterización del material seleccionado para la elaboración de las muestras y los resultados dimensionales de las discontinuidades a partir de microscopía óptica cofocal.

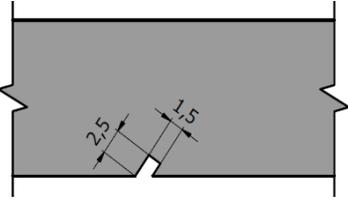
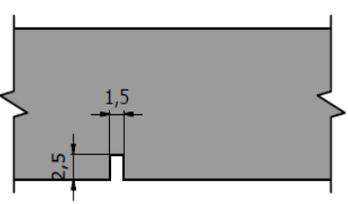
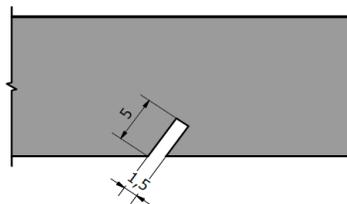
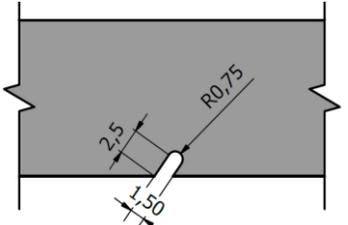
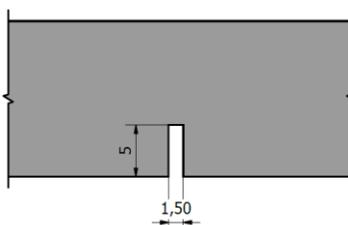
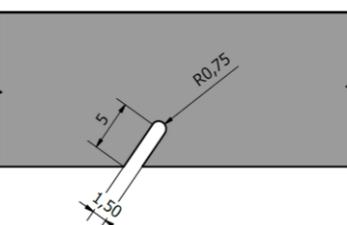
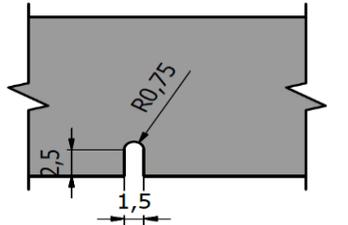
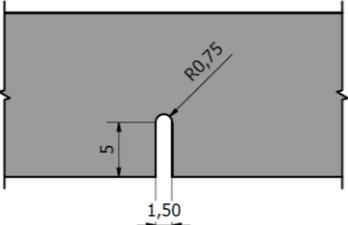
**4.2.1 Caracterización física.** Con el fin de verificar la condición superficial de las muestras, previo a realizar los mecanizados y la soldadura, se hizo una inspección visual, lo que permitió verificar que ninguna placa contara con desgastes, entallas, dobleces, abolladuras o aplastamientos, garantizando de este modo, que la superficie no presentara factores que pudieran influir en la toma de datos con Phased Array.

Seguidamente se evaluaron las muestras con ultrasonido convencional, empleando haz normal con visualización en A-scan, verificando la integridad interna del material y la ausencia de posibles laminaciones generadas en el proceso de conformado. Las muestras inspeccionadas no presentaron discontinuidades que afectaran las mediciones posteriores con Phased Array.

Por otra parte, se tomó dureza sobre el material siguiendo la norma ASTM E140-12, y se verificó que el material correspondiera a un acero A36 a partir de las propiedades mecánicas de dureza y resistencia a la tracción estimada; en este aspecto se aplicaron la normas ASTM A18-14, obteniendo un valor promedio de 73 [HRB] y resistencia a la tracción estimada de 456.55 [MPa].

**4.2.2 Caracterización química.** En la tabla 14 se presentan los resultados de la composición química obtenida mediante espectrometría de emisión óptica (Ensayo de Chispa), y la comparación con los porcentajes máximos permitidos en ASTM A36, confirmando que el material empleado cumple con los requisitos establecidos para el acero ASTM A36.

**Figura 15.** Dimensiones de las ocho discontinuidades a mecanizar.

DIMENSIONES DE LAS OCHO MUESTRAS A MECANIZAR		
		
<p><b>a) Muestra 1, M1:</b> Discontinuidad de 2,5 mm, con ángulo de 55° y extremo plano.</p>	<p><b>b) Muestra 2, M2:</b> Discontinuidad de 2,5 mm, con ángulo de 90° y extremo plano.</p>	<p><b>c) Muestra 3, M3:</b> Discontinuidad de 5 mm, con ángulo de 55° y extremo plano.</p>
		
<p><b>d) Muestra 4, M4:</b> Discontinuidad de 2,5 mm, con ángulo de 55° y extremo redondeado.</p>	<p><b>e) Muestra 5, M5:</b> Discontinuidad de 5 mm, con ángulo de 90° y extremo plano.</p>	<p><b>f) Muestra 6, M6:</b> Discontinuidad de 5 mm, con ángulo de 55° y extremo redondeado.</p>
		
<p><b>g) Muestra 7, M7:</b> Discontinuidad de 2,5 mm, con ángulo de 90° y extremo redondeado.</p>	<p><b>h) Muestra 8, M8:</b> Discontinuidad de 5 mm, con ángulo de 90° y extremo redondeado.</p>	

**Tabla 14.** Resultados análisis composición química.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO 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	0,10
Requisitos Químicos Norma ASTM A36										
Elemento	C	Mn	Si	P	S					
Máximo [%]	0,26	0,80	0,40	0,04	0,05					

**4.2.3 Caracterización metalográfica:** En la figura 16 se encuentran los resultados de la caracterización metalográfica del material, el cual se realizó siguiendo las especificaciones de preparación de las muestras y micro-ataque recomendados en ASTM E3-11 y ASTM E407-15.

En las micrografías mostradas de la figura 16a a la 16e, se observa la microestructura de un acero hipoeutectoide con granos de ferrita de color blanco y granos de perlita de color negro. Las microestructuras de las figuras 16a y 16b tomadas sobre la sección longitudinal presentan estructura en bandas, característico del proceso de laminado en caliente. La sección transversal al laminado de las figuras 16c, 16d y 16e presentan granos muy finos de perlita y ferrita equiaxial. Además, según ASTM E112-13<sup>99</sup> el acero presenta un tamaño de grano entre 9 y 10, lo cual indica deformación durante el proceso de conformado sin permitir el crecimiento de grano del material.

En la micrografía de la sección longitudinal, mostrada en la figura 16f, tomada sin ataque químico, se pueden observar inclusiones no metálicas, correspondiendo a silicatos grado 1.5 y óxidos en grado 2 según ASTM E45 - 13<sup>100</sup>.

<sup>99</sup> American Society For Testing and Materials (ASTM), "ASTM E112 - 13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", ASTM 2013.

<sup>100</sup> American Society For Testing and Materials (ASTM), "ASTM E45 - 13: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel", ASTM 2013.

**Figura 16.** Análisis de la microestructura acero ASTM A36.

MICROESTRUCTURA ACERO ASTM A36		
a) Microestructura a 100x, sección longitudinal al laminado.	b) Microestructura a 500x, sección longitudinal al laminado.	c) Microestructura a 1000x, sección longitudinal al laminado.
d) Microestructura a 500x, sección transversal al laminado.	e) Microestructura a 1000x, sección transversal al laminado.	f) Microestructura a 100x sin ataque químico.

**4.2.4 Dimensionamiento empleando microscopía óptica.** Por medio de microscopía óptica cofocal, se adquirieron las dimensiones de referencia de las discontinuidades, además, mediante reconstrucciones 3D se determinó la rugosidad que presentan las superficies erosionadas tomadas en el fondo o extremo de la discontinuidad, estos resultados se presentan en la tabla 15. Las dimensiones se tomaron como referencia para comparar con las mediciones realizadas con Phased Array.

En las imágenes presentadas en la tabla 15 fueron capturadas empleando el microscopio Hirox, modelo KH-7700. Para cada discontinuidad se indicó el tamaño

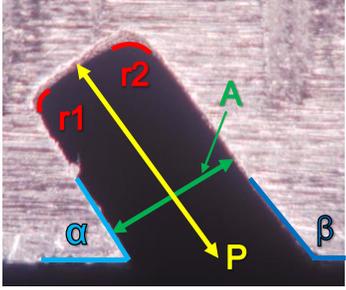
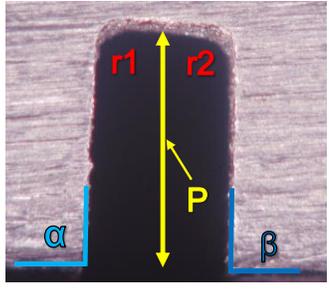
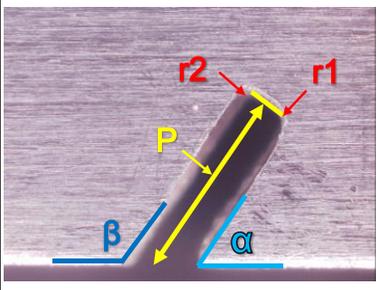
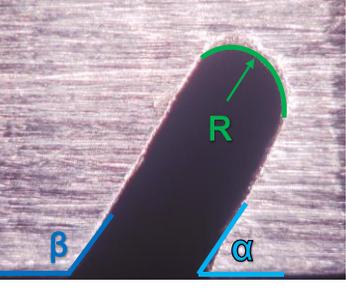
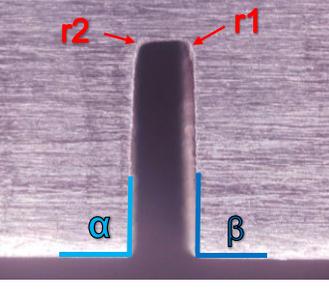
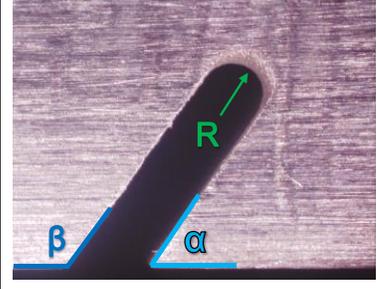
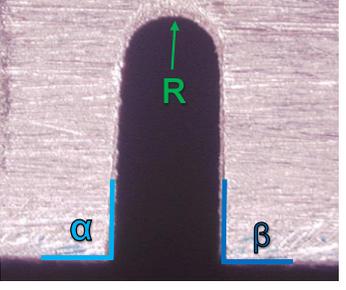
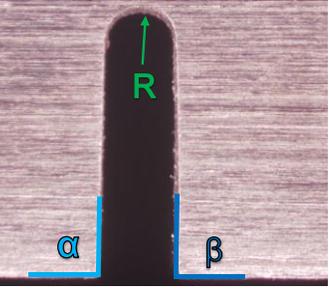
de la discontinuidad **P**, el ancho **A**, el ángulo de inclinación respecto a la horizontal  $\alpha$  y su suplementario  $\beta$ , el radio **R** del extremo de las discontinuidades con extremo redondeado, los radios **r1** y **r2** de los vértices de las discontinuidades con extremo plano y finalmente la rugosidad **Ra** de la superficie mecanizada.

Las dimensiones halladas con el microscopio se aproximan a los diseños planteados, obteniendo una variación máxima del tamaño de solo 0.264 [mm] para las discontinuidades pequeñas y 0.15 [mm] o 2.5% para las discontinuidades grandes. El ancho de las discontinuidades medido fue de 1,40 [mm] en promedio, con variación máxima de 12% con valores que oscilan entre 1.319 [mm] y 1.62 [mm]. Las dimensiones presentadas en la tabla 15 se tomaron a 35X y 70X con el fin de observar la discontinuidad completa en pantalla.

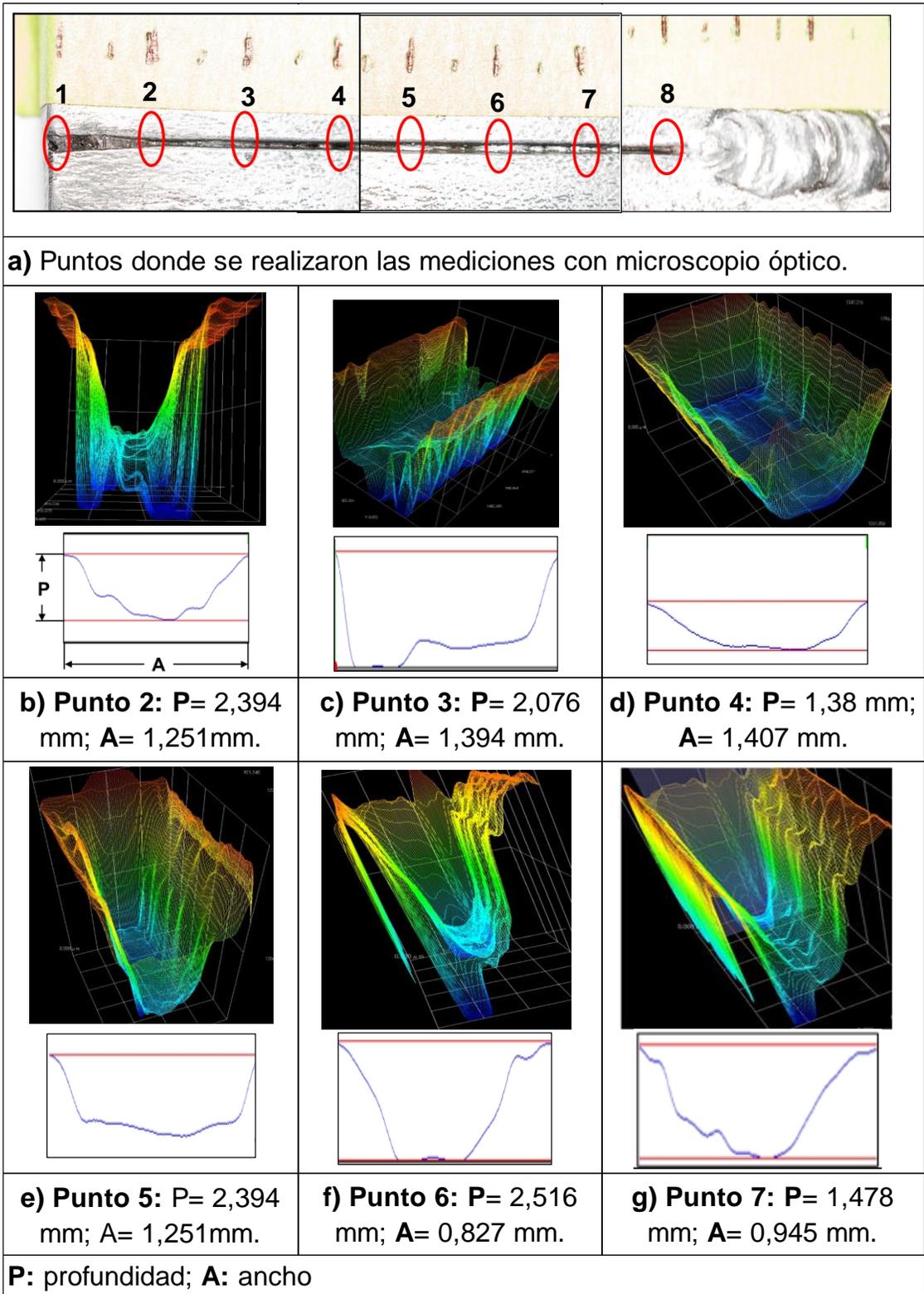
En la figura 17 se presentan los resultados de la caracterización dimensional del defecto de la soldadura empleando microscopía óptica. Las mediciones consistieron en realizar reconstrucciones adquiriendo el perfil del defecto de la soldadura (falta de penetración). Se tomaron medidas cada 20 [mm] a lo largo del cordón sin tener en cuenta los puntos que corresponden a los bordes marcados como 1 y 8.

En la figura 17a se indican las zonas donde se realizó cada medición y en la figura 17b, se muestran los perfiles con sus respectivas medidas. Las dimensiones del defecto en la muestra soldada mediante microscopía, sin tener en cuenta los valores de los puntos extremos (medición 1 y 8) presentan una profundidad entre 1,38 [mm] y 2.43 [mm], con porcentaje de error mínimo de 2,8% y máximo de 44%; con ancho entre 0.827 [mm] y 1.407 [mm] los cuales presentan un porcentaje de error mínimo de 17% y máximo de 50%. El ancho de la discontinuidad medido corresponde al ancho presentado en el corte transversal de las figuras 17b a la 17h.

**Tabla 15.** Dimensiones de las discontinuidades mecanizadas.

DIMENSIONAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES		
		
<p><b>Muestra M1</b>                      P*: 2,739; A*: 1,328; <math>\alpha^*</math>: 57,906°,  <math>\beta^*</math>: 126,061°; r1*:0,197;                      r2*: 0,250; Ra*: 14,4 [<math>\mu\text{m}</math>]</p>	<p><b>Muestra M2</b>                      P: 2,435; A: 1,319; <math>\alpha</math>: 89,162°,  <math>\beta</math>: 93,399°; r1:0,272;                      r2: 0,257; Ra: 12,917 [<math>\mu\text{m}</math>]</p>	<p><b>Muestra M3</b>                      P: 5,119 ; A: 1,428 ; <math>\alpha</math>: 57,497°,  <math>\beta</math>: 124,847°; r1: 0,257 ; r2: 0,244;                      Ra: 13,25 [<math>\mu\text{m}</math>]</p>
		
<p><b>Muestra M4</b>                      P: 2,764; A: 1,365; <math>\alpha</math>: 57,787°,  <math>\beta</math>: 130,86°; R:0,578; Ra: 12,793 [<math>\mu\text{m}</math>]</p>	<p><b>Muestra M5</b>                      P: 4,979 ; A: 1,620 ; <math>\alpha</math>: 91,769°,  <math>\beta</math>: 89,151°; r1: 0,206; r2: 0,184 ;                      Ra: 12.342 [<math>\mu\text{m}</math>]</p>	<p><b>Muestra M6</b>                      P: 5,035; A: 1,319; <math>\alpha</math>: 56,244°,  <math>\beta</math>: 126,313°; r: 0,607; Ra: 17,354                      [<math>\mu\text{m}</math>]</p>
		<p>*P: Profundidad [mm]                      *A: Ancho [mm]                      *<math>\alpha</math>: Ángulo [ ° ]                      *<math>\beta</math>: Ángulo [ ° ]                      *R: Radio del extremo en la muestra redondeada [mm]                      *r1: Radio de la arista [mm]                      *r2: Radio de la arista [mm]                      *Ra: Rugosidad [mm]</p>
<p><b>Muestra M7</b>                      P: 2,477; A: 1,395; <math>\alpha</math>: 93,467°,  <math>\beta</math>: 93,397°; r:0,618;                      Ra: 13,004 [<math>\mu\text{m}</math>]</p>	<p><b>Muestra M8</b>                      P: 4,875; A: 1,476; <math>\alpha</math>: 91,315°,  <math>\beta</math>: 90,524°; r:0,660; Ra: 17,941 [<math>\mu\text{m}</math>]</p>	

**Figura 17.** Resultados de la caracterización dimensional de la muestra soldada.



La morfología de la falta de penetración mostrada en las figuras 17b a la 17h se observa con bordes redondeados de forma irregular, presentando concavidad en el fondo del defecto. Con base en las reconstrucciones y los perfiles se puede observar que no se presentan vértices o aristas regulares como las obtenidas en las discontinuidades mecanizadas con morfología plana (M1, M2, M3 y M5). No obstante, en el corte transversal de la figura 17c, 17d, 17e y 17f se presenta el fondo de la discontinuidad plano o con una leve curvatura.

### **4.3 MEDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EMPLEANDO PHASED ARRAY**

A continuación, se presentan los planes de inspección utilizados y los resultados obtenidos empleando PAUT sobre las muestras elaboradas.

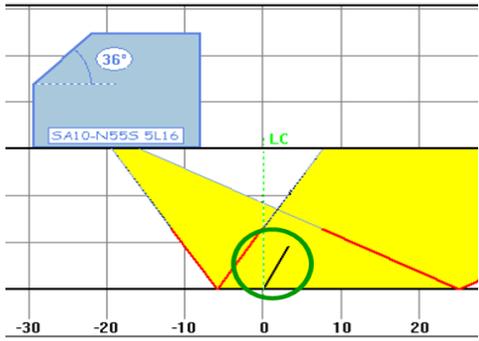
**4.3.1 Planes de inspección.** A continuación, se presentan los planes de inspección sectorial S-scan y electrónico E-scan con base en las variables a evaluar con la técnica Phased Array, las cuales fueron: la resolución angular y profundidad de focalización para el escaneo sectorial; el tamaño virtual del palpador y el salto del elemento para el escaneo electrónico. Además, se consideró el tipo de onda longitudinal y transversal.

**Planes de inspección sectorial S-scan, con onda transversal.** Para el presente proyecto se seleccionaron tres valores de resolución angular:  $0.3^\circ$ ,  $0.5^\circ$  y  $1.5^\circ$ , valores ubicados dentro de los límites de operación para una inspección con escaneo sectorial. Los anteriores valores de resolución angular se combinaron con cinco valores de profundidad de focalización, los cuales fueron de 3 [mm], 6 [mm], 9 [mm], 12 [mm] y sin focalizar el haz ultrasónico. Los valores anteriores de profundidad de focalización corresponden a variaciones de 3 [mm] hasta alcanzar el valor máximo de 12 [mm], con el objetivo de evaluar el efecto de la profundidad de focalización sobre la medición de las discontinuidades.

Todos los planes de inspección fueron configurados con 16 cristales activos del palpador y una distancia de 5 [mm] desde la discontinuidad hasta el frente de la zapata. En la tabla 16 se presentan los quince planes de inspección.

