

**EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO CONVENCIONAL (UT) Y
PHASED ARRAY (PA) EMPLEANDO DISCONTINUIDADES PLANARES INDUCIDAS
ARTIFICIALMENTE**

**NATHALIA PABÓN ROJAS
MARIA CAROLINA URIBE RAMÍREZ**

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

2018

**EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO CONVENCIONAL (UT) Y
PHASED ARRAY (PA) EMPLEANDO DISCONTINUIDADES PLANARES INDUCIDAS
ARTIFICIALMENTE**

**NATHALIA PABÓN ROJAS
MARIA CAROLINA URIBE RAMÍREZ**

**Trabajo de grado, presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Metalúrgico**

**DIRECTOR
Msc. CARLOS ANDRÉS GALÁN PINILLA
Ingeniero metalúrgico**

**CO-DIRECTOR
PhD. MAURICIO RINCÓN ORTIZ
Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales**

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

2018

DEDICATORIA

Nathalia Pabón Rojas:

A Dios, por ser la principal guía en cada uno de mis proyectos, quien me dio la vida y me llevó con valentía, salud y fortaleza por el camino de mi profesión.

A mis padres William Pabón y Luz Yaneth Rojas por la educación y el apoyo brindado durante todo mi proceso de formación académica y personal.

A mis hermanos Wilfer Pabón y Juliana Pabón por brindarme ejemplo de superación, disciplina y dedicación.

María Carolina Uribe Ramírez:

Primordialmente a Dios, mi compañero número uno y guía de vida, quien me llena de sabiduría y fortaleza en cada escalón del camino y me acompaña en cada triunfo y derrota dejándome las mejores lecciones de vida.

A mis padres Javier Uribe y Maritza Ramírez quienes han sacrificado tiempo, dinero y trabajo; para formarme de la mejor manera como persona y brindarme el mayor apoyo y compañía para alcanzar mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros directores de proyecto de grado Carlos Galán y Mauricio Rincón Ortiz, por permitimos trabajar en conjunto, por su gran ayuda, dedicación y confianza depositada durante la investigación y el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por proporcionar las instalaciones y reglamentos que hacen posible la formación de excelentes profesionales.

A todos nuestros profesores de la carrera de Ingeniería Metalúrgica, por todos los conocimientos brindados los cuales hicieron posible el entendimiento de cada área de estudio.

A los técnicos de laboratorio Oscar Martínez y Mario, por su incondicional servicio y dedicación.

Al profesor Pedro López por su atribución en la realización de este proyecto colaborándonos con la mejor disposición

A todos nuestros compañeros y amigos que directa o indirectamente contribuyeron a la realización de este proyecto, por su apoyo, colaboración y aportes.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo General	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 ESTADO DEL ARTE	18
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	21
3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	21
3.2 ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL DE LAS DISCONTINUIDADES PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE ESTUDIO	22
3.3 ETAPA 3: DISEÑO DE LOS PLANES DE INSPECCIÓN	23
3.3.1 Actividad 1: Planes de inspección para UT	23
3.3.2 Actividad 2: Planes de inspección para PA	24
3.4 ETAPA 4: MEDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES	24
3.4.1 Actividad 1: Capacitación en el manejo de equipos	24
3.4.2 Actividad 2: Mediciones con UT	25
3.4.3 Actividad 3: Mediciones con PA	26
3.5 ETAPA 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	26
3.6 ETAPA 6. ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	27

4. ANALISIS DE RESULTADOS	27
4.1 Planes de inspección	27
4.2 Interpretación y evaluación de los resultados	28
4.2.1 Dimensiones de las discontinuidades empleando ultrasonido convencional	28
4.2.2 Dimensiones de las discontinuidades empleando Phased Array	31
4.3 Análisis estadístico de los resultados de ultrasonido	34
4.3.1 Resultados Con Ultrasonido Convencional	34
4.3.2 Resultados con Phased Array	37
5. CONCLUSIONES	39
6. RECOMENDACIONES	40
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	41
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	45

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estado del conocimiento.	18
Tabla 2. Caracterización de la discontinuidad en la Muestra 1.	23

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Palpadores empleados en ultrasonido: a) En ultrasonido convencional, b) En phase array.	20
Figura 2. Esquema de la metodología a realizar para el desarrollo del proyecto.	21
Figura 3. Montaje de la guía con las muestra M1 para inspeccionar con UT. La flecha amarilla indica el movimiento del palpador.	25
Figura 4. Montaje de la guía con las muestra M1 para inspeccionar con PA. La flecha amarilla indica el movimiento del palpador.	26
Figura 5. Vistas A-Scan en la detección de discontinuidades M3 con diferente morfología; a) Punta plana M2, b) Punta redondeada M4.	28
Figura 6. Incidencia del haz respecto a una discontinuidad vertical; a) Con punta plana M2, b) Con punta redondeada M4.	29
Figura 7. Vistas A-Scan en la detección de una discontinuidad (M1) variando la incidencia del haz ultrasónico; a) Incidencia perpendicular a la discontinuidad, b) Incidencia paralela a la discontinuidad.	30
Figura 8. Vistas A-Scan en la detección de una discontinuidad (M3) variando la el ángulo de refracción; a) 45°, b) 60°.	30
Figura 9. Vistas C-Scan en la detección de dos discontinuidades (M2 y M4) variando la resolución angular; a y b) Resolución de 0.5°, c y d) Resolución de 1.0°.	32
Figura 10. Vistas S-Scan en la detección de una discontinuidad (M1) variando la incidencia del haz ultrasónico; a) Incidencia perpendicular a la discontinuidad, b) Incidencia paralela a la discontinuidad.	32
Figura 11. Vistas C-Scan en la detección de discontinuidades (M2 y M4) con diferente morfología; a) Punta plana, b) Punta redondeada.	33
Figura 12. Vistas S-Scan en la detección de discontinuidades (M3 y M4) con diferente ángulo de inclinación; a) Discontinuidad inclinada (55° con respecto a la superficie de la muestra), b) Discontinuidad vertical (90° respecto a la superficie de la muestra).	34

Figura 13. Efecto de los parámetros analizados en las mediciones utilizando la técnica de ultrasonido convencional. 36

Figura 14. Efecto de los parámetros analizados en las mediciones utilizando la técnica de Phased Array. 38

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Dimensionamiento de las discontinuidades evaluadas.	45
Anexo B. Procedimiento para calcular el tamaño de las discontinuidades medidas con ut.	47
Anexo C. Diseño de los planes de inspección	.48
Anexo D. Forma de incidencia del haz (perpendicular y paralela).	49
Anexo E. Resultados de las mediciones con ultrasonido convencional.	50
Anexo F. Resultados de las mediciones empleando phased array.	53

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ULTRASONIDO CONVENCIONAL (UT) Y PHASED ARRAY (PA) EMPLEANDO DISCONTINUIDADES PLANARES INDUCIDAS ARTIFICIALMENTE*

AUTORES: NATHALIA PABÓN ROJAS y
MARÍA CAROLINA URIBE RAMÍREZ **

PALABRAS CLAVE: Ultrasonido Convencional, Phased Array, discontinuidades planares, dimensionamiento de discontinuidades.

En la mayoría de aplicaciones industriales se emplean estructuras metálicas unidas mediante procesos de soldadura de perfiles obtenidos mediante conformado. Además, se fabrican piezas mediante procesos que involucran deformaciones plásticas, las cuales durante su servicio son sometidas a esfuerzos mecánicos y ambientes agresivos que pueden provocar fallas debido a previas discontinuidades o mecanismos de daño que se presenten en dicho material. Estas discontinuidades pueden ser detectadas oportunamente mediante la aplicación de Ensayos No Destructivos END los cuales determinan su severidad mediante la aplicación de criterios.

En el presente trabajo se aplicaron las técnicas de Ultrasonido Convencional UT y *Phased Array* PA para realizar mediciones en muestras con discontinuidades planares mecanizadas simulando discontinuidades reales, evaluando el efecto de la morfología de la punta de la discontinuidad y el ángulo formado entre ésta y el haz ultrasónico, la profundidad de focalización y la resolución angular en la exactitud de las mediciones.

Los resultados mostraron que, al momento de identificar la posición de la discontinuidad, la técnica de ultrasonido convencional resulta ser la más apropiada ya que con el método de Phased Array utilizando el OmniPC se dificulta conocer la inclinación de la discontinuidad. Cabe resaltar, que el uso de ésta última técnica requiere un menor tiempo de inspección y mayor entrenamiento a fin de llegar a un análisis de sus resultados. Adicionalmente, PA permite hacer una inspección más rápida ya que su palpador con múltiples cristales abarca toda la discontinuidad con un solo barrido. En conjunto, se determinó que la inclinación de la discontinuidad representa el factor más crítico al momento de realizar las mediciones ya que estas modificaron el resultado al variar el ángulo de incidencia del haz respecto a la discontinuidad.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ing. Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF CONVENTIONAL ULTRASOUND (UT) AND PHASE ARRAY (PA) TECHNIQUES USING ARTIFICIALLY INDUCED PLAN DISCONTINUITIES*

AUTHORS: NATHALIA PABÓN ROJAS y
MARÍA CAROLINA URIBE RAMÍREZ **

KEY WORDS: Conventional Ultrasound, Phased Array, plan discontinuities. sizing.