**Tabla 16.** Planes de inspección S-Scan empleando ondas transversales.

PLANES DE INSPECCIÓN SECTORIAL S-SCAN CON ONDA TRANSVERSAL			
Plan de inspección	Resolución angular [°]	Profundidad de focalización [mm]	Los planes de inspección fueron configurados en el equipo en la opción multigrupo para realizar la menor cantidad de barridos.
1	0,3	Sin focalizar	
2	0,3	3	
3	0,3	6	
4	0,3	9	
5	0,3	12	
6	0,5	Sin focalizar	
7	0,5	3	
8	0,5	6	
9	0,5	9	
10	0,5	12	
11	1,5	Sin focalizar	
12	1,5	3	
13	1,5	6	
14	1,5	9	
15	1,5	12	



Haz ultrasónico incidente sobre las discontinuidades

#### 4.3.2 Medición de las discontinuidades con patrón de barrido sectorial S-scan.

Siguiendo el planteamiento metodológico, a cada muestra le fueron aplicados los quince planes de inspección, los cuales fueron analizados en el software OmniPC, registrando las visualizaciones, la máxima amplitud de la señal y el tamaño de las discontinuidades el cual fue obtenido al emplear la técnica de la caída de los 6 dB. Con los resultados anteriores se realizaron las curvas de variación del tamaño de la discontinuidad a partir de los datos de PAUT y la amplitud de las señales para los quince planes de inspección en cada muestra. Finalmente, se llevó a cabo un análisis estadístico, determinando la influencia de las variables partir del análisis de Pareto y el gráfico de efectos principales para las variables de respuesta.

**Visualizaciones con patrón de escaneo sectorial y onda transversal.** Ahora, se presentan las visualizaciones S-scan y C-scan que permiten ilustrar cambios

visibles en la indicación a partir de las variaciones de profundidad de focalización y resolución angular.

De conformidad con lo anterior, en la figura 18 se muestran las visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M4 (tamaño de discontinuidad de 2,5 [mm], inclinación de 55° y punta redondeada), con los planes de inspección sin focalizar (figuras 18a, 18c y 18e) y con profundidad de focalización de 3 [mm] (figuras 18b, 18d y 18f), para los valores de resolución angular de 0.3°, 0.5° y 1.5°.

En la figura 18 se observa el cambio de color y tamaño de la indicación al comparar las figuras 18a con 18b, 18c con 18d y 18e con 18f, para resolución angular de 0.3°, 0,5° y 1.5°. La indicación en la vista S-scan aumenta el tamaño y pasa de un color rojo suave a un color rojo intenso, el cual está relacionado con la amplitud de la señal. En la vista C-scan se observa la zona blanca en la parte izquierda, correspondiendo a la sección de la muestra no mecanizada (ver figura 14). En las visualizaciones C-scan se observa que la indicación presenta un ensanchamiento y un cambio de color a rojo más intenso al tener focalización (figuras 18b, 18d y 18f) respecto a las visualizaciones C-scan sin focalización del haz ultrasónico (figuras 18a, 18c y 18e).

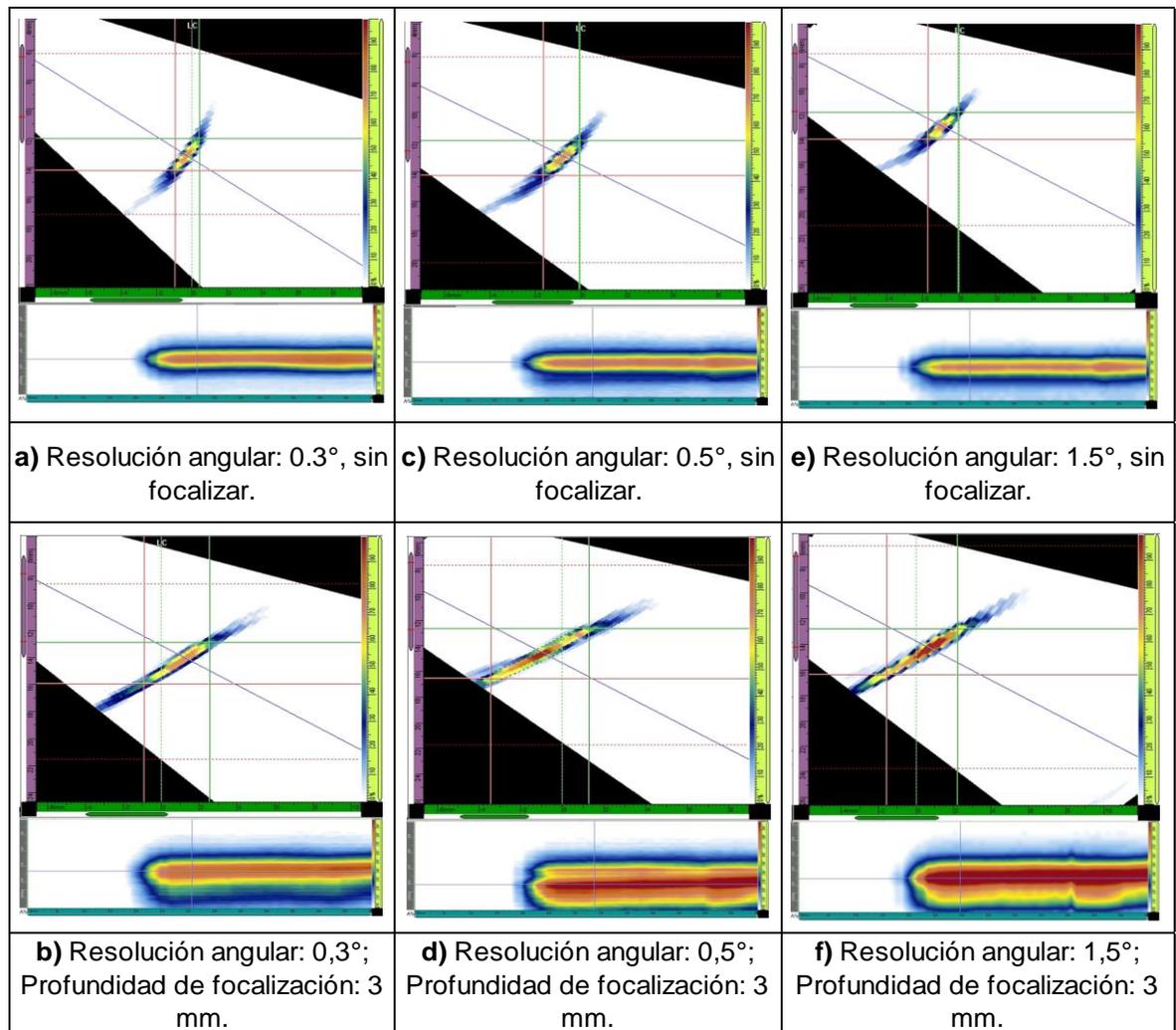
De los resultados presentados en la figura 18 se concluye que las señales ultrasónicas focalizadas a 3 [mm] de profundidad alteran considerablemente la indicación en cuanto a tamaño y amplitud. El comportamiento anterior se debe a que una vez las ondas son focalizadas electrónicamente en una profundidad estas presentan divergencia a menor recorrido sónico, generando que la incidencia de las ondas en la discontinuidad pueda tener ángulos diferentes a los realizados por señales ultrasónicas sin focalización como lo dijo Ginzle y colaboradores<sup>101</sup>. Los resultados obtenidos con focalización en 6 [mm], 9 [mm] y 12 [mm] no presentan

---

<sup>101</sup> GINZEL; E, D, JOHNSON. Phased-Array Resolution Assessment Techniques. The Journal of Nondestructive Testing, 2008.

variaciones significativas para cada muestra, como se puede verificar en las curvas de la figura 22. Por otra parte, con relación a la resolución angular no se observó variación de tamaño y color de la indicación al comparar las figuras 18a, 18b y 18c con resolución angular de  $0,3^\circ$ ,  $0,5^\circ$  y  $1,5^\circ$ .

**Figura 18.** Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra 4.



En la figura 19 se observan las vistas S-scan y C-scan para la muestra M4 (tamaño de discontinuidad de 2,5 [mm], inclinación de  $55^\circ$  y punta redondeada), cuando se inspeccionó con “skew”  $270^\circ$  (haz ultrasónico paralelo a la discontinuidad,  $0^\circ$ ), con

los planes de inspección sin focalizar y con profundidad de focalización de 3 [mm], para los valores de resolución angular de 0.3°, 0.5° y 1.5°.

Los resultados de la figura 19 muestran que la discontinuidad con la inclinación desfavorable respecto al haz ultrasónico sí es detectada. Pese a ello, la amplitud de las señales es baja (menor al 40%), generando que los criterios de aceptación la consideren como una indicación no relevante.

El comportamiento anterior presentado para esta configuración de inspección coincide con el obtenido por Souad Bannouf<sup>102</sup>, el cual estudió por medio de simulación con CIVA el resultado esperado al inspeccionar discontinuidades planares, logrando determinar que la técnica puede detectarlas y caracterizarlas cuando presentan inclinación desfavorable respecto al haz ultrasónico y concluye que se debe realizar un estudio experimental para validar esos resultados. Con base en este estudio, se indica que se presenta relación con los resultados de Souad Bannouf en muestras con discontinuidades de 40[mm] de largo y 10 [mm] de profundidad, obteniendo valores de amplitud de las señales muy bajas para todos los planes de inspección y para todas las muestras.

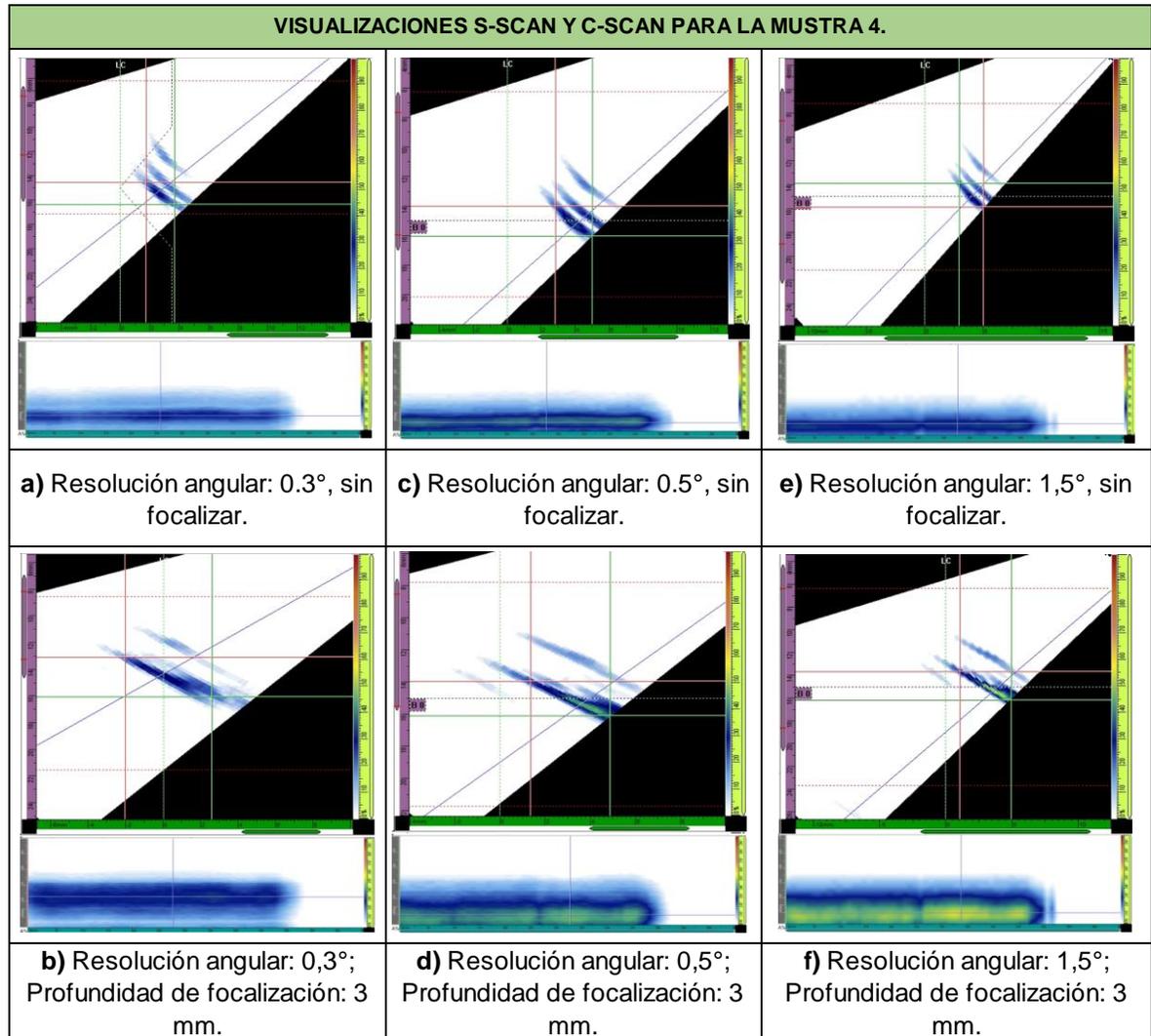
En las visualizaciones presentadas en la figura 19 se observa la indicación de color azul debido a que la amplitud obtenida de las señales es muy baja. Para este caso también se observa el efecto de la profundidad de focalización a 3 [mm] presentado en la figura 18, notándose el cambio de color y forma de la indicación en S-scan, además, se observa como la indicación se alarga con cambio de color. Los resultados obtenidos con focalización en 6 [mm], 9 [mm] y 12 [mm] no presentan

---

<sup>102</sup> BANNOUF, Souad, LONNE, Sébastien, FOUCHER, Fabrice, DELEMONTEZ, Jérôme y CHAPPAZ, Laetitia. Simulation study to improve the detection of planar defects located under shrinkage cavities. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Czech Republic, 2014.

variaciones significativas para cada muestra, como se puede verificar en las curvas de la figura 27b.

**Figura 19.** Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M4.



En las visualizaciones S-scan de las figuras 19a a la 19f se observan varias indicaciones debido a la reflexión del haz ultrasónico que incide con primera pierna en la punta de la discontinuidad y a la reflexión de haz ultrasónico que incide con segunda pierna sobre la cara lateral de esta. Además, una indicación generada por

la difracción de las ondas ultrasónicas en la punta de la discontinuidad, comportamiento que fue estudiado por G. Nardoni y colaboradores<sup>103</sup>, quienes lograron medir la profundidad de grietas reales a partir del procesamiento de las señales difractadas, lo anterior fue posible debido a que estas ondas son generadas justo en la punta que define la altura de la discontinuidad.

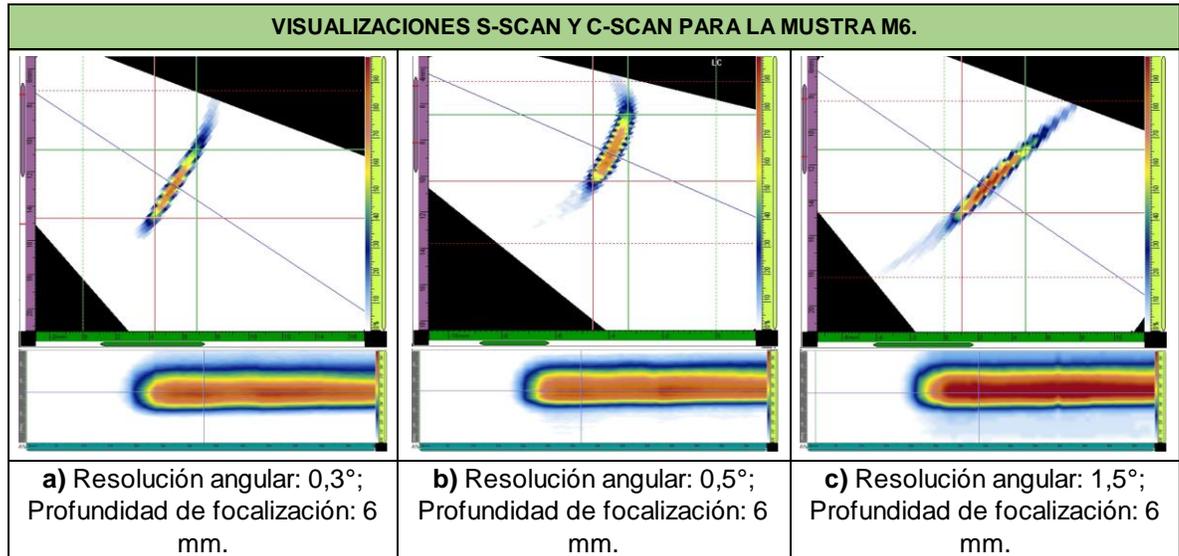
En la figura 20 se aprecian las visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M6 (tamaño de discontinuidad de 5 [mm], inclinación de 90° y punta plana) cuando se inspecciona con profundidad de focalización de 6 [mm] para resolución angular de 0.3° (figura 20a), 0.5° (figura 20b) y 1.5° (figura 20c). Se observa un efecto de la resolución angular sobre los resultados, con influencia negativa para 1.5°, apreciándose una indicación pixelada y alargada. En la figura 20c se aprecia un cambio en el color y forma respecto a las indicaciones obtenidas con resolución angular de 0.3° y 0.5° (figuras 20a y 20b). En las figuras 20a y 20b no se aprecia un mayor efecto al variar de resolución angular de 0.3° a 0.5°. En este sentido llaman la atención los resultados de J. Poguét, P. Ciorau<sup>104</sup>, donde al evaluar la influencia de los parámetros de PAUT en la caracterización dimensional de discontinuidades mecanizadas con tamaños de 12 [mm] de profundidad, 35 [mm] de largo y 3 [mm] de ancho, además en grietas reales que les permitieron observar mejores resultados empleando un valor de resolución angular menor de 1° para alcanzar mayor exactitud en sus mediciones. El comportamiento presentado en la figura 20 correspondiente a la muestra M6 no ocurre para todas las muestras y en el análisis estadístico se describirá el efecto de la resolución angular en las mediciones.

---

<sup>103</sup> G, NARDONI; M, CERTO; P, NARDONI. Sizing in Phased Array Technique using Diffraction and Amplitude Displacement. 17th World Conference on Nondestructive Testing. 2008.

<sup>104</sup> J. POGUET, P, CIORAU,, Op. Cit.,

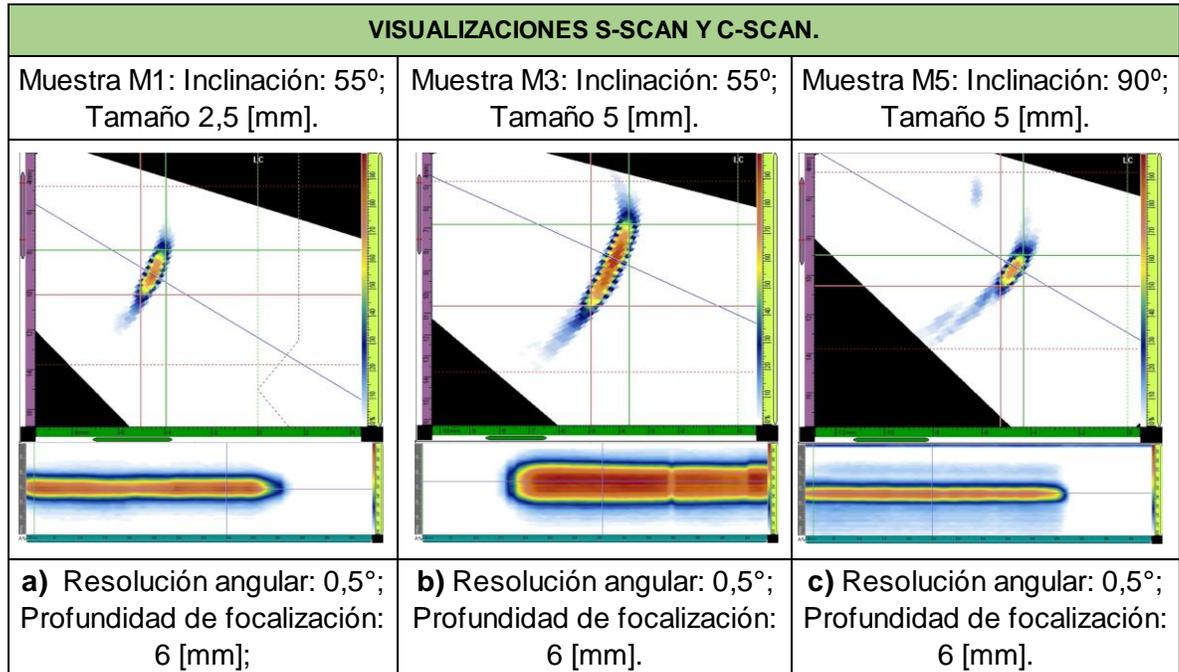
**Figura 20.** Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M6.



En la figura 21 se observan las visualizaciones S-scan y C-scan para las muestras M1, M3 y M5, comparando el efecto de la variación de tamaño al pasar de 2,5 [mm] en la figura 21(a) a 5 [mm] en la figura 21b, también se observa efecto de la inclinación, comparando la muestra M3 con inclinación de 55° y la muestra M5 con inclinación de 90°.

Al aumentar el tamaño de la discontinuidad (figura 21a - 21b), se observa el aumento del tamaño de la indicación con PAUT y un aumento 6,95% de la amplitud de la señal. Lo anterior indica que al aumentar el tamaño de la discontinuidad la intensidad de la energía reflejada es mayor, considerando morfología plana de la punta. De las figuras 21b y 21c se concluye que en la inspección de discontinuidades con igual tamaño, la variación de la inclinación de 55° a 90° presenta un gran efecto de 130% sobre el tamaño PAUT y 11% en la amplitud de las señales.

**Figura 21.** Visualizaciones S-scan y C-scan para las muestras M1, M3 y M5.



La indicación obtenida con PAUT de la muestra M5, con discontinuidad a 90°, presenta un tamaño de 1.5 [mm], muy inferior al real y al obtenido de la muestra M3, con discontinuidad a 55°, cuyo tamaño medido con PAUT fue de 4,5 [mm]. El comportamiento anterior indica que para la técnica de Phased Array la inclinación de la discontinuidad sigue siendo un factor crítico, el cual es determinante en ultrasonido convencional cuando se caracteriza de manera exacta una discontinuidad. Esto indica que los resultados son altamente dependientes de la inclinación de las discontinuidades para las ondas ultrasónicas generadas por sistemas Phased Array con palpadores con arreglo lineal.