Most of industrial applications use metal structures joined by means of welding processes of profiles obtained by shaping. In addition, pieces are manufactured by processes involving plastic deformations, which during their service are subjected to mechanical stresses and aggressive environments that can cause failures due to previous discontinuities or damage mechanisms that occur in that material. These discontinuities can be detected in a timely manner through the application of NDT Non-Destructive Tests, which determine their severity through the application of criteria.

In the present project, the techniques of Conventional Ultrasound and Phased Array were applied to perform measurements in samples with mechanized plan discontinuities simulating real discontinuities, evaluating the effect of the peak's morphology of the discontinuity and the angle formed between this and the ultrasonic beam, the depth of focus and the angular resolution in the accuracy of the measurements.

The results show that, when identifying the discontinuity position, the conventional ultrasound technique is the most appropriate way to do taking in count that, with the Phased Array method using the OmniPC, it becomes difficult to know the inclination of the discontinuity. It should be noted that the use of the latest technique requires a smaller inspection time and a longer training to arrive at an analysis of its results. Additionally, PA allows a faster inspection than its probe with multiple crystals covers the entire discontinuity with a single sweep. Added to this, it was determined that the inclination of the discontinuity represented the most critical factor when making the measurements since they modified the result by varying the angle of incidence of the beam with respect to the discontinuity.

*Grade Project

**Faculty of Engineering Physical Chemical, School of Engineering Metallurgical. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Los componentes metálicos son utilizados en la mayoría de aplicaciones industriales [1] y emplean procesos de fundición, soldadura, conformado, mecanizado y/o aplicación de recubrimientos durante su fabricación. Una vez obtenidos, son sometidos a esfuerzos mecánicos y ambientes agresivos durante servicio, donde se pueden generar gran variedad de discontinuidades y mecanismos de daño [2]. La evaluación oportuna de estas discontinuidades es posible mediante la aplicación de Ensayos No Destructivos END, los cuales son evaluados por los criterios establecidos en los códigos como el ASME o AWS, a fin de determinar qué indicaciones podrían afectar el servicio en el material causando fallas. Dentro de estos ensayos se encuentra el ultrasonido convencional (UT), siendo una de las técnicas más utilizadas para la detección de discontinuidades, empleando un palpador monocristal que transmite el haz sonoro al material con un ángulo de refracción fijo. Por otra parte, como resultado del avance tecnológico, se ha venido desarrollando un nuevo método denominado *Phased Array* (PA) para lograr la inspección de manera avanzada. Esta técnica emplea palpadores con múltiples cristales, inspeccionando mayores áreas con variados ángulos de refracción y generando visualizaciones en tiempo real, con la posibilidad de modificar electrónicamente el haz ultrasónico [3]. Lo anterior mejora la sensibilidad, resolución y probabilidad de detección de defectos [4]. Sin embargo, investigadores han reportado que estas técnicas presentan errores en el dimensionamiento de las discontinuidades cuando varían sus características geométricas [5][6][7].

De acuerdo a lo planteado, surge la pregunta de investigación: ¿Cuál técnica de inspección presenta mayor exactitud en los resultados al dimensionar discontinuidades planares inducidas artificialmente? Para resolver esta pregunta, se realizaron mediciones con UT y PA de discontinuidades mecanizadas [8].

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar las técnicas de Ultrasonido Convencional (UT) y Phased Array (PA) empleando discontinuidades planares inducidas artificialmente.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar planes de inspección para las técnicas de Ultrasonido Convencional (UT) y Phased Array (PA) que permitan dimensionar discontinuidades planares inducidas artificialmente en muestras de acero.
- Evaluar cuáles factores en estudio influyen sobre las mediciones de las discontinuidades presentes en las muestras inspeccionadas.
- Determinar la exactitud obtenida de los planes de inspección para el dimensionamiento de discontinuidades planares.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ESTADO DEL ARTE

En la tabla 1 se resumen investigaciones realizadas en esta área relacionadas con el presente proyecto y los principales aportes que están relacionadas con la presente investigación.

Tabla 1. Estado del conocimiento.