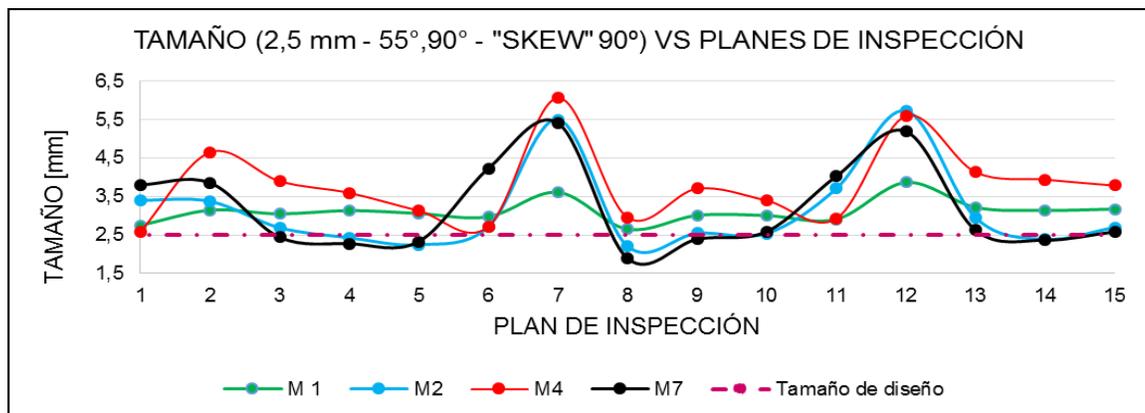
**Amplitud de las señales y tamaño PAUT de las discontinuidades con patrón de escaneo sectorial y onda transversal.** Posteriormente, se presentan las curvas elaboradas a partir de la amplitud de las señales y el tamaño de las discontinuidades para las ocho muestras con los quince planes de inspección. En el título de las figuras se indica en primer lugar el tamaño de las discontinuidades seleccionadas

2,5 [mm] o 5 [mm], seguido aparece el ángulo de inclinación mecanizado en la probeta que corresponde a 55° o 90° y por último el ángulo de inspección que es “skew 90°” o “skew 270°”. La notación anterior se encuentra en todas las gráficas que presentan las curvas de tamaño y amplitud de las señales.

Las figuras 22 y 23 presentan las curvas de los valores promedio de tamaño y amplitud, obtenidos de los quince planes de inspección aplicados sobre las muestras de discontinuidad con tamaño de 2,5 [mm], inclinación de 55° y 90°, (muestras M1, M2, M4 y M7), adquiridos con “skew” 90°. En el anexo A se muestran los valores promedio de amplitud y tamaño para todas las muestras.

De la figura 22 se concluye que las muestras, en la mayoría de planes de inspección, presentaron un tamaño de discontinuidad mayor con respecto al valor de diseño de 2,5 [mm] identificado en la gráfica con la línea horizontal a trazos de color violeta. Así mismo, la curva de mayor desviación, (144% de error para el plan de inspección 7), respecto al tamaño de diseño se obtuvo en la muestra M4, con una discontinuidad a 55° y extremo redondeado, la cual en casi todos los planes de inspección arrojó un tamaño mayor respecto al valor real y a los obtenidos en las otras muestras.

**Figura 22.** Resultados de tamaño PAUT para las muestras M1, M2, M4 y M7.



En la figura 22 se observa un sobredimensionamiento marcado en los planes de inspección 7 y 12 para todas las muestras presentadas. Dichos planes se realizaron con una profundidad de focalización de 3 [mm], con resolución angular de  $0.5^\circ$  y  $1.5^\circ$ , sobredimensionando el tamaño de la discontinuidad, el cual es de aproximadamente el doble al tamaño real medido con el microscopio (ver tabla 15). En este sentido, Peter Ciorau<sup>105</sup> y colaboradores en su investigación también reportaron sobredimensionamientos en la medición de la altura de grietas implantadas en soldaduras y de Stress Corrosion Cracking, superando en 0,5 [mm] (27%) el tamaño real de 1.3 [mm].

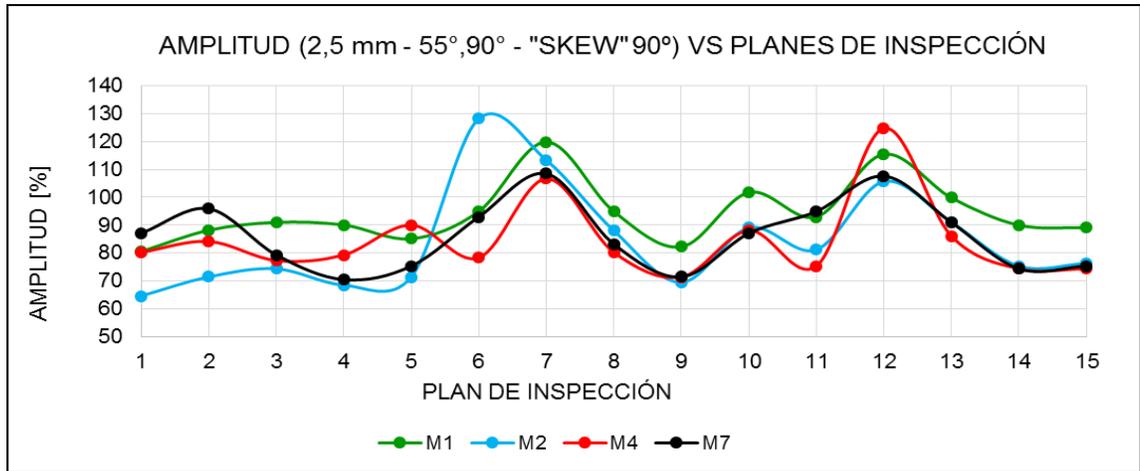
En la figura 23 se representa la variación de la amplitud de las señales para las mismas muestras de discontinuidad de 2.5 [mm] (M1, M2, M4 y M7), con relación a los planes de inspección. Esta presenta una relación directa con los resultados mostrados en la figura 22, evidenciando un aumento significativo de la amplitud en los mismos planes de inspección que presentaron un marcado sobredimensionamiento de la discontinuidad (plan 7 y 12). Es de anotar, que la resolución angular de  $0.3^\circ$ , a diferentes profundidades de focalización presenta una variación máxima de 26% de amplitud de las señales (muestra 7, plan de inspección 2 y 4 de la figura 23).

Las figuras 24 y 25 presentan las curvas de los valores promedio del tamaño y amplitud, obtenidos de los quince planes de inspección realizados a las muestras de discontinuidad con tamaño de 5 [mm], inclinaciones de  $55^\circ$  y  $90^\circ$ , (muestras M3, M5, M6 y M8), adquiridos con "skew"  $90^\circ$ . En el anexo A se encuentran los valores promedio de tamaño y amplitud de las señales para todas las muestras.

---

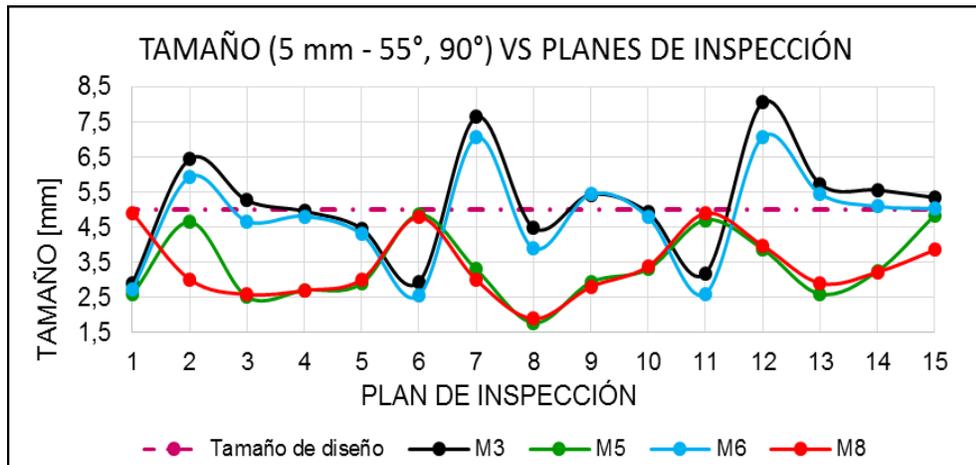
<sup>105</sup> PETER, Ciorau; JEROME, Poguet. Y otros. A contribution to outer surface crack height sizing by paut, 2011. P. 441-448.

**Figura 23.** Resultados de amplitud de señales para las muestras M1, M2, M4 y M7.



De la figura 24 se deriva que las muestras M3 y M6 (variación únicamente en la morfología de la punta) presentan comportamiento similar en los tamaños medidos con PAUT para los quince planes de inspección. Los resultados anteriores indican que existe una influencia de la inclinación de la discontinuidad y una influencia nula de la morfología de la punta sobre el tamaño medido con PAUT para las condiciones de la presente investigación.

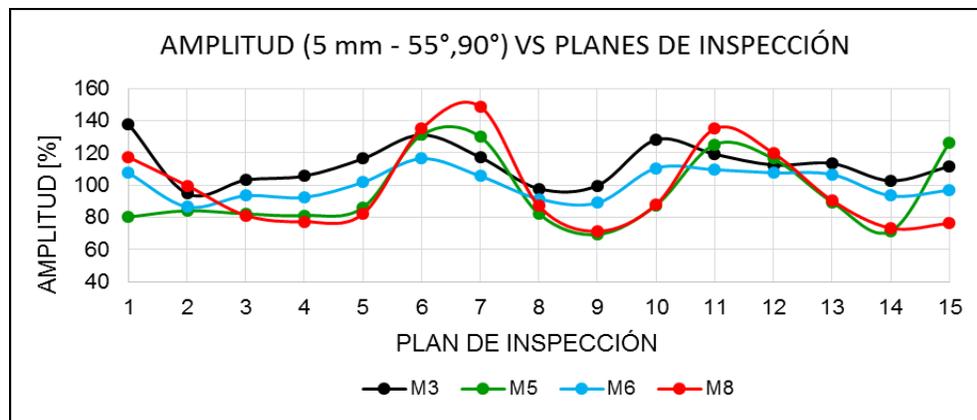
**Figura 24.** Resultados de tamaño PAUT para las muestras M3, M5, M6 y M8.



En la figura 24, los planes de inspección 2, 7 y 12, con focalización en 3 [mm] de profundidad, presentan tamaños sobredimensionados para las muestras M3 y M6, las cuales tienen un ángulo de 55°. Las muestras M5 y M8 con inclinación de 90°, no presentan el comportamiento anterior, con dimensiones obtenidas con PAUT inferiores al valor de diseño para los quince planes de inspección.

Al comparar las curvas de las muestras M3 y M6 de las figuras 24 y 25 se concluye que tienen un comportamiento similar independientemente de la morfología de la punta de la discontinuidad; de igual forma ocurrió para las muestras M5 y M8. Contrario a lo anterior, se evidencia una tendencia diferente al comparar las muestras con inclinación de 55° (M3, M6) respecto a las de 90° (M5, M8), indicando que la inclinación modifica las curvas que se presentan en las figuras 24 y 25, . Cabe resaltar que los resultados anteriores presentan una amplitud mayor a 80% para la mayoría de planes de inspección, criterio empleado para definir la relevancia de una discontinuidad<sup>106</sup>.

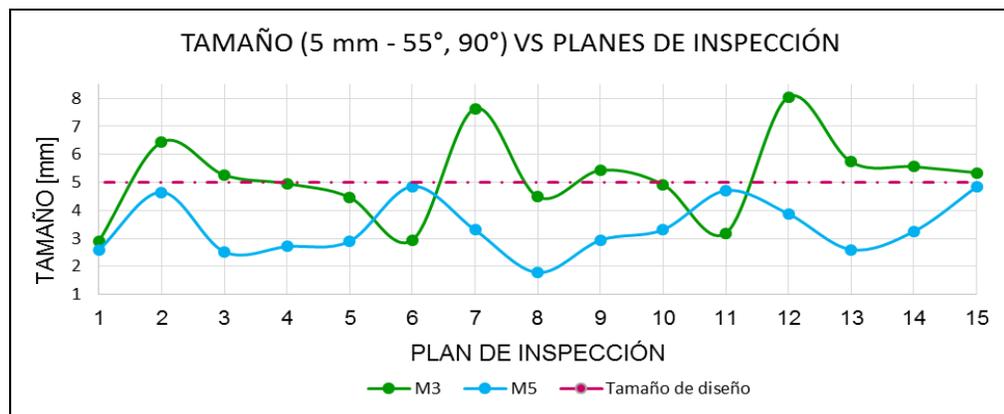
**Figura 25.** Resultados de amplitud de señales para las muestras M3, M5, M6 y M8.



<sup>106</sup> AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessels Code section V. Two Park Avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2013.

En la figura 26 se grafican los valores promedio de tamaño PAUT para las muestras M3 (Tamaño de 5 [mm], inclinación de  $55^\circ$  y morfología plana) y M5 (tamaño de 5 [mm], inclinación de  $90^\circ$  y morfología plana). Se concluye que la inclinación de la discontinuidad afecta el resultado para todos los planes de inspección, presentando mayor exactitud las mediciones en la muestra M3, con una desviación estándar promedio para los quince planes de inspección de 0.10 [mm], respecto a una desviación estándar promedio de 1.14 [mm] para la muestra M5. Lo anterior indica que las mediciones presentan una mayor exactitud al medir discontinuidades mecanizadas con orientación ideal como el de la muestra M3, a diferencia de las medidas con orientación oblicua respecto al haz incidente como el caso de la muestra M5.

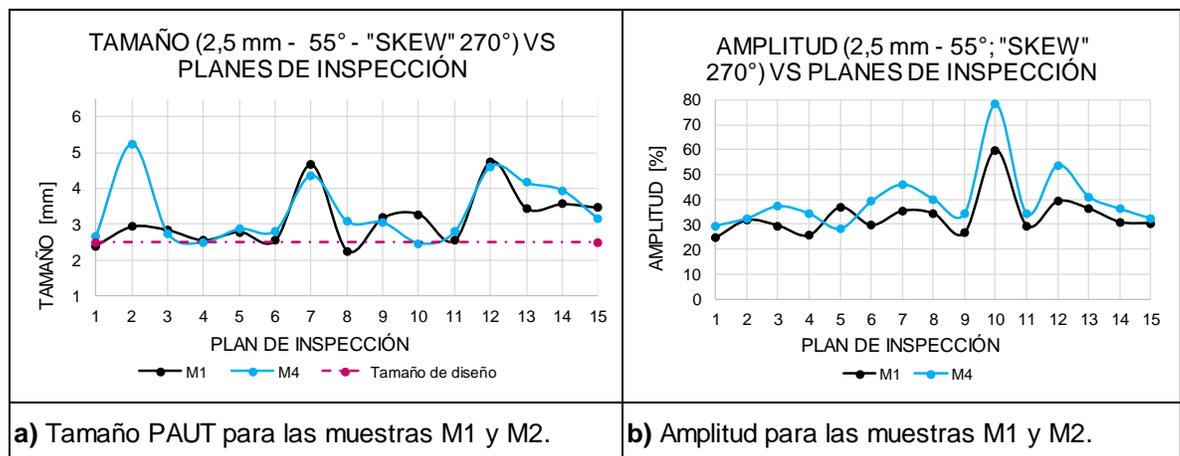
**Figura 26.** Resultados de tamaño PAUT para las muestras M3 y M5.



En las figuras 27a y 27b se presentan las curvas de los valores promedio de tamaño PAUT y amplitud de las señales para los quince planes de inspección realizados sobre las muestras con discontinuidad de 2,5 [mm], (muestras M1, y M4), inspeccionadas con “skew” de  $270^\circ$  (inclinación desfavorable del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad). En este caso, al tener skew de  $270^\circ$ , la inclinación de la discontinuidad es de  $0^\circ$  respecto al haz ultrasónico, como se indica en el título de las figuras. En el anexo A se muestran los valores promedio de tamaño y amplitud para todas las muestras.

Los planes de inspección 7 y 12 de la figura 27a, con profundidad de focalización en 3 [mm], presentan un sobredimensionamiento de la discontinuidad, sin observar en las dos curvas una influencia de la morfología de la punta en la variación de tamaño medido con PAUT. En la figura 27b se observan valores de amplitud de las señales bajos, la mayoría menores al 40%. El plan de inspección 10 con resolución angular de 0.5°, focalizado a una profundidad de 12 [mm] presentó valores superiores al 40%.

**Figura 27.** Resultados de tamaño y amplitud para las muestras M1, y M4.

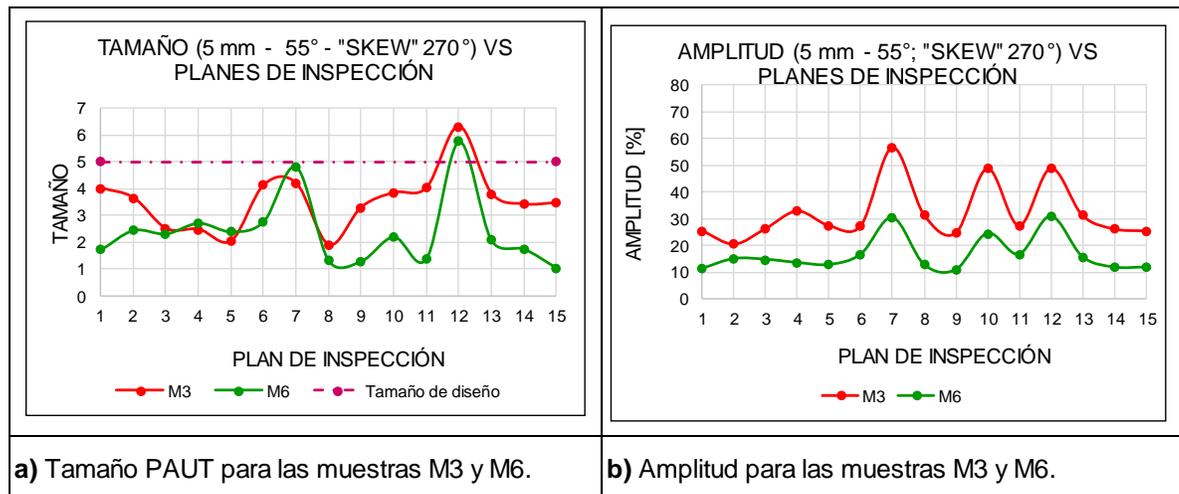


En las figuras 28a y 28b se presentan las curvas de los valores promedio de tamaño y amplitud para los quince planes de inspección realizados a las muestras de discontinuidad de 5 [mm], (muestras M3, y M6), inspeccionadas con "skew" de 270°. En el anexo A se muestran los valores promedio de tamaño y amplitud para todas las muestras.

En la figura 28a se observa mediciones del tamaño de la discontinuidad menor al tamaño de diseño, obteniendo un valor mayor solo para el plan de inspección 12. En la figura 28b se observan valores de amplitud muy bajos, de hasta 11%, lo cual

indica la baja energía que refleja la discontinuidad que logra ser captada por el palpador.

**Figura 28.** Resultados de tamaño y amplitud para las muestras M3 y M6.



En la figura 27a se observan tamaños medidos con PAUT cercanos al valor real de la discontinuidad de 2,5 [mm], contrario a las curvas de la figura 28a, donde se observan tamaños medido con PAUT menores al tamaño de diseño de la discontinuidad de 5 [mm], medidos con la técnica de la caída de los 6 dB. Por otra parte, la amplitud de las señales en las muestras M1, M4, M3 y M6 es menor al 40% para la mayoría de los planes de inspección. Los resultados anteriores indican que independientemente que existan leyes focales que incidan perpendicularmente con la segunda pierna en la discontinuidad, la energía de las ondas reflejadas es baja. El comportamiento anterior no se encontró reportado en la bibliografía consultada.

**Análisis estadístico para los resultados del escaneo sectorial S-scan y onda transversal.** Seguidamente se presenta el análisis estadístico de los resultados de tamaño PAUT y amplitud de las señales a partir de los gráficos de Pareto y de efectos principales, los cuales fueron obtenidos en *Statgraphis Centurion XV* para las variables de respuesta: tamaño de las discontinuidades medidas con PAUT y

los valores de amplitud de las señales. En los diagramas de Pareto se representa de manera gráfica el análisis de varianza, donde los factores que influyen significativamente cortan la línea vertical de referencia para un intervalo de confianza del 95%.

En la tabla 17 se presentan los efectos según los análisis de varianza para el tamaño PAUT y la amplitud de las señales, presentando los valores-P para los factores del diseño de experimentos, siendo A: inclinación de la discontinuidad, B: tamaño real de la discontinuidad, C: morfología de la punta, D: Profundidad de focalización y E: resolución angular. En la figura 29 se muestra el diagrama de Pareto estandarizado para el análisis respectivo.

En la tabla 17 los valores-P del análisis de varianza menores a 0.05 son resaltados con color rojo, lo cual indica que influye de manera significativa sobre la variable de respuesta, y entre más pequeño sea el valor-p de un efecto, este último es más importante.

**Tabla 17.** Efectos según el ANOVA.

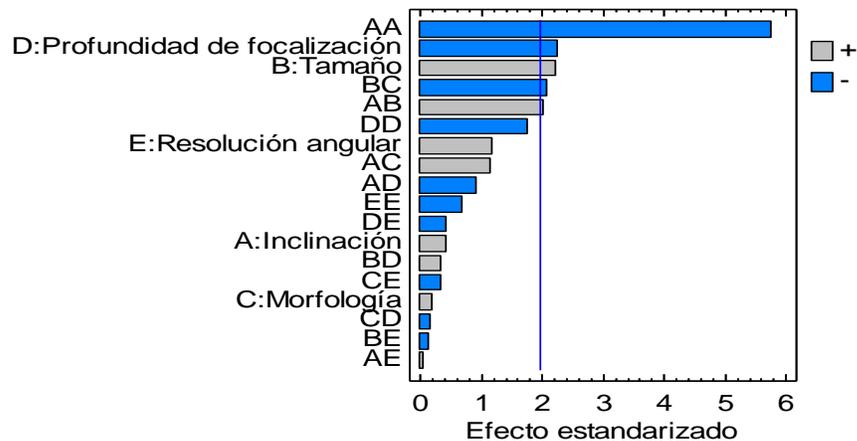
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TAMAÑO PAUT		ANÁLISIS DE VARIANZA PARA AMPLITUD DE LAS SEÑALES
EFEECTO	Valor-P	Valor-P
A:Inclinación	0,6636	0
B:Tamaño	0,0272	0,0236
C:Morfología	0,8399	0,0971
D:Profundidad de focalización	0,0265	0,0448
E:Resolución angular	0,2453	0
AA	0	0
AB	0,045	0
AC	0,2466	0,1767
AD	0,3667	0
AE	0,9548	0,4675
BC	0,0392	0,1158
BD	0,7251	0,0081
BE	0,8837	0,627
CD	0,8578	0,5833
CE	0,7447	0,9581
DD	0,0801	0,1393
DE	0,6612	0,0072
EE	0,4836	0

Según la tabla 17 y el diagrama de Pareto de la figura 29, los factores que influyen significativamente sobre el tamaño de las discontinuidades medidas con PAUT son: la interacción doble de la inclinación, la profundidad de focalización y la interacción del tamaño real con la morfología con efecto negativo; por otra parte, el tamaño real de la discontinuidad y la interacción de la inclinación con el tamaño real, con un efecto positivo.