AUTOR	RESULTADOS ENCONTRADOS	RECOMENDACIONES PARA POSTERIORES INVESTIGACIONES O PROBLEMAS A RESOLVER
Rodríguez, E. ⁹	El ultrasonido obtuvo un error cercano al 2% respecto al valor real, verificando al ultrasonido como una técnica adecuada para la medición de discontinuidades en componentes metálicos.	Se limitó el tipo de ensayo a cierto número de casos, descartando la posibilidad de realizar otras pruebas con inconvenientes en la medición de superficies convexas. Se recomienda conseguir un adaptador para las mediciones en este tipo de superficies y así, aplicar esta técnica a componentes con dicha geometría para observar sus defectos.
Nardoni, G. et al. ¹⁰	El ensayo de ultrasonido es capaz de establecer criterios precisos para clasificar los defectos como volumétricos, planares o mixtos.	Comprobar si para los defectos clasificados como planares o volumétricos según ultrasonido, la condición de estabilidad del material se puede evaluar con los criterios establecidos.
Poguet, Jérôme, et al. ⁵	Pequeños cambios en parámetros específicos de PA como pitch, profundidad de focalización y resolución angular, influyen en la inspección de materiales que presenten grietas de fatiga y de corrosión bajo tensión.	Realizar estudios similares empleando la técnica de ultrasonido convencional para observar en estos casos la influencia de los parámetros a variar para la inspección de grietas.
Chinome, Iván et al. ¹¹	El UT logró determinar la presencia y criticidad de las indicaciones internas en el material, siendo el ensayo más exigente para la interpretación de resultados.	Realizar investigaciones similares variando el tipo de muestras a analizar, enfocadas principalmente en la generación de otra clase de defectos y sus causas. Además, evaluar periódicamente el estado de los equipos utilizados en la inspección de componentes metálicos.
Kurst, Jochen, et al. ¹²	La determinación de la Probabilidad de Detección de Defectos (POD) cuantifica la posibilidad de detectar un defecto específico con un END de una distribución estadística.	Considerar la base del análisis POD para otros dispositivos de ensayos no destructivos en un futuro donde los resultados de la inspección se basarán principalmente en la interpretación de imágenes.

2.2 GENERALIDADES DEL ULTRASONIDO

El ultrasonido emplea ondas mecánicas con longitudes de onda cortas y frecuencias superiores a los 20.000 Hz, las cuales no logran ser percibidas por el oído humano. La onda ultrasónica no se propaga en todas direcciones, sino que forma un haz de pequeño tamaño que puede ser transmitido. Estas características les permiten ser usadas en un gran campo de aplicación comprendido entre la medicina, la biología, la física, la química y la ingeniería[9].

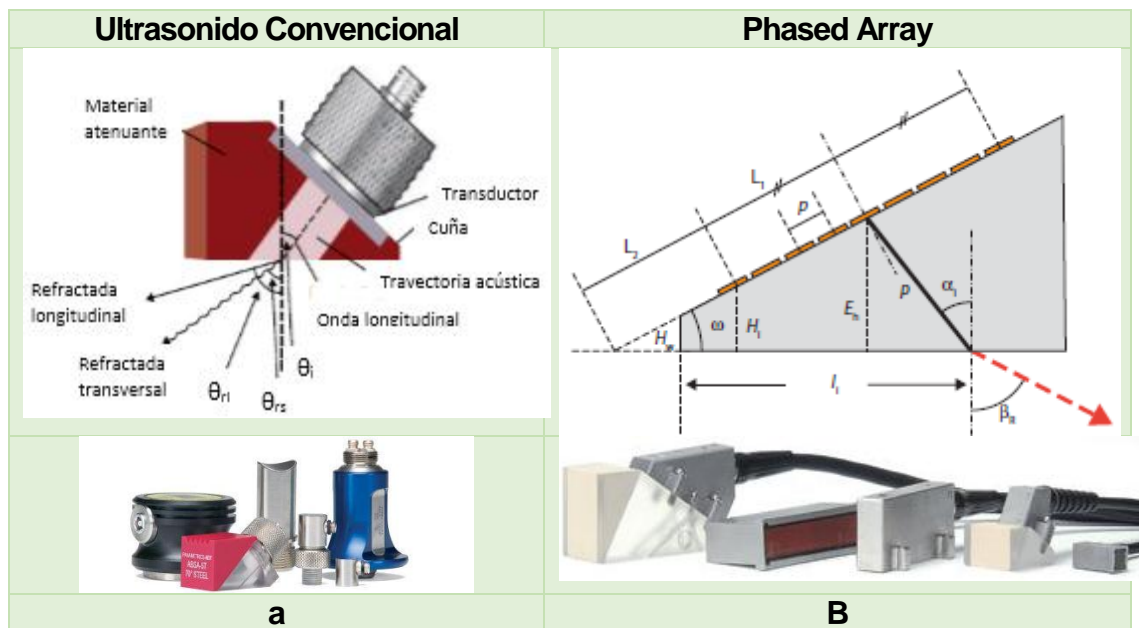
2.3 TÉCNICA DE ULTRASONIDO CONVENCIONAL (UT) Y PHASED ARRAY (PA)

Las ondas sonoras viajan a una velocidad específica dependiendo del medio en el que se propaguen, ya sea sólido, líquido o gaseoso porque la velocidad es diferente en cada sólido o medio. Al encontrar el límite con otro medio, las ondas se reflejarán o transmitirán según reglas conocidas, fundamento en el cual se basa el ultrasonido para la detección de discontinuidades [10]. Éstas examinadas por ultrasonido, generan una resistencia conocida como impedancia acústica. Por tal motivo, al procesar las señales emitidas por las ondas durante su propagación, es posible obtener información sobre su forma, tamaño y orientación.

Para generar una onda ultrasónica, se utiliza un transductor piezoeléctrico que convierte las señales eléctricas en sonoras, y viceversa. El transductor de UT consiste en un cristal piezoeléctrico conectado a un transmisor-receptor de pulsos (modo pulso/eco). La generación de ondas se da a partir de la aplicación de un pulso de energía eléctrica de corta duración y alto voltaje al cristal, provocando que cambie rápidamente su configuración geométrica y emita un pulso de energía acústica de alta frecuencia. Las ondas ultrasónicas reflejadas por la discontinuidad y/o pared posterior del material generan deformaciones en el cristal convirtiéndola en una señal eléctrica que se amplifica y procesa, obteniendo información del tiempo de vuelo su amplitud de la señal [11].

El Ultrasonido Convencional (UT) y Phased Array (PA) son técnicas que utilizan el mismo principio para la generación del ultrasonido. Sin embargo, PA emplea sondas con una gran cantidad de cristales piezoeléctricos (de 16 a 256) que generan haces con un rango de ángulos sin cambiar la zapata acoplada, mientras que UT utiliza un único cristal con un diámetro fijo y ángulo refractado que depende de la zapata. Por otro lado, el frente de onda generado en PA tiene mayor energía que el que se podría generar con un palpador de UT del mismo diámetro, ya que las fuentes puntuales al ser pulsadas de manera controlada generan ondas coherentes [12]. La figura 1a representa el esquema con un palpador monocristal para UT y la figura 1b con varios elementos empleados para PA [13].

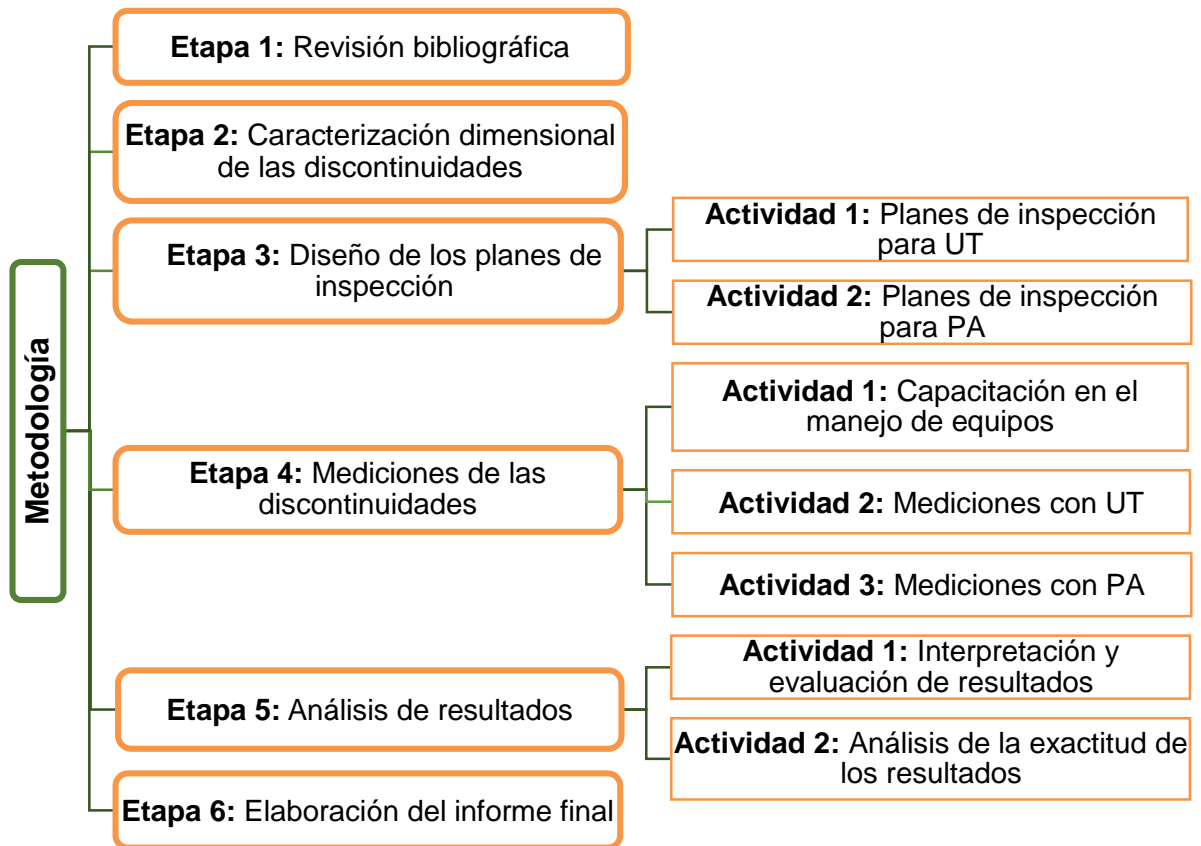
Figura 1. Palpadores empleados en ultrasonido: a) En ultrasonido convencional, b) En phase array.