El efecto negativo de la inclinación indicado en la figura 29, significa que al aumentar el valor del ángulo se presentan mayor cantidad de mediciones alejadas del valor de diseño con mayor porcentaje de error, como se presentó en la figura 24. Por otra parte, el efecto negativo de la profundidad de focalización representó que se tuviera mayor exactitud en el dimensionamiento para el valor de profundidad de focalización mayor (12 [mm]), y menor exactitud en el dimensionamiento para la profundidad de focalización de 3 [mm], lo anterior comprueba la gráfica de efectos principales.

Se mostró en la tabla 17 y en el diagrama de Pareto de la figura 29 la baja influencia que tiene la resolución angular sobre el dimensionamiento empleando escaneo sectorial con onda transversal para las condiciones del presente proyecto de investigación.

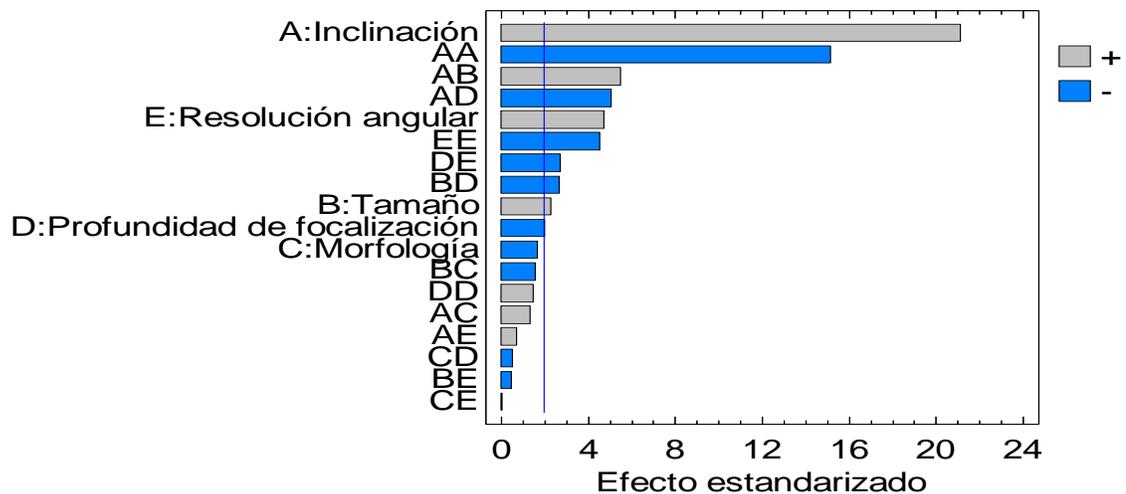
**Figura 29.** Diagrama de Pareto estandarizado para tamaño medido con PAUT.



En la figura 30 se presenta el diagrama de Pareto para los factores que influyen en la amplitud de la señal. Con relación a lo anterior se observa que la inclinación, el tamaño real, la interacción de la inclinación con el tamaño real de la discontinuidad, y la resolución angular, tienen efecto positivo sobre la amplitud de las señales. Por otra parte, la interacción doble de la inclinación, la profundidad de focalización, la interacción doble de la resolución angular, la interacción doble de la profundidad de focalización con la resolución angular y el tamaño con la profundidad de focalización, tienen un efecto que es negativo. El efecto de estas variables se presenta sobre la amplitud de las señales de PAUT, donde el efecto negativo significa que la variable influye disminuyendo la amplitud de la señal y el efecto positivo, que la variable influye aumentando la amplitud de la señal PAUT.

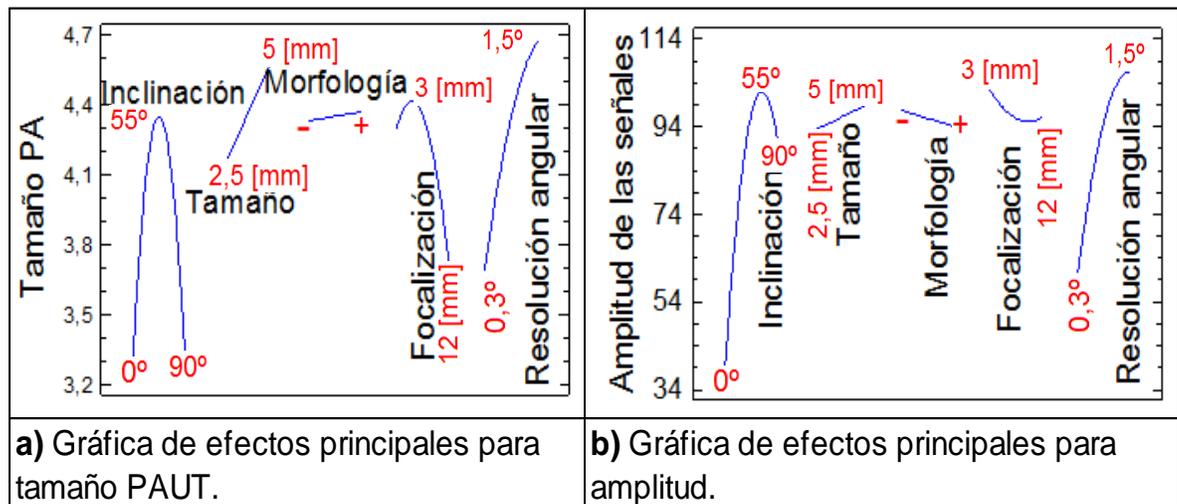
En la figura 31a y 31b se presentan las gráficas de efectos principales para tamaño y amplitud de las señales, graficando el efecto que tiene cada factor sobre la variable de respuesta. De color rojo se indican los valores para cada nivel. El ángulo marcado con 0° corresponde a los resultados de inspección con skew 270°, donde el ángulo de incidencia del haz es paralelo a la discontinuidad. Los ángulos de 55° y 90° corresponden a la inclinación de la discontinuidad respecto a la superficie de la muestra.

**Figura 30.** Diagrama de Pareto estandarizado para amplitud de las señales.



El máximo efecto sobre el tamaño PAUT se presentó para una discontinuidad con inclinación de 55°, con tamaño real de 5 [mm], profundidad de focalización de 3 [mm] y resolución angular de 1.5°, con bajo efecto de la morfología (ver figura 31a). El resultado anterior se puede observar en el plan de inspección 12 para las muestras M3 y M6 presentados en la figura 24, el cual presenta un porcentaje de error de 62%. De lo anterior se concluye que la combinación de factores con mayor influencia sobre el tamaño presenta la menor exactitud en la medición. En el caso contrario, la combinación de factores con menor efecto mostró mejores resultados, siendo la resolución angular de 0.3°, focalización en 12 [mm], tamaño 2,5 [mm] e inclinación de 0° y 90° los de mayor exactitud, con un porcentaje de error de 11% para inclinación de 55° y 7 % para inclinación de 90°.

**Figura 31.** Gráfica de efectos principales.



De la figura 31b el máximo efecto sobre la amplitud de las señales se presentó para una discontinuidad con una inclinación de 55°, tamaño real de 5 [mm], morfología plana, focalización en 9 [mm] y resolución angular de 1.5°, combinación de factores que no presentan valores de amplitud máximos o mínimos.

Todos los anteriores resultados concuerdan con lo presentado en las visualizaciones S-scan, C-scan y con los valores de tamaños PAUT y amplitud de las señales graficadas para los quince planes de inspección de las figuras 24 y 25. (valores numéricos en el anexo A). Lo anterior verifica la relación de los resultados estadísticos con los resultados graficados a partir de los datos de PAUT.

A partir de lo anterior se puede concluir que la profundidad de focalización es una variable que afecta considerablemente la estimación del tamaño PAUT y aumenta la amplitud de las señales, razón por la cual E.A. Ginzel en su trabajo “Phased-Array Resolution Assessment Techniques”<sup>107</sup> concluye que la evaluación a partir de curvas DAC o TCG están basadas en la divergencia normal del haz no enfocado y recomienda que las inspecciones estándar de soldadura no deben emplear focalización del haz ultrasónico con palpadores lineales como el empleado para el presente proyecto. Sin embargo, en el presente trabajo se encontró que es favorable inspeccionar discontinuidades con focalización del haz ultrasónico al final de campo cercano (12 [mm]).

En el caso de la resolución angular, solo se observó un efecto considerable sobre las mediciones tomadas cuando se emplea un valor de  $1.5^\circ$ , comportamiento presentado en la figura 18 de la muestra M4. Lo anterior demuestra que el efecto positivo causa una medición con un porcentaje de error de 36,4% del tamaño de la discontinuidad, no obstante, este comportamiento no es generalizado para todas las muestras porque su influencia es baja según el análisis de Pareto.

**Planes de inspección sectorial S-scan con onda longitudinal.** Los planes de inspección con escaneo sectorial y onda longitudinal para el presente proyecto se diseñaron con 16 elementos activos, empleando resolución angular de  $0.3^\circ$ ,  $0.5^\circ$  y  $1.5^\circ$ . En la tabla 18 se presentan los tres planes de inspección sin focalización

---

<sup>107</sup> E, GINZEL; D, Johnson. Phased-Array Resolution Assessment Techniques. The Journal of Nondestructive Testing, 2008.

electrónica porque el campo cercano está dentro del recorrido sónico de la zapata. Con base en lo anterior se presentan las visualizaciones, la amplitud de las señales y el tamaño de las discontinuidades el cual fue obtenido al emplear la técnica de la caída de los 6 dB. Con los resultados anteriores se realizaron las curvas de variación del tamaño de la discontinuidad a partir de los datos de PAUT y la amplitud de las señales para los quince planes de inspección en cada muestra. Finalmente, se llevó a cabo un análisis estadístico, determinando la influencia de las variables partir del análisis de Pareto y el gráfico de efectos principales para las variables de respuesta.

Los planes de inspección mostrados en la tabla 18, permiten evaluar el efecto de la resolución angular con escaneo sectorial para ondas longitudinales.

**Tabla 18.** Planes de inspección S-Scan empleando ondas longitudinales.

PLAN DE INSPECCIÓN SECTORIAL S-SCAN CON ONDA LONGITUDINAL		
Plan de inspección	Resolución angular [°]	
1	0,3	<p>El diagrama muestra un haz ultrasónico que se expande desde un punto central. Un sector de escaneo de 0° está indicado por un recuadro azul. Una señal de onda longitudinal es mostrada en un círculo verde en la parte inferior del haz. El eje horizontal está etiquetado como 'Haz ultrasónico' y tiene marcas en -20, -10, 0, 10 y 20.</p>
2	0,5	
3	1,5	

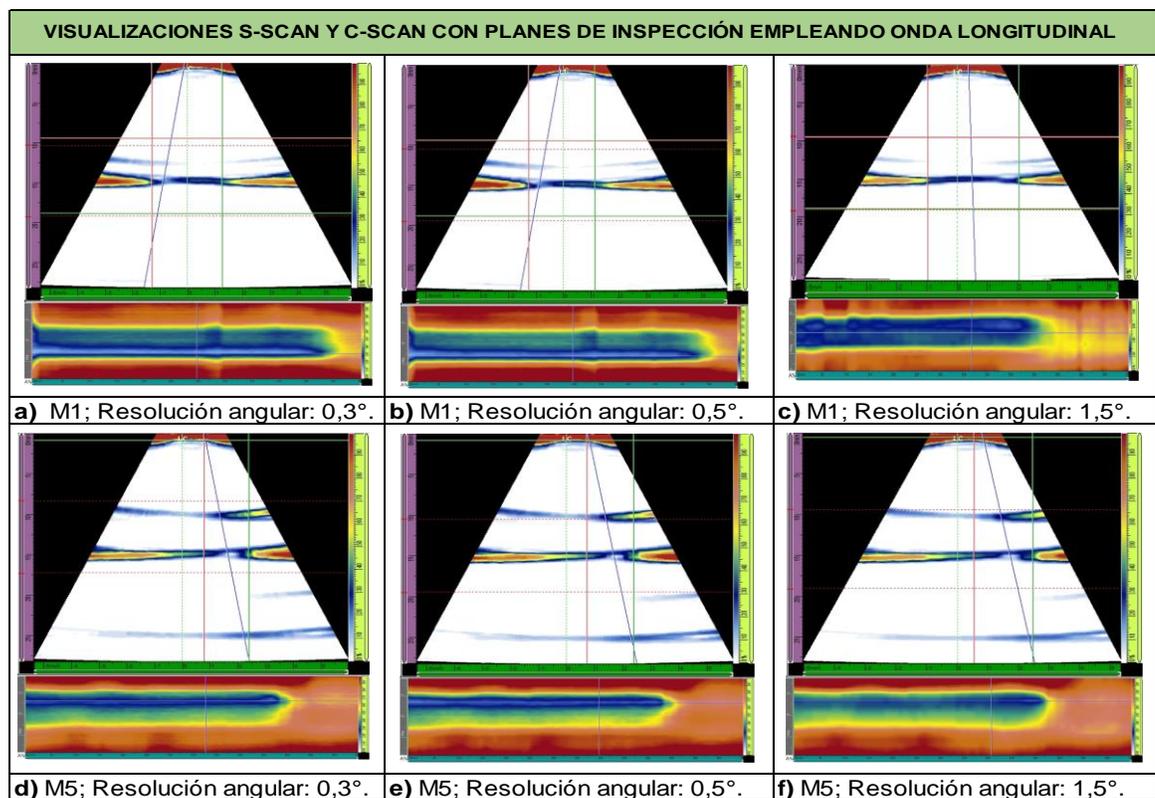
**Visualizaciones con patrón de escaneo sectorial y onda longitudinal.**

Inmediatamente, se presentan las visualizaciones S-scan y C-scan que permiten ilustrar cambios visibles en la indicación a partir de las variaciones de resolución angular.

En la figura 32 se muestran las visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M1 y M5 con los tres planes de inspección, en los cuales las diferentes visualizaciones

de las figuras 32a, 32b y 32c no mostraron cambios en el tamaño y color al variar la resolución angular de  $0,3^\circ$  a  $1,5^\circ$ , comportamiento observado en todas las muestras. Al comparar las visualizaciones de la discontinuidad a  $55^\circ$  de M1 (figura 32a, 32b y 32c) y la discontinuidad a  $90^\circ$  de M5 (figura 32d, 32e y 32f), se observa un cambio en el tamaño y color de la indicación. En la bibliografía consultada no se reportaron estudios similares que permitieran comparar los resultados.

**Figura 32.** Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M1 y M5.

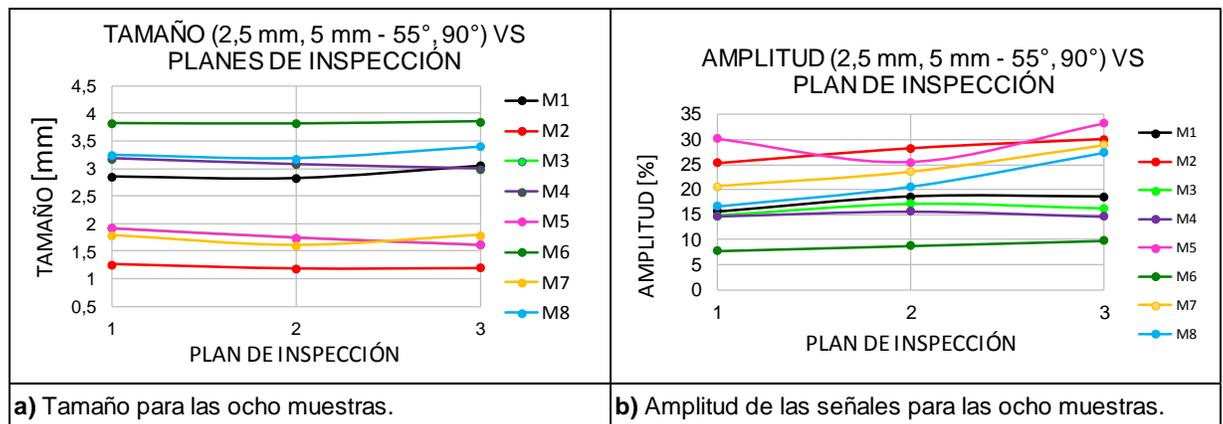


**Amplitud de las señales y tamaño PAUT con patrón de escaneo sectorial y onda longitudinal.** Las figuras 33a y 33b presentan las curvas de los valores promedio para los tres planes de inspección realizados a las muestras de 2,5 [mm] y 5 [mm] con inclinación de  $55^\circ$  y  $90^\circ$ , registrando el tamaño PAUT y la amplitud de las señales, lo anterior permitió observar que no existen variaciones significativas

en las mediciones respecto a los valores de resolución angular de 0,3°; 0,5° y 1,5°. Por otra parte, se puede deducir que existe una influencia de las características de la muestra inspeccionada sobre las mediciones, como en las visualizaciones de la figura 32, (ver anexo A).

Con base en los resultados de las figuras 32 y 33, se concluye que la resolución angular en inspecciones con ondas longitudinales empleando el patrón de inspección S-scan, no tiene influencia significativa en las mediciones de la discontinuidad con la técnica de Phased Array. Sin embargo, las variables de la muestra sí tienen influencia sobre los resultados, aun cuando las ondas longitudinales tienen una longitud de onda mayor.

**Figura 33.** Resultados de tamaño y amplitud de las señales para las ocho muestras.



**Análisis estadístico para los resultados del escaneo sectorial y onda longitudinal.** En la tabla 19 se presentan los efectos de los factores según el análisis de varianza y en las figuras 34a y 34b se presenta el gráfico de Pareto; por otra parte, en las figuras 34c y 34d se presenta el gráfico de efectos principales. Tanto la tabla presentada como las figuras permiten evaluar el efecto sobre las variables de respuesta. En la tabla 19 los valores-P del análisis de varianza (ANOVA) menores a 0.05 son resaltados con color rojo, indicando que existe una relación estadísticamente significativa entre el factor y la variable de respuesta.

Contrario a lo obtenido para las ondas transversales, la morfología de la punta de la discontinuidad es el factor que presenta mayor influencia en los resultados para las variables de respuesta. Además, la inclinación sigue siendo un factor que afecta la amplitud de las señales obtenidas y el tamaño PAUT, comportamientos que se presentan en la tabla 19 y el diagrama de Pareto de las figuras 34a y 34b.

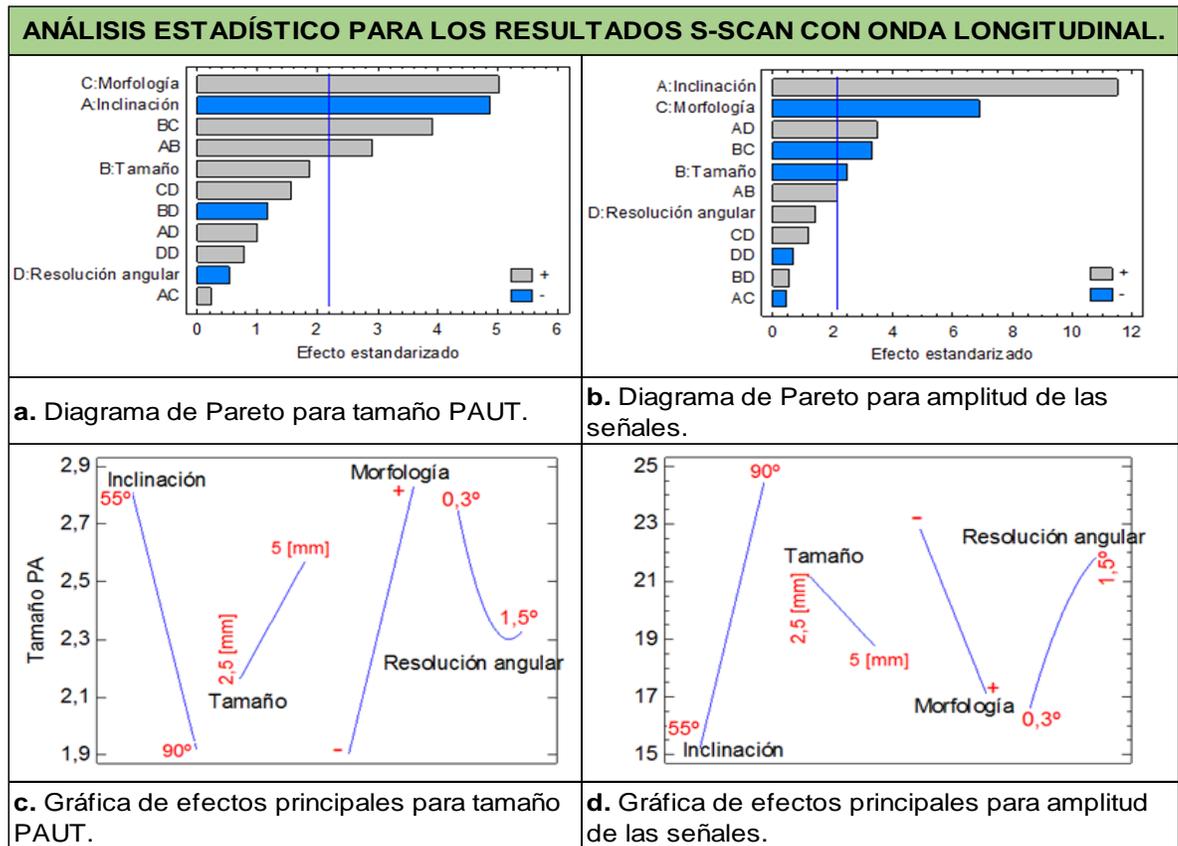
**Tabla 19.** Efectos según el ANOVA.