3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 2 se presentan las seis (6) etapas de la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de la presente investigación. Adicionalmente, se describen cada una de ellas.

Figura 2. Esquema de la metodología a realizar para el desarrollo del proyecto.



3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

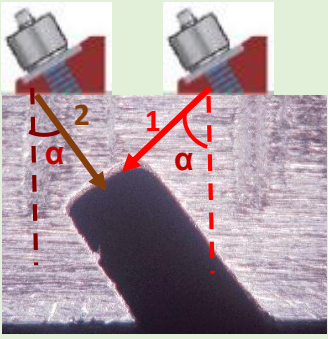
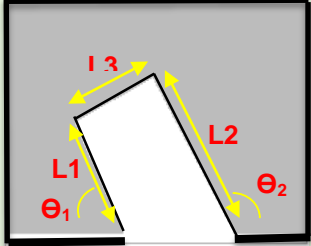
Se revisaron documentos bibliográficos enfocados en las técnicas de UT y PA para el estudio de los diferentes defectos presentados en componentes metálicos. Adicionalmente, se utilizaron recursos bibliográficos basados en discontinuidades planares presentes en los materiales para conocer su morfología y características. Se hizo también una investigación de estudios previos enfocados en la influencia de los parámetros evaluados sobre las mediciones realizadas con UT y PA.

3.2 ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DIMENSIONAL DE LAS DISCONTINUIDADES PRESENTES EN LAS MUESTRAS DE ESTUDIO

En el presente proyecto de investigación se emplearon cuatro muestras con discontinuidades planares mecanizadas por el grupo de investigación GIMAT [8], utilizando el proceso de electroerosión por penetración. Para establecer las dimensiones de referencia de éstas, se utilizó microscopía óptica manejando el equipo HIROX KH7700 a fin de obtener las características dimensionales de cada discontinuidad como su profundidad (L1, L2), ancho (L3), morfología de la punta (plana y redondeada), ángulo de inclinación (θ_1) (El dimensionamiento de la muestra M1 se muestra en la tabla 2, las muestras M2, M3 y M4 en el anexo A) y la rugosidad de la superficie erosionada de las discontinuidades verificando que todas las muestras tenían una rugosidad entre 12.793 [μm] y 14.4 [μm], debido a que no era una variable de interés en esta investigación. Las dimensiones obtenidas en esta etapa se tomaron de referencia para determinar la exactitud de las técnicas ultrasónicas en estudio.

Las muestras se diseñaron de manera que se permitiera acoplar el palpador por los dos lados de la discontinuidad, generando que el haz incida con diferente ángulo en ella según se ubicara el palpador. En la tabla 2 se muestran los resultados para la muestra M1 con la incidencia del haz ultrasónico de manera perpendicular (flecha #1) y paralela (flecha #2), donde α corresponde al ángulo de refracción de la zapata. De igual forma sucede en la muestra M3 como se puede observar en el Anexo A. Los resultados dimensionales para las muestras con discontinuidades verticales (M2 y M4) evidencian las incidencias de manera oblicua del haz con respecto a la discontinuidad, las cuales se presentan con las flechas #3 en el anexo A.

Tabla 2. Caracterización de la discontinuidad en la Muestra 1.

	DISCONTINUIDAD	PARÁMETROS
M U E S T R A M 1		
	<p>Flecha 1 indica la incidencia perpendicular del haz respecto a la discontinuidad, flecha 2 indica la incidencia paralela y α representa el ángulo de refracción de la onda.</p>	<p>Longitud de la discontinuidad representada por L1 y L2, ancho de la discontinuidad indicado por L3 y ángulos entre la discontinuidad y la superficie representados por Θ_1 y Θ_2.</p>
	<p>Dimensiones: L1=1830,512 μm, L2=2849,515 μm, L3=1204,719 μm, $\Theta_1=58,906^\circ$, $\Theta_2=128,061^\circ$</p>	

3.3. ETAPA 3: DISEÑO DE LOS PLANES DE INSPECCIÓN

En esta etapa se diseñaron los planes de inspección para las técnicas estudiadas teniendo en cuenta los parámetros necesarios para la obtención de resultados empleando ondas transversales. Para ello, se seleccionaron los siguientes parámetros: el ángulo de refracción, la inclinación de la discontinuidad respecto al haz ultrasónico y la morfología de la punta mecanizada para las mediciones con UT; y, la resolución angular, el ángulo de inclinación de la discontinuidad respecto al haz, la profundidad de focalización y la morfología de la punta mecanizada para las mediciones con PA; omitiendo el pitch, la variación de frecuencia, el diámetro del palpador, el voltaje y la rugosidad de la superficie. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo siguiente.