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA TAMAÑO PAUT		ANÁLISIS DE VARIANZA PARA AMPLITUD DE LAS SEÑALES
EFEECTO	Valor-P	Valor-P
A:Inclinación	0,0004	0
B:Tamaño	0,0869	0,0279
C:Morfología	0,0003	0
D:Resolución angular	0,6035	0,1768
AB	0,013	0,0523
AC	0,8292	0,6655
AD	0,3375	0,0045
BC	0,0021	0,0062
BD	0,2651	0,5831
CD	0,1457	0,262
DD	0,4559	0,4991

Con base en el análisis de Pareto de la figura 34a, se concluye cuáles factores tienen influencia sobre el tamaño obtenido con PAUT; entonces con efecto positivo la morfología, así mismo para la interacción del tamaño con la morfología y la interacción de la inclinación con el tamaño real. Ahora, con efecto negativo, la inclinación de la discontinuidad. Es de anotar, que la resolución angular no tiene efecto.

Por otra parte, en la figura 34b se presenta el análisis de Pareto para la amplitud de las señales, donde existe un efecto positivo de la inclinación y la interacción de la inclinación con la resolución angular. Contrario a ello, existe un efecto negativo de la morfología, el tamaño real y la interacción del tamaño con la morfología.

**Figura 34.** Diagramas de Pareto estandarizado y de efectos principales.



En la figura 34c se obtiene la combinación de niveles que generan mayor efecto para cada factor sobre las variables de respuesta. En este sentido el máximo efecto sobre el tamaño PAUT se presentó para la discontinuidad con una inclinación de 55°, con tamaño real de 5 [mm], morfología redondeada y resolución angular de 0.3°. El resultado anterior corrobora lo presentado en la curva de la muestra M6 de la figura 33a, el cual tuvo un error de 23,5%, siendo el menor error obtenido de las ocho muestras. Lo anterior indica que la mayor exactitud se logró cuando se combinan los factores con mayor efecto sobre los resultados, no obstante se demuestra la baja exactitud de las mediciones realizadas con onda longitudinal.

La combinación de factores con mayor efecto sobre la amplitud se presentó para la muestra con inclinación de  $90^\circ$ , tamaño de 2,5 [mm], morfología plana y resolución angular de  $1,5^\circ$ . El comportamiento anterior se comprueba en la figura 33b para la curva de la muestra M2.

En la tabla 20 se presentan los porcentajes de error de cada plan de inspección para todas las muestras de estudio. El porcentaje de error fue calculado con base en las dimensiones de referencia de cada muestra, las cuales fueron medidas con microscopía óptica y presentadas en la tabla 15. En la columna final de la tabla 20 se resalta de color verde el menor porcentaje promedio para la resolución angular de  $0.3^\circ$ ;  $0.5^\circ$  y  $1.5^\circ$  para S-scan y onda transversal. De lo anterior se concluye que para los tres casos el menor porcentaje de error se obtuvo con una profundidad de focalización de 12 [mm], siendo esta profundidad próxima a la del campo cercano del haz empleado, cuyo valor es de 13,31 [mm]. Con base en estos resultados se concluye que independientemente de la focalización electrónica que realiza el equipo en diferentes profundidades, la de mayor exactitud sigue siendo la obtenida en el final del campo cercano.

En la tabla 20 se resalta de color azul el porcentaje de error promedio obtenido con los planes de inspección sin focalización electrónica. Estos valores corresponden al segundo menor valor de porcentaje de error, lo cual indica que al final del campo cercano para haces ultrasónicos de Phased Array existe la focalización natural, la cual es presentada también en ultrasonido convencional. De lo anterior se concluye que independientemente de realizar o no focalización electrónica, al final del campo cercano se tendrá una zona de concentración de energía, presentando alta exactitud en el dimensionamiento con el haz ultrasónico generado por la técnica Phased Array con palpadores de arreglo lineal.

**Tabla 20.** Valores de porcentaje de error para todos los planes de inspección S-scan

<b>PATRÓN DE ESCANEO SECTORIAL S-SCAN CON ONDA TRANSVERSAL</b>																
Plan de inspección	Tipo de onda	Profundidad de focalización [mm]	Resolución angular [grados]	Error experimental para discontinuidades de 5 [mm], 90°.		Error experimental para discontinuidades de 5 [mm], 55°.		Error experimental para discontinuidades de 2,5 [mm], 55°.		Error experimental para discontinuidades de 2,5 [mm], 90°.		Error experimental para discontinuidades de 5,[mm], 0° .		Error experimental para discontinuidades de 2,5 [mm], 0°.		Promedio
				Morfología		Morfología		Morfología		Morfología		Morfología		Morfología		
				Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	
1	OT	Sin Focalizar	0,3	48,0	0,5	43,3	45,9	0,4	6,3	6,3	53,6	21,8	65,8	12,6	3,2	25,6
2	OT	3	0,3	6,6	38,2	25,8	17,8	14,8	68,2	68,2	55,6	28,9	51,3	6,8	89,9	39,4
3	OT	6	0,3	49,4	47,0	2,8	7,2	11,4	41,1	41,1	1,5	51,3	53,9	3,3	1,0	25,9
4	OT	9	0,3	45,7	44,7	3,2	4,5	14,5	30,1	30,1	8,2	51,7	46,0	7,1	9,9	24,6
5	OT	12	0,3	41,8	38,3	12,8	14,5	11,7	13,2	13,2	5,9	60,1	52,3	1,5	3,7	22,4
6	OT	Sin Focalizar	0,5	2,5	1,8	42,6	49,3	8,6	1,6	1,6	70,8	19,5	44,8	7,1	1,8	21,0
7	OT	3	0,5	33,7	38,5	49,2	40,1	31,8	119,4	119,4	118,4	18,3	4,4	70,5	57,9	58,5
8	OT	6	0,5	64,2	61,1	12,4	22,5	3,2	6,9	6,9	23,7	63,1	74,0	17,9	11,3	30,6
9	OT	9	0,5	41,1	42,6	6,1	8,0	9,9	34,0	34,0	3,5	35,6	74,2	15,9	10,0	26,2
10	OT	12	0,5	33,5	30,6	3,9	4,9	9,7	22,8	22,8	4,6	25,1	56,2	19,6	10,8	20,4
11	OT	Sin Focalizar	1,5	5,5	0,4	37,8	48,3	6,2	5,8	5,8	62,5	21,6	72,4	7,3	0,9	22,9
12	OT	3	1,5	22,2	18,5	57,3	40,4	41,1	102,4	102,4	109,7	23,2	14,4	73,6	67,0	56,0
13	OT	6	1,5	47,8	40,4	11,9	8,2	17,6	49,6	49,6	6,0	25,7	58,8	25,4	50,5	32,6
14	OT	9	1,5	34,8	33,9	8,6	1,2	14,6	42,5	42,5	4,5	33,4	65,1	30,0	42,7	29,5
15	OT	12	1,5	2,9	21,0	4,4	0,2	15,9	36,9	36,9	4,4	32,5	79,2	26,1	13,6	22,8
<b>PATRÓN DE ESCANEO SECTORIAL S-SCAN CON ONDA LONGITUDINAL</b>																
Plan de inspección	Tipo de onda	Resolución angular [grados]	Error experimental para discontinuidades de 2,5 [mm], 55°.				Error experimental para discontinuidades de 2,5 [mm], 90°.		Error experimental para discontinuidades de 5 [mm], 55°.		Error experimental para discontinuidades de 5 [mm], 90°.		Error experimental para discontinuidades de 5 [mm], 90°.		Promedio	
			Morfología				Morfología		Morfología		Morfología		Morfología			
			Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada		
1	OL	0,3	4,4	15,1	48,0	27,9	62,6	24,0	61,5	33,3	61,5	33,3	38,9			
2	OL	0,5	3,3	11,3	50,9	35,0	65,8	24,1	64,9	34,7	64,9	34,7	40,9			
3	OL	1,5	11,5	8,5	50,7	27,7	68,4	23,5	67,5	30,2	67,5	30,2	39,5			

Por otra parte, en la tabla 20 se resaltan de color rojo los porcentajes de error mayores para la resolución angular de 0,3°; 0,5° y 1,5, los cuales corresponden a la profundidad de focalización de 3 [mm]. De estos valores y para este caso se concluye que focalizar el haz ultrasónico en profundidades pequeñas generó los porcentajes de error mayores, debido posiblemente a una alta divergencia del haz ultrasónico al retirarse de la zona de focalización electrónica.

El comportamiento anterior ocurre por una combinación de factores que ocasionaron en este caso particular porcentajes de error bajos y altos, los cuales fueron parcialmente estudiados por Satyanarayan y colaboradores<sup>108</sup>. En su investigación concluye que los escaneos sectoriales al tener un abanico de ángulos de inspección se generan en la discontinuidad planar haces ultrasónicos reflejados con una energía diferente para cada ángulo, mientras que en el escaneo electrónico al tener el mismo ángulo para todos los haces ultrasónicos se reflejan con la misma energía generando mayor exactitud. Sin embargo, el plan de inspección sectorial al tener un abanico de ángulos podría encontrar discontinuidades que para el escaneo electrónico no sería posible detectar.

De la tabla 20 también se concluye que las variaciones de resolución angular en inspecciones con barrido S-scan y onda longitudinal no presentan influencia en el porcentaje de error promedio. Lo anterior está asociado a la mayor longitud de las ondas longitudinales que generan una menor sensibilidad<sup>109</sup>.

---

<sup>108</sup> L, SATYANARAYAN; KUMAR, ANISH; T, JAYAKUMAR. Sizing Cracks in Power Plant Components Using Array Based. Journal of nondestructive testing. 2009.

Ultrasonic Techniques. J Nondestruct Eval, 2009. P. 111-124.

<sup>109</sup> HILLA, Samuel; Steve, Dixona. Localisation of defects with time and frequency measurements using pulsed arrays. NDT&E International. 2014. P. 24-30.

**4.3.3 Medición de las discontinuidades con patrón de barrido electrónico E-scan.** Siguiendo el planteamiento metodológico, posteriormente se presentan los planes de inspección electrónico con onda transversal y longitudinal aplicados sobre las ocho muestras, en este sentido se registraron las visualizaciones, la máxima amplitud de la señal y el tamaño de las discontinuidades. Finalmente, se llevó a cabo un análisis estadístico, determinando la influencia de las variables y su efecto sobre los resultados.

**Planes de inspección electrónico E-scan con onda transversal y longitudinal.**

Para el presente proyecto, los planes de inspección con escaneo electrónico E-scan se diseñaron con cuatro valores de tamaño virtual de palpador “VPA”, activando 4, 8, 12 y 16 elementos, los cuales se seleccionaron con base en la capacidad máxima del equipo de controlar simultáneamente hasta 16 elementos, y se determinó una variación de 4 elementos para estudiar su efecto. Cada tamaño virtual se aplicó con salto de un elemento y dos elementos.

En la tabla 21 se presentan los planes de inspección, los cuales se realizaron con onda transversal OT empleando incidencia angular y onda longitudinal OL con incidencia normal.

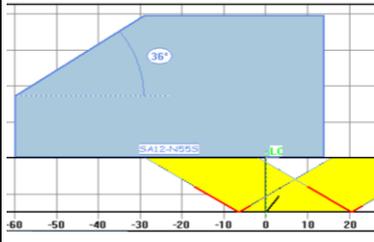
**Visualizaciones con patrón de escaneo electrónico E-scan y onda transversal.**

En la figura 35 se muestran las visualizaciones E-scan y C-scan para las muestras M2 (tamaño de discontinuidad de 2,5 [mm], inclinación de 90° y punta plana) y M4 (tamaño de discontinuidad de 2,5 [mm], inclinación de 55° y punta redondeada) empleando ondas transversales. Los resultados de los planes de inspección de las figuras 35a, 35c y 35e tienen ocho (8) elementos activos del palpador y un salto de dos (2) elementos. En las figuras 35b, 35d y 35f presentan los resultados empleando 16 elementos activos del palpador y un salto de dos elementos.

**Tabla 21.** Planes de inspección E-Scan.

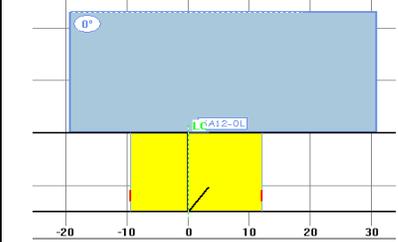
PLANES DE INSPECCIÓN ELECTRÓNICO E-SCAN CON ONDA TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL			
Plan de inspección	Elementos activos	Salto de elemento	Tipo de onda
1	4	1	OT* - OL*
2	4	2	OT - OL
3	8	1	OT - OL
4	8	2	OT - OL
5	12	1	OT - OL
6	12	2	OT - OL
7	16	1	OT - OL
8	16	2	OT - OL

**\*OT: ONDA TRANSVERSAL; OL: ONDA LONGITUDINAL.**



Haz ultrasónico OT.

**a.** Incidencia angular.



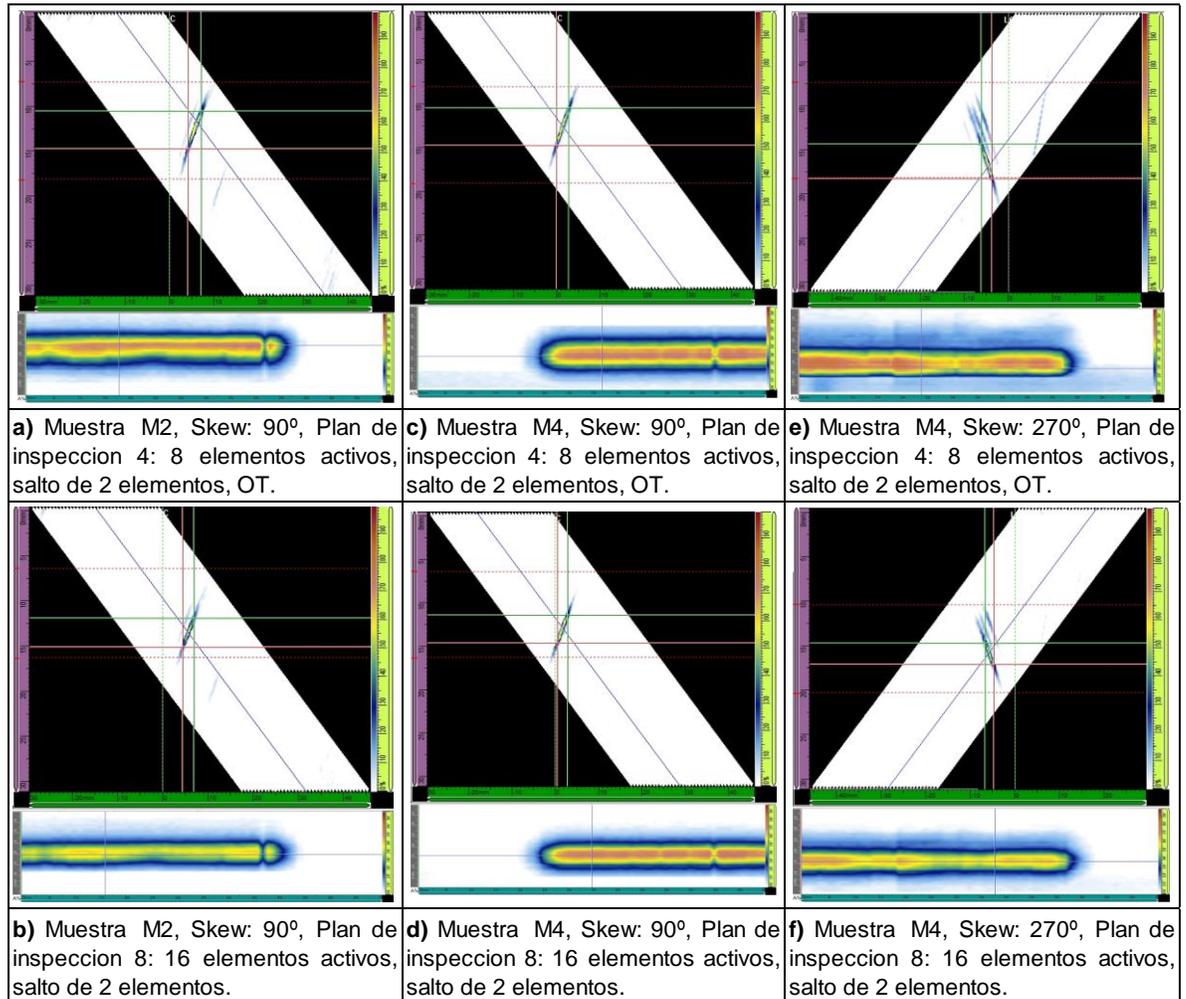
Haz ultrasónico OL.

**b.** Incidencia normal.

En las figuras 35a y 35b se observa la disminución del tamaño y el cambio a un color amarillo de la indicación debido a una amplitud baja de la señal, el cual se obtuvo al duplicar el tamaño virtual VPA del palpador. Sin embargo, en las figuras 35c y 35d, el cambio de color y la disminución del tamaño no es apreciable, de lo cual se desprende que la inclinación y la punta de la discontinuidad influyeron en la caracterización empleando ultrasonido Phased Array con arreglo lineal del palpador.

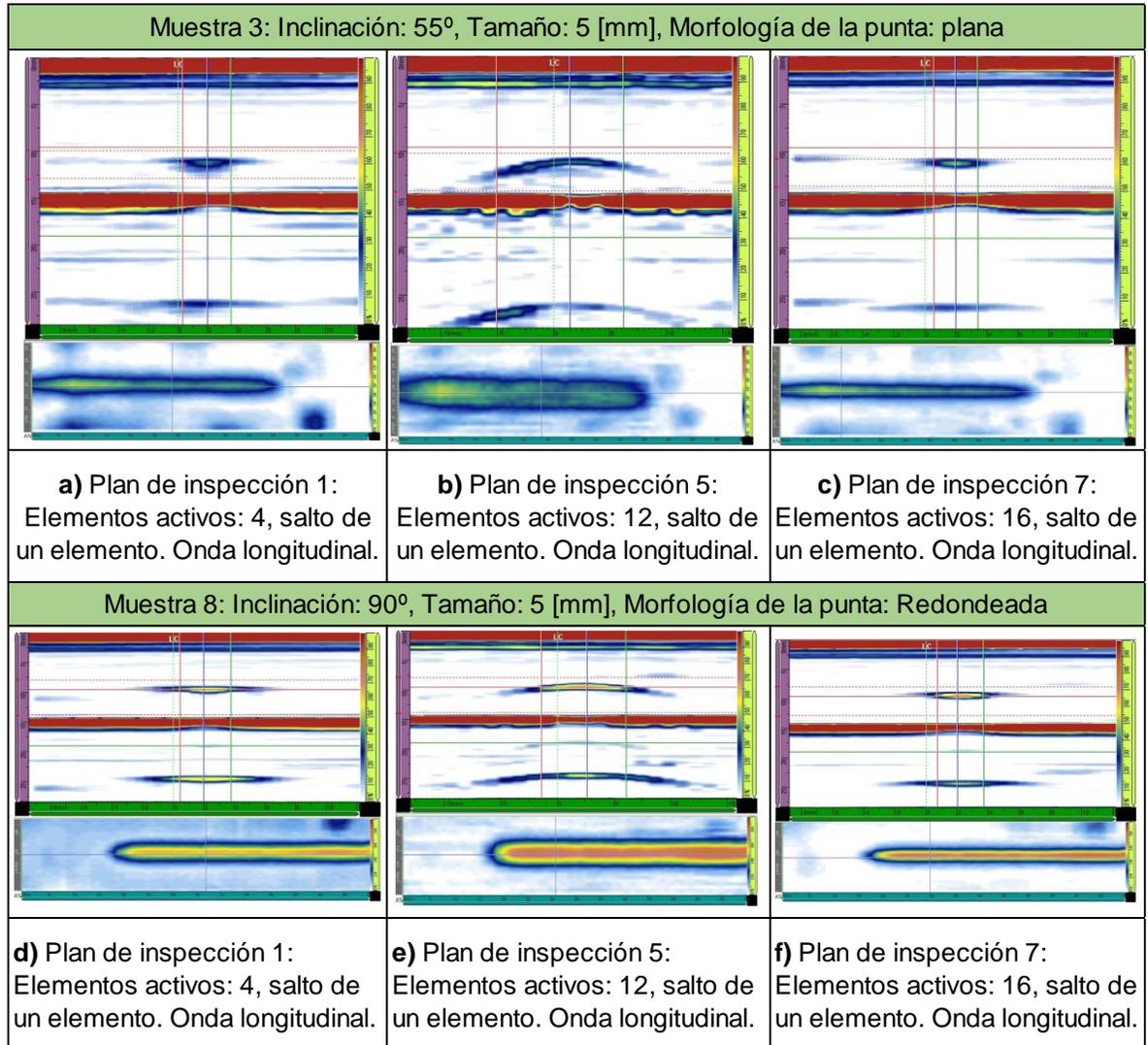
Los resultados presentados en las figuras 35c y 35d que fueron obtenidos con “skew” 90°, en donde el haz ultrasónico incide perpendicularmente respecto a la discontinuidad, al ser comparado con las figuras 35e y 35f obtenidas con “skew” 270°, muestran la gran sensibilidad para detectar y caracterizar dimensionalmente la discontinuidad. El comportamiento anterior se debe a la forma como se genera el barrido con un ángulo fijo y no ocurre en los planes de inspección con patrón de barrido S-scan.

**Figura 35.** Visualizaciones E-scan y C-scan con onda transversal.



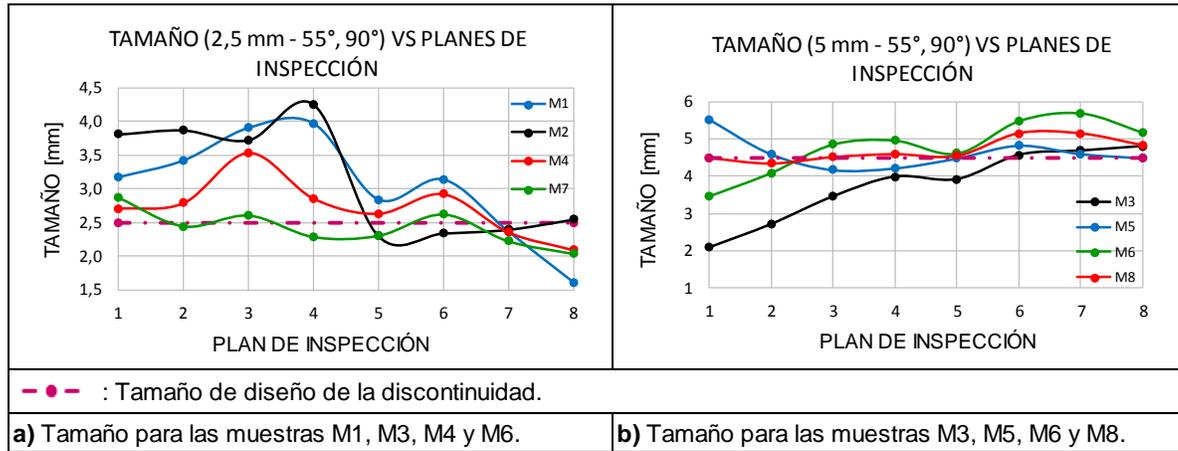
En la figura 36 se muestran las visualizaciones E-scan y C-scan para las muestras M3 (tamaño de discontinuidad de 5 [mm], inclinación de 55° y punta plana) y M8 (tamaño de discontinuidad de 5 [mm], inclinación de 90° y punta redondeada). Los resultados de la muestra M3 presentados en las figuras 36a, 36b y 36c, permiten evidenciar que la indicación presentada con 12 elementos activos se deforma la indicación, ocasionando un porcentaje de error 106,5%. En la visualización E-scan, se observa una franja roja en la mitad, la cual corresponde al eco de pared posterior de la placa, y justo en la parte superior la indicación correspondiente a la discontinuidad evaluada con onda longitudinal presentado en la figura 36.

**Figura 36.** Visualizaciones E-scan y C-scan con onda longitudinal.



**Tamaño y amplitud de las señales y PAUT con patrón de escaneo electrónico, onda transversal.** En la figura 37a se grafican las curvas de los valores promedio para los tamaños obtenidos con PAUT empleando onda transversal, en las muestras con discontinuidad de 2,5 [mm] (M1, M2, M4 y M7), con inclinación de 55° y 90°, con ondas transversales. En la figura 37b se observan las curvas de los valores promedio de los tamaños obtenidos con PAUT, para las muestras con discontinuidad de 5 [mm], con inclinación de 55° y 90° (M3, M5, M6 y M8).

**Figura 37.** Tamaño para E-scan empleando onda transversal



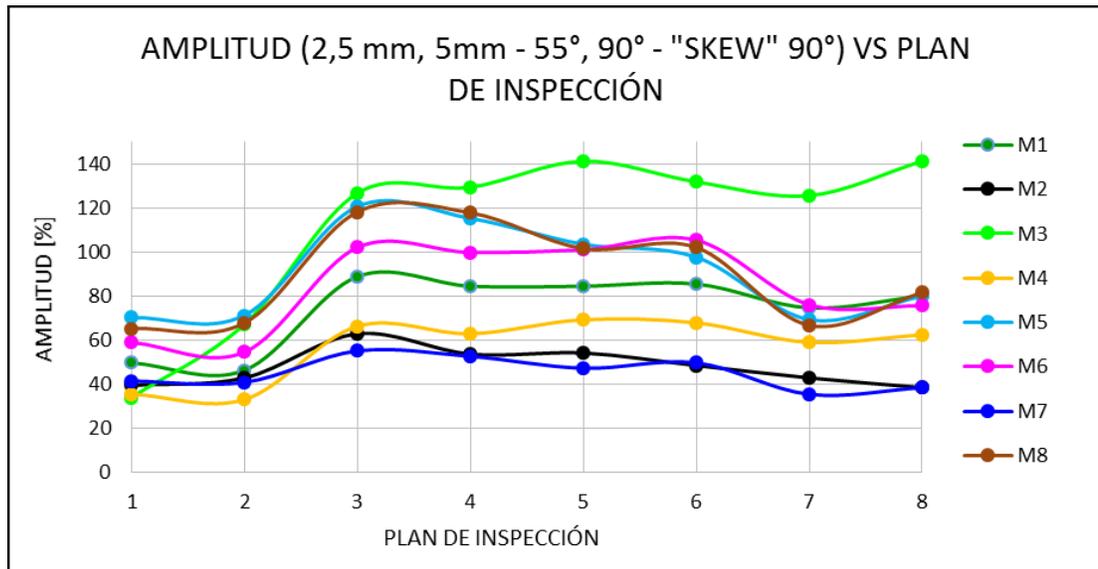
Las curvas de la figura 37 muestran que al aumentar el número de cristales activos (tamaño virtual del palpador) desde el plan de inspección 1 hasta el 8, el tamaño medido de la discontinuidad se acerca más al valor de diseño, obteniendo los mejores resultados en el plan de inspección 7 con un error máximo de 12% para la muestra M7 (ver figura 37a) y con el plan de inspección 8 alcanzando un error máximo de 10% para el plan de la muestra M6 (ver figura 37b). De lo anterior se concluye que es favorable emplear un tamaño de palpador grande, (16 cristales activos), en este sentido, los resultados anteriores están totalmente relacionados con la figura 38, donde la amplitud de las señales para las ocho muestras presenta una tendencia a aumentar con el aumento del número de cristales activos, los cuales permiten afirmar que el aumento del número de cristales activos con barrido E-scan generan una amplitud de las señales mayor debido a que se refleja mayor energía de la discontinuidad, comportamiento que mejoró la exactitud en las mediciones.

Las curvas de las muestras M7 y M8 en las figuras 37a y 37b presentan la mayor cantidad de mediciones exactas para los planes de inspección evaluados. Estas muestras se caracterizan por tener una inclinación mecanizada 90° y punta redondeada, lo cual indica que probablemente la punta redondeada permite definir

el límite de la discontinuidad con mayor exactitud, aspecto no reportado en la bibliografía consultada.

Se observó al comparar las curvas de las muestras M2-M7 y M5-M8, las cuales presentan modificación únicamente de la morfología de la punta, un comportamiento diferente indicando que la punta plana tiene un efecto marcado sobre las mediciones aumentando el porcentaje de error, sin embargo, en la figura 38 la muestras M2-M7 y M5-M8 presentan valores de amplitud muy cercanos. El comportamiento descrito permite concluir que pueden obtenerse valores de amplitud de las señales similares indicando una reflexión de energía igual, pero por efecto de reflexión obtener resultados más exactos para la punta plana e inclinación de 90°. De la figura 38 se concluye que existe un efecto del tamaño real de la discontinuidad en la amplitud de las señales, presentando mayor amplitud las obtenidas en las muestras M3, M5, M6 y M8; y una mayor amplitud para las muestras con ángulo mecanizado de 55° como la muestra M1 y M4.

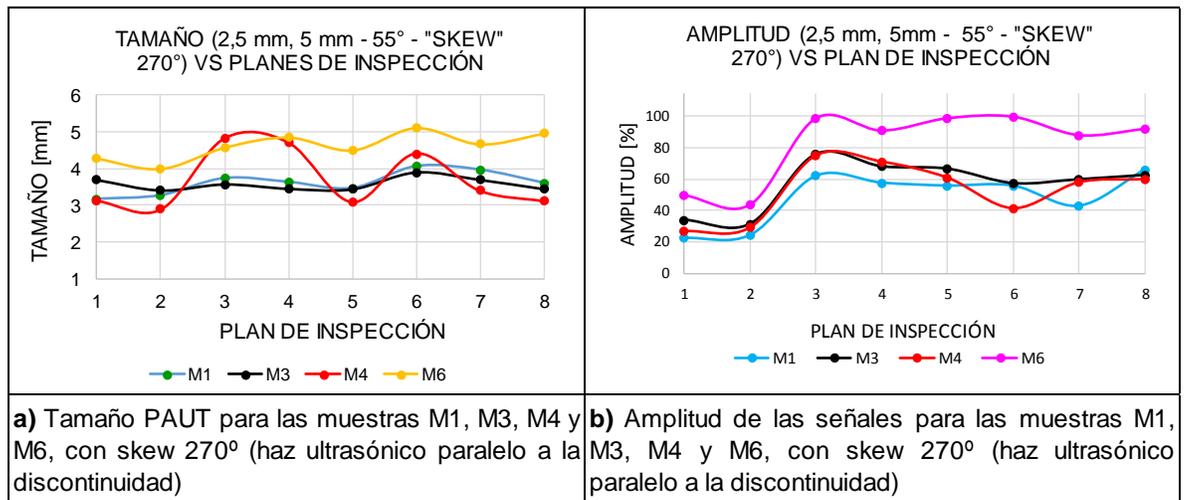
**Figura 38.** Resultados de amplitud de las señales para las ocho muestras.



En la figura 38 se observa la influencia de la inclinación de la discontinuidad al comparar las muestras M1 y M2, obteniendo una amplitud de casi el doble para la muestra con inclinación de 55°. El comportamiento anterior también se observa al comparar las muestras M4-M7 y M3-M5, resultados de los cuales se concluye que la mayor amplitud obtenida se presenta para las muestras mecanizadas con inclinación de 55°

En las figuras 39a y 39b se presentan las curvas de los valores promedio de tamaño y amplitud de las señales para los ocho planes de inspección realizados a las muestras de discontinuidad de 55°, (muestras M1, M3, M4 y M6), inspeccionadas con “skew” de 270°.

**Figura 39.** Resultados de tamaño y amplitud para las muestras M1, M3, M4 y M6.



La detección y medición de las discontinuidades inclinadas a 55° e inspeccionadas con skew 270° presentó errores en el dimensionamiento mínimo de 1,4% y máximo de 74% para la muestra M6 y barrido E-scan presentado en la figura 39a. Así mismo los valores de amplitud de las señales registrados en la figura 38b presentaron valores de amplitud que se incrementan al aumentar el tamaño del palpador al activar desde cuatro cristales hasta dieciséis cristales.

De la figura 39 se puede concluir que las discontinuidades mecanizadas a 55° fueron detectadas y dimensionadas con una mayor exactitud que el barrido sectorial. En este sentido se presentó un promedio del porcentaje de error de 23,2% respecto al promedio de error del barrido sectorial con valor de 33,7%. Lo anterior indica que este patrón de barrido detecta y dimensiona aceptablemente la discontinuidad cuando es el caso más desfavorable de inspección. En la figura 39b se observa un comportamiento de la amplitud similar al presentado en la figura 38, acrecentado con el aumento del número de cristales activos (tamaño virtual del palpador), alcanzando valores de amplitud superiores a los presentados en el patrón de barrido sectorial. Las visualizaciones presentadas en la figura 35e y 35f permiten observar la detección de la discontinuidad.

**Análisis estadístico para los resultados del escaneo electrónico E-scan y onda transversal.** A continuación, se presenta el análisis estadístico de los resultados de tamaño PAUT y amplitud de las señales a partir de los gráficos de Pareto y de efectos principales para el barrido E-scan con onda transversal. En las figuras 40a y 40b se encuentran los diagramas de Pareto estandarizado y en las figuras 40c y 40d se grafican los efectos principales de cada factor sobre la variable de respuesta para el patrón de escaneo E-scan con onda transversal.

Según el análisis estadístico realizado para un intervalo de confianza del 95%, en el diagrama de Pareto de la figura 40 ningún factor presentó influencia significativa sobre el tamaño medido con PAUT. En la figura 40b el análisis de Pareto para la amplitud de las señales indica un efecto positivo por parte del tamaño real, el número de elementos y la interacción de la inclinación con el tamaño. Este efecto positivo genera que al aumentar el tamaño real de la discontinuidad y el número de elementos la amplitud de la señal aumente (ver figura 37 y 38); por otra parte, con efecto negativo, la interacción doble del número de elementos, de la inclinación, el número de elementos con la inclinación y la inclinación con la morfología. El efecto positivo del número de elementos en el diagrama de Pareto de la figura 40b,

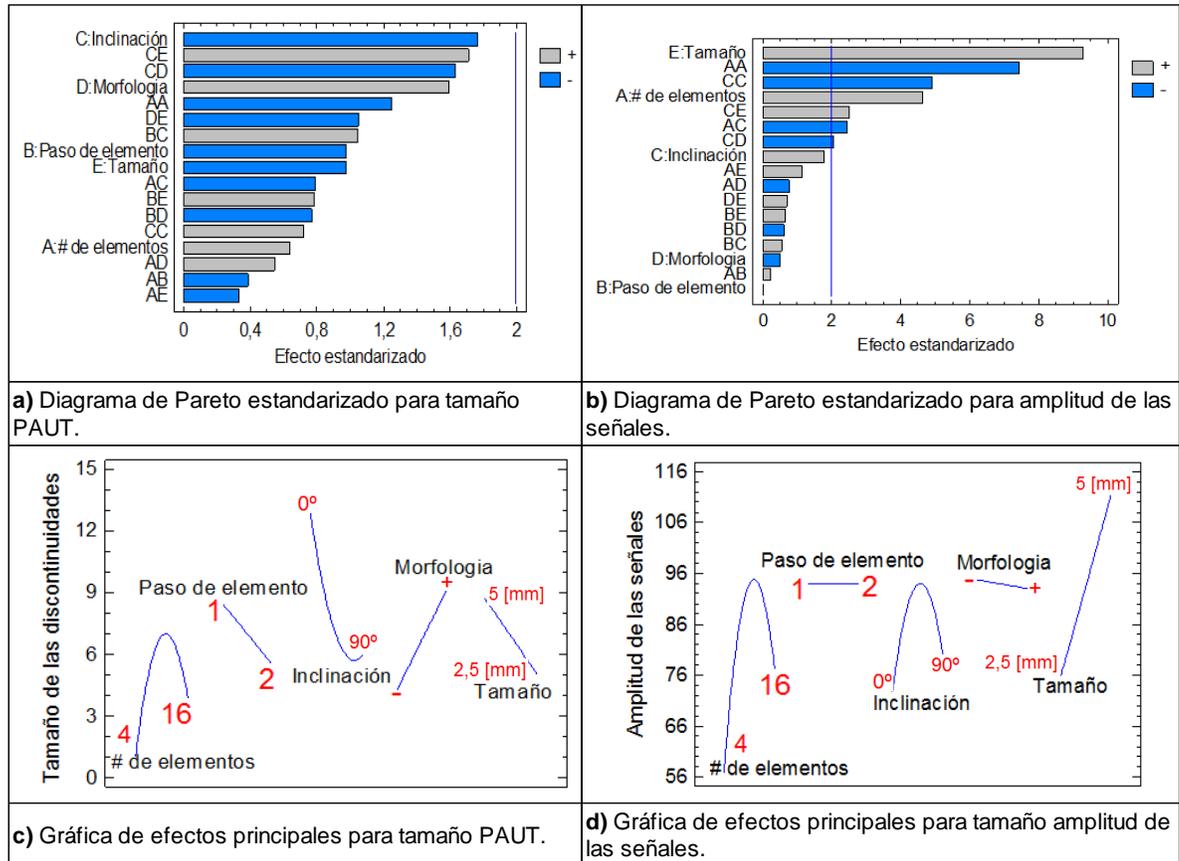
significa que al incrementar el número de elementos activos de 4 a 16, la exactitud de las mediciones mejora.

De la figura 40c se obtiene la combinación de los niveles con mayor y menor efecto para cada factor sobre las variables de respuesta. La combinación de 16 elementos activos, salto de dos elementos, inclinación de 90°, morfología plana y tamaño de 2,5 [mm], presentan el menor efecto y corresponde a la medición de la muestra 2 y plan de inspección 8, produciendo un error de solo 4.7%. El resultado anterior se observa en la figura 37a, con el plan de inspección ocho.

El efecto positivo del tamaño real de la discontinuidad en el diagrama de Pareto de la figura 40b indica que aumenta el valor de amplitud de las señales, comportamiento que se verifica en las curvas de las muestras M3, M5, M6 y M8 de 5 [mm] de tamaño (ver figura 38). Además, las gráficas correspondientes al tamaño de la indicación presentan curvas con una mayor exactitud de las mediciones donde más se acercan a la línea violeta horizontal que representa el tamaño de diseño de 5 [mm], (ver figura 37b). Del análisis estadístico se puede concluir que el efecto positivo del tamaño mecanizado al aumentar de 2,5 [mm] a 5 [mm] y el número de elementos de 4 a 16, aumenta la amplitud de las señales y la exactitud de las mediciones dimensionales, aspectos que se verifican en la figura 37b y 38.

**Tamaño PAUT y amplitud de las señales y con patrón de escaneo electrónico, onda longitudinal.** En la figura 41a se grafican las curvas de los valores promedio para los tamaños obtenidos con PAUT empleando onda longitudinal para las muestras con discontinuidad de 2,5 [mm] (M1, M2, M4 y M7), con inclinación de 55° y 90°; y en la figura 41b las curvas de los valores promedio de los tamaños obtenidos con PAUT, para las muestras con discontinuidad de 5 [mm], con inclinación de 55° y 90° (M3, M5, M6 y M8).

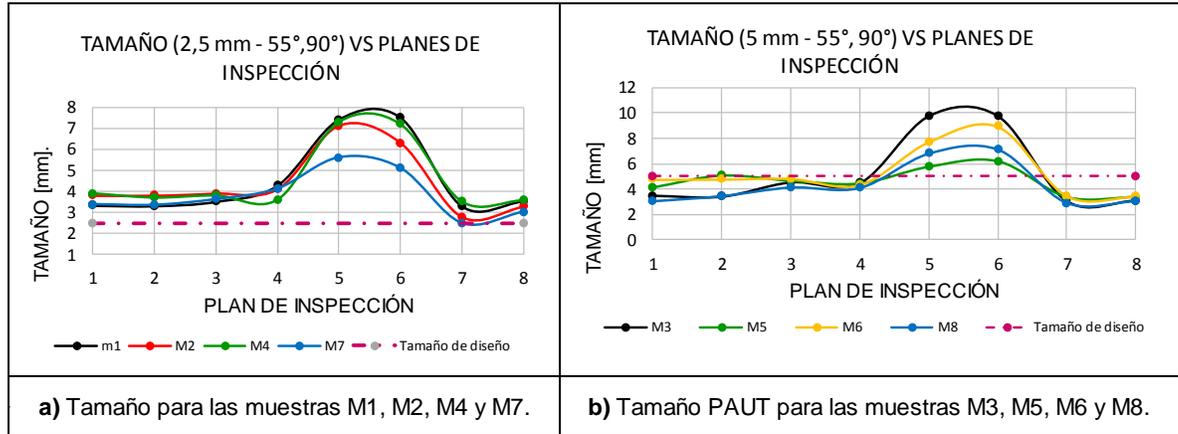
**Figura 40.** Diagrama de Pareto estandarizado y de efectos principales para E-scan con onda transversal.



De las curvas 41a y 41b se concluye que la tendencia es igual para los ocho planes de inspección, sin presentar un efecto significativo excepto para los planes 5 y 6 caracterizados por tener 12 elementos activos, el cual generó un aumento elevado del tamaño medido, normalizándose al pasar a 16 elementos activos, el comportamiento anterior no se ve reflejado en los valores de amplitud presentados en la figura 42 para los planes de inspección 5 y 6. El sobredimensionamiento de los planes de inspección 5 y 6 se presentó en todas las muestras y el diagrama de Pareto indica que la interacción doble del número de elementos presenta la mayor influencia sobre los resultados del tamaño PAUT. Las mediciones anteriores fueron repetidas verificando la calibración, la frecuencia de repetición de pulso, la energía

de la onda, el filtro pasa banda, el filtro de video activo y rechazo de 0%, presentándose el mismo comportamiento descrito.

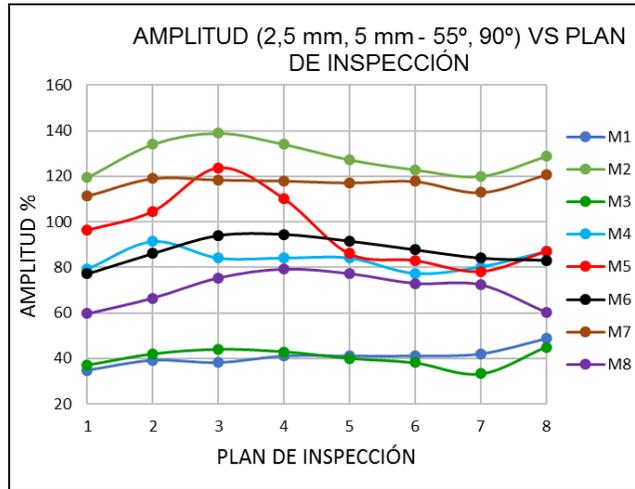
**Figura 41.** Tamaño para E-scan angular y onda longitudinal.



Las curvas de las figuras 41 presentan resultados aproximados para todas las muestras, con porcentajes de error desde 27% para el plan de inspección 3 hasta valores de 126% para el plan de inspección 5. Es de anotar, que el plan de inspección 7 presentan una alta exactitud en el dimensionamiento de las discontinuidades de 2,5 [mm] y los planes de inspección 4 y 3 para las discontinuidades de 5 [mm]. Los anteriores planes se caracterizan por tener 8 y 16 cristales activos mientras que en la figura 42 los valores de amplitud no presentan una tendencia clara de aumentar la amplitud para las muestras con inclinación de 55°.