3.3.1 Actividad 1: Planes de inspección para UT. Para realizar la inspección con UT se empleó un palpador circular de 0.5 pulgadas de diámetro de 5 MHz de frecuencia y tres zapatas con ángulos de refracción de 45°, 60° y 70° señaladas por

los códigos para inspección de soldaduras [4]. Con los materiales nombrados anteriormente se realizaron inspecciones por los dos costados de las discontinuidades como se puede observar en la figura 6 y anexo D, de manera que el haz ultrasónico tuviera una incidencia paralela, oblicua y perpendicular a la discontinuidad.

En el Anexo C- tabla 1 se presenta el diseño de experimentos realizado, nombrando los parámetros y niveles tenidos en cuenta para la toma de mediciones. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo siguiente.

3.3.1 Actividad 2: Planes de inspección para PA. Para el escaneo mediante PA se emplearon dos niveles de resolución angular ($0,5^\circ$ y 1.0°) y dos niveles de profundidad de focalización: sin focalizar y focalizando electrónicamente el haz ultrasónico al final del campo cercano, permitiendo observar la influencia de estos parámetros en los resultados finales. Para la inspección se utilizó el palpador Olympus 5L16 con arreglo lineal, con 16 elementos activos y un rango de barrido de 30° a 70° empleando barrido sectorial [13].

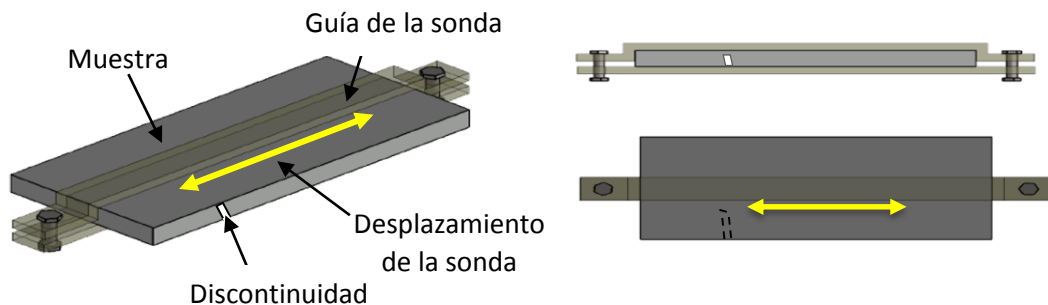
El diseño de experimentos realizado se muestra en la tabla 1 del Anexo C y los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo

3.4 ETAPA 4: MEDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES

3.4.1 Actividad 1: Capacitación en el manejo de equipos. Se realizó la capacitación en el manejo de los equipos de ultrasonido KrautKramer USM 35XS y OLYMPUS OMNISCAN-MX2 mediante la toma repetitiva de mediciones sobre bloques de referencia verificando la validez y reproductibilidad de los resultados. Con el fin de obtener los resultados adecuados, se realizó la calibración de los equipos siguiendo las normas de los códigos ASTM E164 para UT y ASTM E2700 para PA.

3.4.2 Actividad 2: Mediciones con UT. Con el objetivo de lograr mayor confianza y exactitud en las mediciones, para garantizar que el palpador se desplazara de manera perpendicular a la discontinuidad [4], se fabricó una guía en material acrílico a fin de apoyar la zapata sobre ella y mantener una dirección definida minimizando los errores en la medición, como se indica en la figura 3.

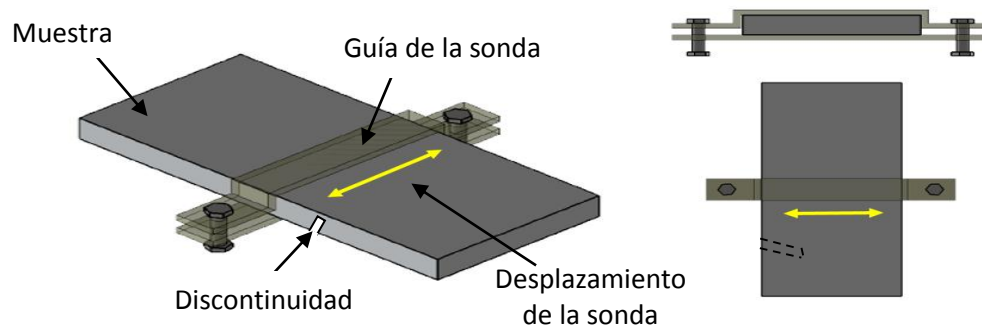
Figura 3. Montaje de la guía con la muestra M1 para inspeccionar con UT. La flecha amarilla indica el movimiento del palpador.