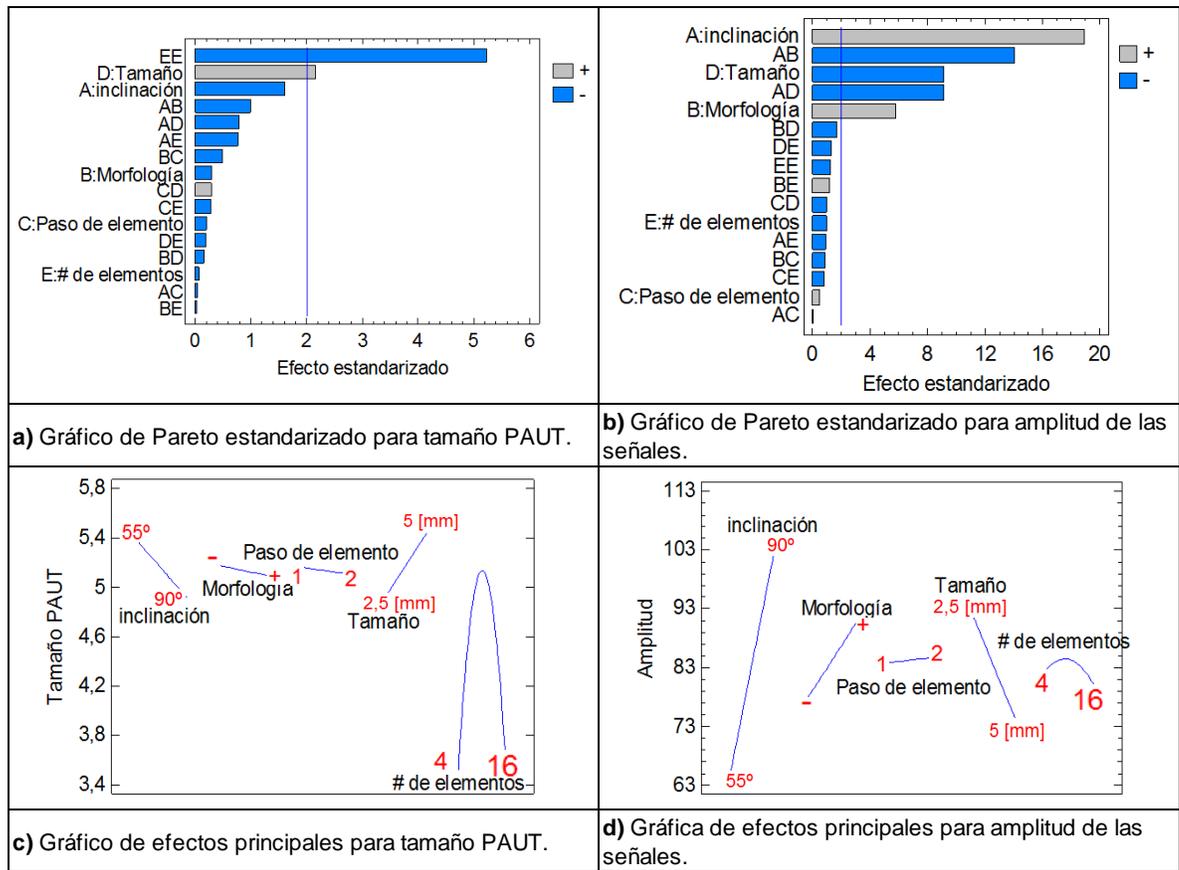
**Análisis estadístico para los resultados del escaneo electrónico con onda longitudinal.** En las figuras 43a y 43b se encuentran los diagramas de Pareto estandarizado y en las figuras 43c y 43d se grafican los efectos principales de cada factor sobre la variable de respuesta para el patrón de escaneo E-scan con onda longitudinal.

**Figura 42.** Amplitud para E-scan y onda longitudinal.



De la figura 40c se obtiene la combinación de los niveles con mayor efecto sobre el tamaño de la discontinuidad medido con PAUT. El máximo efecto se presentó para una inclinación de  $55^\circ$ , morfología plana, salto de un elemento, tamaño de 5 [mm] y 12 elementos activos. Esta combinación corresponde al plan de inspección 5 de la figura 41b en el cual se obtiene un porcentaje de error de 91%, este resultado indica que la combinación de factores con mayor efecto arroja mediciones con alto porcentaje de error. Se resalta, que este alto porcentaje de error no depende de las características de la muestra porque para todas las muestras inspeccionadas con 12 elementos activos se registraron altos porcentajes de error en el dimensionamiento, comportamiento no registrado en las mediciones de amplitud. Es preciso indicar, que el barrido E-scan con onda longitudinal presenta porcentajes de error promedio en el dimensionamiento para todas las muestras de 29%, indicando mayor exactitud para la combinación de efectos con menor influencia.

**Figura 43.** Diagrama de Pareto estandarizado y de efectos principales para E-scan con onda longitudinal.



En la tabla 22 se presentan los porcentajes de error de cada plan de inspección E-scan para todas las muestras de estudio. El porcentaje de error fue calculado con base en las dimensiones de referencia de cada muestra, las cuales fueron medidas con microscopía óptica y presentadas en la tabla 15. En la columna final de la tabla 22 se resaltó en color verde los menores porcentajes de error promedio, concluyendo que para las ondas transversales el porcentaje de error tiende a disminuir al aumentar el número de cristales activos (tamaño virtual del palpador), obteniendo el máximo porcentaje de error de 24,4% para cuatro elementos activos. Para las ondas longitudinales, el porcentaje de error no tuvo una tendencia; sin embargo, para doce cristales activos presentó un aumento del porcentaje de error.

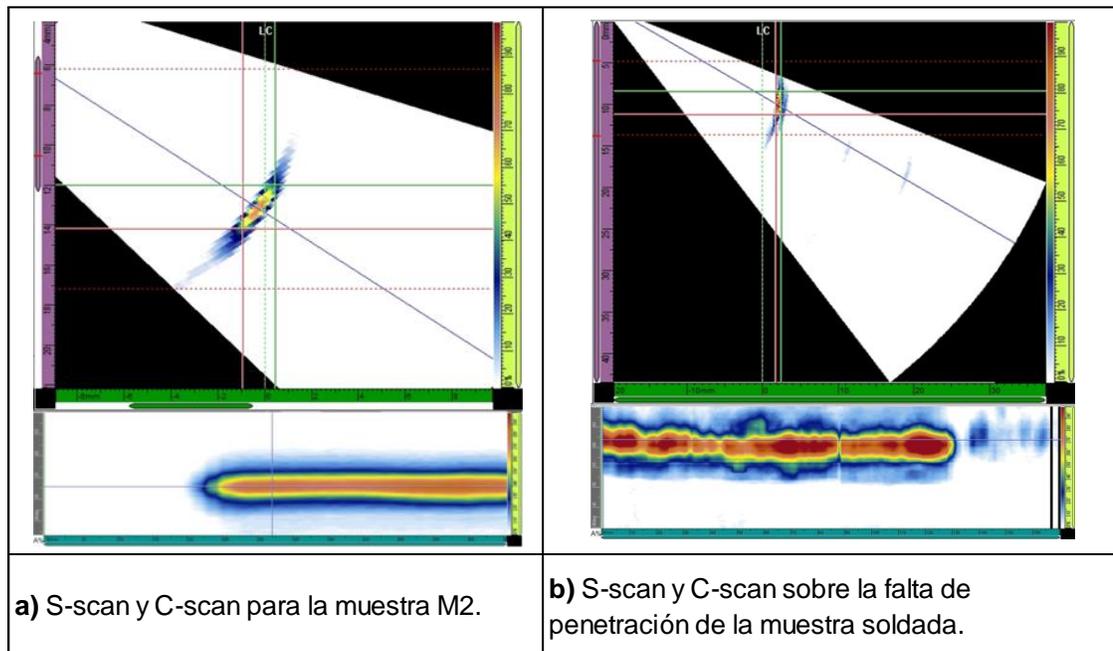
**Tabla 22.** Valores de porcentaje de error para todos los planes de inspección E-scan.

PATRÓN DE ESCANEO ELECTRÓNICO E-SCAN CON ONDA TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL															
Tipo de onda	Elementos activos	Salto de elemento	Error experimental para discontinuidades de 5 [mm], 90°.		Error experimental para discontinuidades de 5 [mm], 55°.		Error experimental para discontinuidades de 2,5 [mm], 55°.		Error experimental para discontinuidades de 2,5 [mm], 90°.		Error experimental para discontinuidades de 5,[mm], 0° .		Error experimental para discontinuidades de 2,5 [mm], 0°.		Promedio
			Morfología		Morfología		Morfología		Morfología		Morfología		Morfología		
			Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada	
OT	4	1	11,0	28,9	59,2	31,2	15,9	2,1	56,4	17,1	27,7	15,1	15,6	13,1	24,4
OT	4	2	7,6	16,1	47,0	18,8	25,0	0,9	58,9	0,1	32,8	20,7	19,3	4,6	21,0
OT	8	1	16,1	0,4	32,5	3,6	42,8	27,9	52,9	6,5	8,4	9,2	36,2	74,0	25,9
OT	8	2	15,2	1,8	22,1	1,4	45,1	3,3	74,7	6,5	6,8	3,8	32,4	69,9	23,6
OT	12	1	10,0	5,3	23,4	8,3	3,7	4,8	5,6	5,8	25,9	10,7	26,3	11,8	11,8
OT	12	2	3,2	12,5	10,7	8,9	14,6	5,6	3,9	7,1	7,2	1,3	48,0	59,2	15,2
OT	16	1	7,7	16,7	8,5	13,0	13,7	14,8	1,7	9,1	21,3	7,4	44,5	22,8	15,1
OT	16	2	9,9	6,1	6,1	2,7	41,2	24,4	4,5	16,7	21,3	1,8	31,6	12,7	14,9
OL	4	1	17,1	37,8	32,1	5,6	21,6	41,1	56,1	36,7					31,0
OL	4	2	1,5	29,4	33,6	5,3	20,8	33,9	56,1	35,4					27,0
OL	8	1	6,7	15,3	11,4	4,3	28,3	37,5	60,2	46,3					26,2
OL	8	2	10,7	16,0	12,7	13,9	56,1	30,2	68,4	66,5					34,3
OL	12	1	15,4	40,2	91,0	53,4	170,2	164,1	191,6	126,1					106,5
OL	12	2	23,9	46,7	90,8	77,4	173,8	160,5	158,7	105,9					104,7
OL	16	1	32,0	40,7	40,6	31,3	20,8	27,2	15,0	0,9					26,1
OL	16	2	31,9	37,7	39,7	32,3	28,9	29,2	34,5	22,1					32,0

**4.3.4 Resultados sobre muestra soldada.** Siguiendo el planteamiento metodológico, se inspeccionó la muestra soldada presentada en la figura 45, la cual tiene falta de penetración. En esta muestra se emplearon los quince planes de inspección sectorial S-scan con ondas transversales.

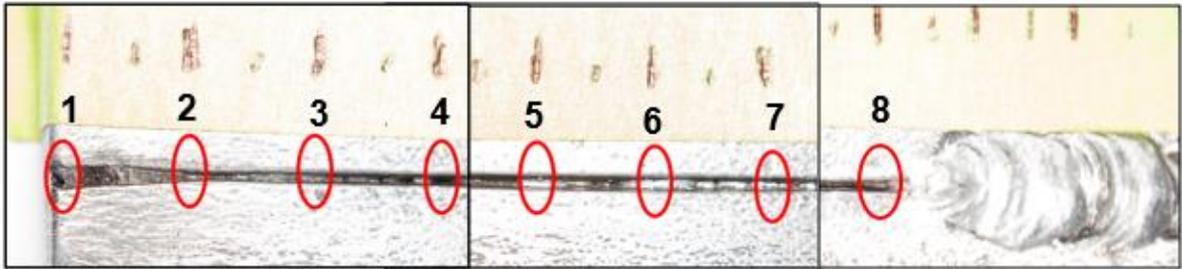
En la figura 44 se observa la diferencia entre las visualizaciones de la discontinuidad mecanizada en la muestra M2 y la falta de penetración de la muestra soldada. La figura 44a presenta la visualización C-scan de muestra mecanizada, sin variaciones de tamaño a lo largo de la discontinuidad, mientras que en la figura 44b se muestra una indicación con ancho y color variables en la visualización C-scan, debido a que el proceso de soldadura fue de tipo manual y presenta tamaño variable a lo largo del defecto.

**Figura 44.** Visualizaciones S-scan y C-scan para la muestra M2 y soldada.



En la figura 46 se presentan los resultados obtenidos en las muestras M2 y M7 con discontinuidades mecanizadas y las mediciones realizadas en diferentes puntos de la falta de penetración, como se indica en la figura 45.

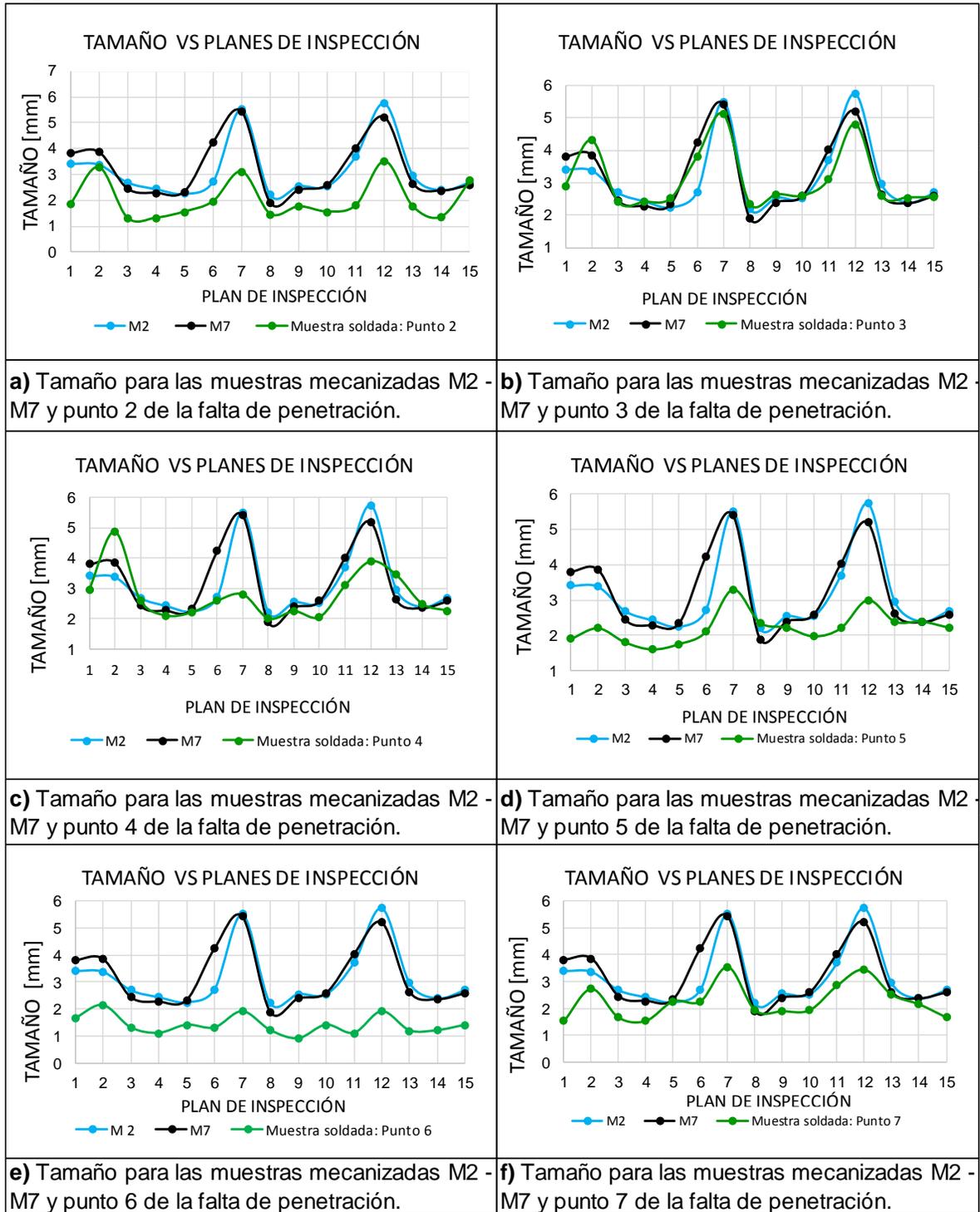
**Figura 45.** Puntos donde se realizaron las mediciones con el microscopio



En las figuras 46 se observa un comportamiento similar de los resultados del defecto real respecto a las discontinuidades mecanizadas, obteniendo variaciones con la misma tendencia a lo largo de los quince planes de inspección de PAUT. En los planes de inspección 7 y 12 se presentó el mismo comportamiento, en los cuales se sobredimensiona el tamaño obtenido mediante Phased Array alejándose del valor real hasta en un 58%. El comportamiento anterior fue observado en las muestras mecanizadas y probablemente se presentó este fenómeno por la divergencia del haz ultrasónico.

Los resultados obtenidos en la muestra real, presentan comportamiento igual respecto a los resultados obtenidos en las muestras mecanizadas obteniendo sobredimensionamiento en los planes de inspección con focalización en 3 [mm] de profundidad.

**Figura 46.** Resultados de tamaño para la muestra soldada y las muestras M2-M7.



Las observaciones anteriores permiten concluir que se presenta una relación en las curvas de los valores promedio de tamaño medido de las discontinuidades de las muestras mecanizadas M2 y M7 y la discontinuidad real, la cual corresponde a una falta de penetración generada en un proceso de soldadura. Los resultados anteriores también fueron obtenidos por Paritosh Nanekar<sup>110</sup> en su investigación, en la cual empleando placas de acero inoxidable con discontinuidades planares mecanizadas y defectos reales generados en procesos de soldadura, inspeccionados con ultrasonido Phased Array y palpadores con arreglo lineal.

---

<sup>110</sup> PARITOSH, Nanekar, KUMAR, Anish, y JAYAKUMAR T. Characterization of planar flaws by synthetic focusing of sound beam using linear arrays. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2015: 9-14.

## 5. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de la presente investigación, la cual estuvo dirigida hacia la estimación mediante la técnica de ultrasonido con arreglo de fases (Phased Array Ultrasonic Testing PAUT) del tamaño de discontinuidades planares con diferentes características geométricas, las cuales fueron inducidas artificialmente y bajo las condiciones de experimentación establecidas, se puede concluir que:

La caracterización dimensional de las muestras elaboradas empleando microscopía óptica permitió obtener el tamaño de referencia para cada discontinuidad inducida, alcanzando una variación del tamaño entre 10,6% y 0,9% para las discontinuidades pequeñas y entre 3% y 0,4% para las discontinuidades grandes. El ancho de las discontinuidades medido fue de 1,40 [mm] en promedio, con desviación estándar de 2,2%.

A partir de la caracterización con microscopía óptica de las discontinuidades se reveló que la morfología mecanizada en las muestras M1, M2, M3 y M5 no presentaron una forma totalmente plana, obteniéndose una curvatura en los vértices, con radios entre 0,177 [mm] y 0,257 [mm], aspecto que probablemente influyó en los resultados de PAUT.

El barrido sectorial S-scan con onda transversal presentó el menor porcentaje de error promedio para todas las muestras con los planes de inspección con una profundidad de focalización de 12 [mm], distancia ubicada al final del campo cercano, demostrando que las mediciones de las discontinuidades con focalización electrónica al final del campo cercano presentan la mayor exactitud. Además, el segundo menor porcentaje de error promedio para todas las muestras se obtuvo

para los planes de inspección sin focalización electrónica, lo cual permite concluir que al final del campo cercano se presenta una concentración de energía para sistemas de Phased Array.

Para las condiciones de operación y morfología de las muestras el mayor porcentaje de error fue presentado en el barrido sectorial con onda transversal para los planes de inspección focalizados en 3[mm] de profundidad, concluyendo que focalizar el haz ultrasónico en profundidades pequeñas respecto a la discontinuidad genera errores promedio de hasta 58,5% debido posiblemente a la divergencia del haz ultrasónico.

Los valores de resolución angular y profundidad de focalización aplicados en los quince planes de inspección del escaneo sectorial, junto a las variables de las discontinuidades presentaron efecto sobre los resultados de tamaño de la discontinuidad medida empleando PAUT, con porcentajes de error entre 0.2% y 119,4%, lo cual indicó que el sistema puede alcanzar valores de exactitud altos y bajos al modificar estas variables, además, no se cuenta con modelos que permitan definir un plan de inspección ideal para cada aplicación industrial requerida.

El patrón de barrido electrónico E-scan con onda transversal presentó una tendencia a mejorar la exactitud para todas las muestras al aumentar el número de cristales activos de 4 a 16 elementos del tamaño del palpador debido a la mayor cantidad de energía transmitida y reflejada, la cual se observó en el aumento de amplitud de la señal para los planes de inspección con mayor cantidad de cristales activos con un porcentaje de error promedio de 11,8%.

Para las condiciones de la investigación y dimensiones de las muestras hubo combinaciones de variables de ultrasonido que presentaron porcentajes de error

muy elevados, como el plan de inspección electrónico E-scan con onda longitudinal, 12 elementos activos y salto de un elemento, con promedio de error de 106,5%, por otra parte, para el plan de inspección S-scan con onda transversal y profundidad de focalización de 3 [mm] con promedio de error de 58,5%.

El porcentaje de error promedio empleando onda transversal en el dimensionamiento de las discontinuidades presentó porcentaje de error promedio de 19% para el barrido electrónico y 30,6% para el barrido sectorial. Además, el dimensionamiento de discontinuidades mecanizadas a 55° y empelando “Skew” 270° un porcentaje de 23,2% para barrido E-scan y 33,7% para el barrido S-scan. Lo anterior se presenta probablemente por la forma de generar el barrido electrónico con un ángulo fijo, mejorando la exactitud, mientras que en el barrido sectorial al ser realizada la inspección con múltiples ángulos la exactitud disminuye.

Los tamaños obtenidos con PAUT en la discontinuidad real generada en un proceso de soldadura presentan una relación con los resultados obtenidos en las muestras M2 y M7 mecanizadas a 90° al ser inspeccionados con los mismos planes de inspección y en las mismas condiciones de medición porque las curvas de los valores promedio presentan el mismo comportamiento al ser inspeccionadas con los quince planes de inspección.

## 6. RECOMENDACIONES

Concluida la presente investigación se recomienda:

- Continuar la investigación empleando otros tipos de palpadores de Phased Array con arreglos lineales de mayor número de elementos y diferentes a estos últimos, con el fin de estimar la influencia de las variables de las discontinuidades planares.
- Realizar investigaciones con diferentes tipos de discontinuidades mecanizadas y reales, con el fin de diseñar patrones de calibración para palpadores con arreglos lineales y de otros tipos.
- Utilizar software de simulación que puedan tener en cuenta los resultados obtenidos para predecir y entender el comportamiento del haz ultrasónico en la pieza inspeccionada.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABRIL, Sergio., CONTRERAS., Juan, QUINERO, Luz. Determinación del estado actual del tramo colector principal del sector sur (pc44 - estación separadora) del campo escuela colorado-uis mediante ensayos no destructivo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013.
- 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. Process piping. Two Park Avenue New York, NY 10016-5990. ASME, 2012.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessels Code. New York: ASME, 2013.
- \_\_\_\_\_ “ASTM 2700 - 09: Standard Practice for Contact ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays”, ASTM 2009.
- \_\_\_\_\_ “ASTM E 18 - 16: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials”, ASTM 2016.
- \_\_\_\_\_ “ASTM E 3 - 11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, ASTM 2011.
- \_\_\_\_\_ “ASTM E 3 - 15: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”, ASTM 2015.
- \_\_\_\_\_ “ASTM E112 - 13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”, ASTM 2013.
- \_\_\_\_\_ “ASTM E45 - 13: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel”, ASTM 2013.
- \_\_\_\_\_ ASTM E2700-14., Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays. ASTM 2015.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Welding of pipelines and related facilities. Washington, API Publishing Services. API, 2013.
- ARMITT, Tim., Lavender International NDT, y Sheffield. Phased Arrays Not The Answer To Every Application. ECNDT Proceedings - We.3.1.3, 2006. p. 1-15.
- BANNOUF, Souad., LONNE, Sébastien., FOUCHER, Fabrice., y CHAPPAZ, Laetitia. Simulation study to improve the detection of planar defects located under shrinkage cavities. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Czech Republic, 2014.

- CHINOME, Ivan., PABON, Diego., QUINTERO, Luz., y HERRERA, Julian. Elaboración de muestras soldadas en t empleando tubería, para su evaluación mediante ensayos no destructivos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2015.
- CIORAU, Peter., POGUET, Jerome., PULLIA, Lou., LAM, Jessica., EATON, Chris., y COULAS, Jason. A contribution to outer surface crack height sizing by paut. 2012. p. 441-448.
- CRUZ, Ricardo., QUINTERO, Luz., EXPINOSA, Elkin., y GALÁN, Carlos. Evaluación de ensayos no destructivos para identificar deterioro en puentes de concreto. Revista Colombiana de Materiales, 2013. p. 55-60.
- CRUZ, Ricardo., QUINTERO, Luz., y HERRERA, Julián. Evaluación del efecto de barras de refuerzo en concreto sobre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico (vpu). Revista Colombiana de Materiales, 2013. p. 107-113.
- DIETER, George, y BACON, David. Mechanical metallurgy. Tervera edicion. London: McGraw-Hill, 1988.
- DUPONT, F. Characterization of small defects using total focusin method. 11th European Conference on Non-Destructive Testing ECNDT, 2014. p. 1-6.
- DUXBURY, David., RUSSELL, Jonathan., y LOWE, Michael. The effect of variation in phased array element performance. Ultrasonics 53 (2013). p. 1065-1078.
- GINZEL, Eduard., y JOHNSON, D. Phased-Array Resolution Assessment Techniques. The e-Journal of Nondestructive Testing, 2008.
- GINZEL, Ed., EKHLAS, Golshani., y Brown B. Near Field Length Compensation Options. The e-Journal of Nondestructive Testing 19 (2014): 1-18.
- GINZEL, Edward., y STEVE, James. Variables to consider in the fabrication of ultrasonic reference blocks. The e-Journal of Nondestructive Testing 19 (2014).
- GRUBER, G., y WATSON, P. Fabrication of performance demonstration initiative specimens with controlled flaws. Proceedings on 13th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries. 1995. p. 167-176.
- GTC-110, ICONTEC. Guía para la inspección visual de soldaduras GTC 110. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2004.
- JÉRÔME, Poguet., y CIORAU, Peter. The Influence of PAUT Parameters on Crack Height, Location and Pattern and Height Sizing. Proceedings 8th Int. Nucl. NDE Conf.-paper Th. 3.B.2 15 (2010).

- JOCHEN, Kurz., JÜNGERT, Anne., DUGAN, Sandra., DOBMANN, Gerd., y BOLLER, Cristian. Reliability considerations of NDT by probability of detection. *Engineering Failure Analysis* 35 (2013). p. 609-617.
- JORMA, Pitkaen., OY, Posiva., LAUKKANEN, Anssi., MIKA, Kemppainen., y IIKKA, Virkkunen. Effect of stress on ultrasonic response in detection and sizing of cracks. *EC NDT - Materials Testing* 49 (2006). p. 299-309.
- JUEZ, José,, y CAMBERO, Inocente. Manual de técnicas para la conformación mecánica. España: Universidad de Extremadura, 2009.
- KASS, Daniel,, MOLES, Michael,, y NELLIGAN, Tom. Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications. Canada: Olympus NDT, 2010.
- LAZZARI, Olivier., RANÇOIS, Deneuvillef., y BISIAUX, Bernard. Simulation of the probability of detection of a flat-bottom hole within a pipe using ultrasounds. 11th European Conference on Non-Destructive Testing ECNDT, 2014.
- LIKKA, Virakkunen., MIENTTINEN, Kaisa., y PACKALÉN, Tapani. Virtual flaws for NDE training and qualification. 11th European Conference on Non-Destructive Testing. Prague Czech Republic: ECNDT, 2014.
- LIKKA, Virkkunen., MIKA, Kerppainen., y PITKAMEN, Jorma. Effect of Crack Opening on UT Response. *EC.NDT*, 2006.
- LIKKA, Virkkunen., y KEMPPAINEN, Mika. Effect of Crack Opening on UT Response. *EC NDT*, 2006. Th.4.4.2.
- MENDOZA, Edward., y QUINTERO, Luz. Diseño de una metodología no destructiva para la captura digital y el dimensionamiento en 3d de discontinuidades externas en tuberías de transporte de hidrocarburos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.
- MIKA, Kemppainen. Realistic artificial flaws for nde qualification - a novel manufacturing method based on thermal fatigue. Espoo: Helsinki University of Technology, 2006.
- MIKA, Kemppainen., y IIKKA, Virkkunen. Crack Characteristics and Their Importance to NDE. *Journal of Nondestructive evaluation*. 2011. p. 143-157.
- MOLES, Michael. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Canada: Olympus NDT, 2007.
- MOLES, Michael, y otros. *Introduction to phased array ultrasonic technology applications*. tercera. Canada: Olympus NDT, 2007.

- NARDONI, G., CERTO, M., y NARDONI, P. Sizing in Phased Array Technique using Diffraction and Amplitude Displacement. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008. p. 1-11.
- NARDONI, G., CERTO, M., y NARDONI, P. Sizing in Phased Array Technique using Diffraction and Amplitude Displacement. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008.
- NARDONI, Certo., FEROLDI, M., POSSENTI, L., FILOSI, A., y CALZONI, Riva. Sizing the height of discontinuities, their Characterisation in planar / volumetric by phased array technique based on diffracted echoes. MENDT. 2010. p. 1-11.
- NARDONI, Certo. Experimental determination of discrimination criteria between volumetric and planar defects by means of ultrasonic pulse echo/phased array technique based on the ratio of diffracted echoes in welding examination. 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012.
- NARDONI, Giuseppe., NARDONI, Pietro., NARDONI, Diego., y NARCO, Feroldi. Zebra and Rainbow Example of Image Quality Standard in TOFD and Phased Array Technique. 11th European Conference on Non-Destructive Testing ECNDT, 2014.
- PARITOSH, Nanekar., KUMAR, Anish., y JAYAKUMAR, T. Characterization of planar flaws by synthetic focusing of sound beam using linear arrays. Nondestructive Testing and Evaluation. 2015. p. 9-14.
- POPOVYCH, Olga., y MAKSYM, Karpash. Signal Processing Approach for Defect Classification Detected Using Ultrasonic Phased Array. 11th European Conference on Non-Destructive Testing - Ecndt, 2014. p. 1-15.
- QUINTERO, Luz., ARCINIEGAS, Javier., y MENESES, Jaime. Análisis de técnicas de inspección no destructiva en tubería flexible con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos. Revista Colombiana de Materiales. 2013. p. 78-85.
- SATYANARAYAN, L., ANISH, Kumar., y JAYAKUMAR, T. Sizing Cracks in Power Plant Components Using Array Based. J Nondestruct Eval, 2009. p. 111-124.
- SATHISH, T., y PATNAIK, M. Evaluation of Stress Intensity Factor of Welded Structural Steel Component. International journal of research in aeronautical and mechanical engineering 1. 2013. p. 1-18.

- TIM, Armitt. Phased Arrays Not The Answer To Every. Proceedings ECNDT, paper We3.1.3 11. 2006.
- TIM, Armitt., CIORAU, Peter., y COULAS, Jason. A contribution to quantifying the sources of errors in paut. NDT.Net, 2012.
- WAITES, C., WHITTLE, J. The estatus os performance demostratrion and evaluation developments. ritish Institute of Non-Destructive Testing, 1998. p. 810-813.
- WIRDELIUS, H., y PERSSON, G. Simulation based validation of the detection capacity of an ultrasonic. International Journal of Fatigue 41 (2012). p. 23-29.
- WIRDELIUS, H., y PERSSON, G. Simulation based validation of the detection capacity of an ultrasonic inspection procedure. International Journal of Fatigue, 2012. p. 12-29.
- WIRDELIUS, H., y OSTERBERG, E. Study of defecto characteristics essential for NDT testins methods ET, UT and RT. Sweden: SKI, 2000.

## ANEXOS

### ANEXO A. TABLAS DE DATOS DE TAMAÑO PAUT Y AMPLITUD DE LAS SEÑALES.

**Tabla 1.** Tamaños PAUT y amplitud de las señales obtenidas con los planes de inspección sectorial S-scan con onda transversal.

TAMAÑOS DE DISCONTINUIDADES OBTENIDOS CON LOS PLANES DE INSPECCIÓN SECTORIAL S-SCAN CON ONDA TRANSVERSAL													
Plan*	M*	M1 [mm]	M2 [mm]	M3 [mm]	M4 [mm]	M5 [mm]	M6 [mm]	M7 [mm]	M8 [mm]	M1*	M3*	M4*	M6*
1		2,8	3,4	2,9	2,6	2,6	2,7	3,8	4,9	2,4	4,0	2,7	1,7
2		3,1	3,4	6,4	4,7	4,7	5,9	3,9	3,0	2,9	3,6	5,3	2,5
3		3,1	2,7	5,3	3,9	2,5	4,7	2,4	2,6	2,8	2,5	2,7	2,3
4		3,1	2,4	5,0	3,6	2,7	4,8	2,3	2,7	2,5	2,5	2,5	2,7
5		3,1	2,2	4,5	3,1	2,9	4,3	2,3	3,0	2,8	2,0	2,9	2,4
6		3,0	2,7	2,9	2,7	4,9	2,6	4,2	4,8	2,5	4,1	2,8	2,8
7		3,6	5,5	7,6	6,1	3,3	7,1	5,4	3,0	4,7	4,2	4,4	4,8
8		2,7	2,2	4,5	3,0	1,8	3,9	1,9	1,9	2,3	1,9	3,1	1,3
9		3,0	2,5	5,4	3,7	2,9	5,4	2,4	2,8	3,2	3,3	3,0	1,3
10		3,0	2,5	4,9	3,4	3,3	4,8	2,6	3,4	3,3	3,8	2,5	2,2
11		2,9	3,7	3,2	2,9	4,7	2,6	4,0	4,9	2,5	4,0	2,8	1,4
12		3,9	5,7	8,1	5,6	3,9	7,1	5,2	4,0	4,8	6,3	4,6	5,8
13		3,2	3,0	5,7	4,1	2,6	5,5	2,6	2,9	3,4	3,8	4,2	2,1
14		3,1	2,4	5,6	3,9	3,2	5,1	2,4	3,2	3,6	3,4	3,9	1,8
15		3,2	2,7	5,3	3,8	4,8	5,0	2,6	3,9	3,5	3,5	3,1	1,0
Amplitud de las señales obtenidas con los planes de inspección sectorial S-scan con onda transversal													
Plan*	M*	M1 [%]	M2 [%]	M3 [%]	M4 [%]	M5 [%]	M6 [%]	M7 [%]	M8 [%]	M1*	M3*	M4*	M6*
1		80,6	64,6	138,0	80,3	80,3	107,7	87,1	117,5	24,5	25,5	29,4	11,3
2		88,2	71,5	94,9	84,2	84,2	86,6	95,9	99,8	31,5	20,5	32,3	15,0
3		91,0	74,4	103,2	77,3	82,2	93,5	79,3	81,3	29,4	26,4	37,2	14,7
4		90,1	68,5	105,7	79,3	81,2	92,5	70,5	77,3	25,5	32,9	34,3	13,5
5		85,1	71,4	116,5	90,0	86,1	101,8	75,3	82,2	36,7	27,4	28,2	12,7
6		94,9	128,2	131,2	78,3	131,2	116,5	93,0	135,1	29,5	27,4	39,2	16,6
7		119,9	113,4	117,3	106,7	130,1	105,7	108,5	148,8	35,3	56,8	46,0	30,3
8		94,9	88,1	97,9	80,3	82,2	91,5	83,2	87,1	34,2	31,5	40,1	12,7
9		82,2	69,5	99,8	71,4	69,5	89,1	71,5	71,5	26,5	24,7	34,3	10,8
10		101,8	89,1	128,2	88,1	87,6	110,6	87,1	88,1	59,7	48,9	78,3	24,5
11		93,0	81,2	119,3	75,3	125,3	109,6	94,9	135,1	29,4	27,4	34,3	16,6
12		115,5	105,7	112,6	124,8	116,5	107,7	107,6	119,9	39,1	49,0	53,8	30,8
13		99,8	91,0	113,5	86,1	89,6	106,7	91,0	90,5	36,2	31,3	41,1	15,7
14		90,0	75,3	102,8	74,4	71,5	93,5	74,4	73,4	30,8	26,2	36,2	11,8
15		89,1	76,3	111,6	74,4	126,3	96,9	75,4	76,3	30,3	25,5	32,3	11,8
*M: Muestra, *Plan: Plan de inspección, M1*, M3*, M4*, M6*: Resultados muestras M1, M3, M4 y M6 con SKEW 270°.													

**Tabla 2.** Tamaños PAUT y amplitud de las señales obtenidas con los planes de inspección sectorial S-scan con onda longitudinal.

<b>AMPLITUD DE LAS SEÑALES Y TAMAÑO DE LAS DISCONTINUIDADES OBTENIDOS CON LOS PLANES DE INSPECCIÓN SECTORIALES S-SCAN CON ONDA LONGITUDINAL</b>						
<b>MUESTRA</b>	<b>AMPLITUD [%]</b>			<b>TAMAÑO [MM]</b>		
	<b>PLAN DE INSPECCIÓN</b>			<b>PLAN DE INSPECCIÓN</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>M1</b>	15,65	18,6	18,6	2,86	2,83	3,055
<b>M2</b>	25,35	28,25	30,05	1,265	1,195	1,2
<b>M4</b>	14,7	15,65	14,65	3,18	3,075	3
<b>M7</b>	20,55	23,5	28,9	1,785	1,61	1,79
<b>M3</b>	15,7	17,15	16,2	1,915	1,75	1,62
<b>M5</b>	30,165	25,45	33,25	1,915	1,75	1,62
<b>M6</b>	7,8	8,8	9,8	3,825	3,82	3,85
<b>M8</b>	16,65	20,6	27,4	3,25	3,185	3,405

**Tabla 3.** Tamaños PAUT y amplitud de las señales obtenidas con los planes de inspección electrónico E-scan con onda transversal.

<b>TAMAÑOS DE DISCONTINUIDADES OBTENIDOS CON LOS PLANES DE INSPECCIÓN ELECTRÓNICO E-SCAN CON ONDA TRANSVERSAL</b>												
<b>M*</b> <b>Plan*</b>	<b>M1</b> <b>[mm]</b>	<b>M2</b> <b>[mm]</b>	<b>M3</b> <b>[mm]</b>	<b>M4</b> <b>[mm]</b>	<b>M5</b> <b>[mm]</b>	<b>M6</b> <b>[mm]</b>	<b>M7</b> <b>[mm]</b>	<b>M8</b> <b>[mm]</b>	<b>M1*</b> <b>[mm]</b>	<b>M3*</b> <b>[mm]</b>	<b>M4*</b> <b>[mm]</b>	<b>M6*</b> <b>[mm]</b>
<b>1</b>	3,2	3,8	2,1	2,7	5,5	3,5	2,9	4,5	3,2	3,7	3,1	4,3
<b>2</b>	3,4	3,9	2,7	2,8	4,6	4,1	2,4	4,3	3,3	3,4	2,9	4,0
<b>3</b>	3,9	3,7	3,5	3,5	4,2	4,9	2,6	4,5	3,7	3,6	4,8	4,6
<b>4</b>	4,0	4,3	4,0	2,9	4,2	5,0	2,3	4,6	3,6	3,4	4,7	4,8
<b>5</b>	2,8	2,3	3,9	2,6	4,5	4,6	2,3	4,5	3,5	3,4	3,1	4,5
<b>6</b>	3,1	2,3	4,6	2,9	4,8	5,5	2,6	5,2	4,1	3,9	4,4	5,1
<b>7</b>	2,4	2,4	4,7	2,4	4,6	5,7	2,2	5,1	4,0	3,7	3,4	4,7
<b>8</b>	1,6	2,5	4,8	2,1	4,5	5,2	2,0	4,8	3,6	3,4	3,1	4,9
<b>AMPLITUD DE LAS SEÑALES OBTENIDAS CON LOS PLANES DE INSPECCIÓN ELECTRÓNICO E-SCAN CON ONDA TRANSVERSAL</b>												
<b>M*</b> <b>Plan*</b>	<b>M1</b> <b>[%]</b>	<b>M2</b> <b>[%]</b>	<b>M3</b> <b>[%]</b>	<b>M4</b> <b>[%]</b>	<b>M5</b> <b>[%]</b>	<b>M6</b> <b>[%]</b>	<b>M7</b> <b>[%]</b>	<b>M8</b> <b>[%]</b>	<b>M1*</b> <b>[%]</b>	<b>M3*</b> <b>[%]</b>	<b>M4*</b> <b>[%]</b>	<b>M6*</b> <b>[%]</b>
<b>1</b>	49,9	39,7	34,2	35,8	70,45	59,2	41,6	65,45	22,5	33,8	26,5	49,9
<b>2</b>	46,5	43,1	67,4	33,3	71,45	54,75	41,05	68	24,45	31,3	28,9	44,05
<b>3</b>	89,1	63,1	126,9	66,5	120,9	102,3	55,3	118,4	62,05	75,85	74,9	98,8
<b>4</b>	84,7	53,9	129,6	63,1	115,5	100	52,85	118	57,65	68	70,9	91
<b>5</b>	84,7	54,4	141,4	69,5	103,7	101,2	47,45	101,7	55,8	66,5	60,7	98,8
<b>6</b>	85,7	48,7	132,0	68,1	97,85	105,6	49,9	102,3	55,8	57,25	41,1	99,8
<b>7</b>	74,9	43,1	125,8	59,2	69,5	76,3	35,6	66,9	43	59,7	57,7	88,1
<b>8</b>	80,3	38,7	141,4	62,7	80,25	75,85	38,65	81,8	65,85	62,45	59,7	92

**\*M:** Muestra, **\*Plan:** Plan de inspección, **M1\***, **M3\***, **M4\***, **M6\*:** Resultados muestras M1, M3, M4 y M6 con SKEW 270°.

**Tabla 4.** Tamaños PAUT y amplitud de las señales obtenidas con los planes de inspección electrónico E-scan con onda Longitudinal.

<b>TAMAÑO DE DISCONTINUIDADES OBTENIDAS CON LOS PLANES DE INSPECCIÓN ELECTRÓNICO E-SCAN CON ONDA LONGITUDINAL</b>								
<b>Plan*</b> \ <b>M*</b>	<b>M1 [mm]</b>	<b>M2 [mm]</b>	<b>M3 [mm]</b>	<b>M4 [mm]</b>	<b>M5 [mm]</b>	<b>M6 [mm]</b>	<b>M7 [mm]</b>	<b>M8 [mm]</b>
<b>1</b>	3,3	3,8	3,5	3,9	4,1	4,8	3,4	3,0
<b>2</b>	3,3	3,8	3,4	3,7	5,1	4,8	3,4	3,4
<b>3</b>	3,5	3,9	4,5	3,8	4,6	4,8	3,6	4,1
<b>4</b>	4,3	4,1	4,5	3,6	4,4	4,3	4,1	4,1
<b>5</b>	7,4	7,1	9,8	7,3	5,7	7,7	5,6	6,8
<b>6</b>	7,5	6,3	9,8	7,2	6,2	8,9	5,1	7,2
<b>7</b>	3,3	2,8	3,0	3,5	3,4	3,5	2,5	2,9
<b>8</b>	3,5	3,3	3,1	3,6	3,4	3,4	3,0	3,0
<b>AMPLITUD DE DISCONTINUIDADES OBTENIDAS CON LOS PLANES DE INSPECCIÓN ELECTRÓNICO E-SCAN CON ONDA LONGITUDINAL</b>								
<b>Plan*</b> \ <b>M*</b>	<b>M1 [%]</b>	<b>M2 [%]</b>	<b>M3 [%]</b>	<b>M4 [%]</b>	<b>M5 [%]</b>	<b>M6 [%]</b>	<b>M7 [%]</b>	<b>M8 [%]</b>
<b>1</b>	34,7	119,4	37,2	79,3	96,4	77,3	111,4	59,7
<b>2</b>	39,2	134,1	42,1	91,5	104,7	86,1	119,1	66,6
<b>3</b>	38,2	139,0	44,0	84,2	123,8	93,9	118,5	75,4
<b>4</b>	41,1	134,1	43,0	84,2	110,2	94,4	118,1	79,3
<b>5</b>	41,1	127,2	40,1	84,2	86,1	91,5	117,2	77,3
<b>6</b>	41,1	122,8	38,2	77,3	83,2	87,8	117,8	73,0
<b>7</b>	42,1	119,9	33,4	80,3	78,3	84,2	112,9	72,4
<b>8</b>	48,9	128,7	45,0	87,1	87,1	83,2	120,7	60,4