Las mediciones con UT se realizaron manualmente desplazando el palpador hasta encontrar la amplitud máxima mostrada en la pantalla con una vista A-Scan de las cuales se obtenía la amplitud de la señal, y siguiendo la norma ASTM E164 se aplicó la técnica de la caída de los 6 dB registrando la profundidad y la distancia horizontal entre el palpador y la discontinuidad identificada, medidas con las cuales se calculó trigonométricamente la dimensión de la discontinuidad ya que el equipo KrautKramer no especifica el tamaño de ésta sino que permite obtener distancias verticales y horizontales para poder hallarlo [14]. En el Anexo B se muestra el anterior procedimiento para la muestra M1 con una incidencia perpendicular del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad, el cual se desarrolló para todas las mediciones con ultrasonido industrial.

3.4.3 Actividad 3: Mediciones con PA. Se fabricó una segunda guía en acrílico, en este caso a fin de garantizar un movimiento paralelo del palpador con respecto a la discontinuidad como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Ensamblaje de la guía con la muestra M3 para inspeccionar con PA. La flecha amarilla indica el movimiento del palpador.



Las discontinuidades se dimensionaron mediante el programa OmniPc 4.3 el cual proporcionó vistas A-Scan, S-Scan y C-Scan para la visualización y obtención de los resultados para cada plan de inspección, combinando factores como la resolución angular, incidencia del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad, profundidad de focalización y morfología de la punta de la discontinuidad

Para obtener el tamaño de las discontinuidades se empleó la caída de los 6 dB utilizando los cursores de medición que facilita el programa para obtener de manera automática el resultado final.

3.5 ETAPA 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En base a los resultados obtenidos con cada técnica en la medición de las discontinuidades mediante los planes diseñados en la ETAPA 3 y conociendo anteriormente los valores de referencia, se realizó un estudio comparativo con los resultados obtenidos empleando una técnica estadística basada en el cálculo del porcentaje de error al comparar los tamaños de

referencia y los experimentales para cada plan de inspección; la cual nos permitió identificar el método de ultrasonido más adecuado a utilizar y la influencia de los parámetros en estudio.

3.6 ETAPA 6. ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Al finalizar el análisis de resultados y el estudio comparativo, se realizó el informe final del proyecto de investigación, el cual fue presentado y sustentado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta un análisis e interpretación de los resultados obtenidos para ambas técnicas evaluadas a partir de la metodología experimental desarrollada, seguido de un análisis estadístico comparando los valores finales resultantes para cada plan de inspección.

4.1 Planes de inspección

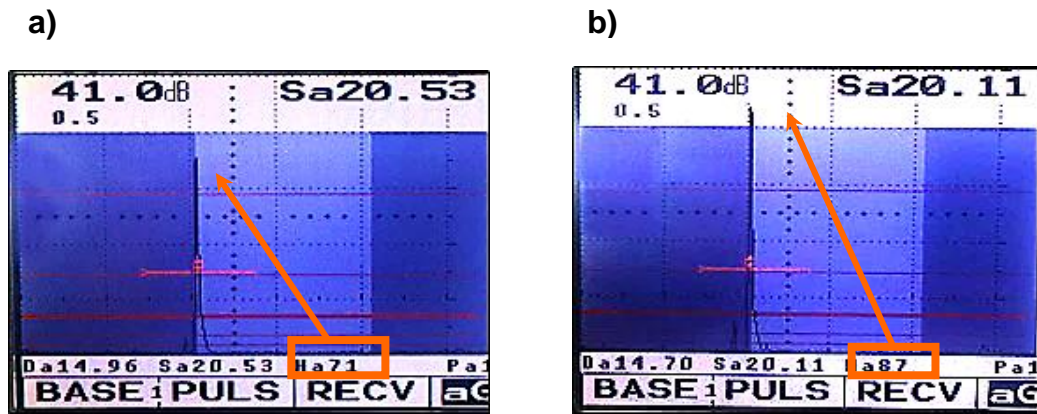
En la tabla 1 – Anexo E se presentan los planes de inspección empelados para realizar las mediciones con UT y en la columna final el tamaño de la discontinuidad medida en mm. Se obtuvieron 18 planes de inspección al combinar los diferentes factores y niveles indicados en la metodología. En la tabla 1 – Anexo F se presentan los planes de inspección empelados para las mediciones con PA y en la columna final el tamaño de la discontinuidad medida en mm. Se obtuvieron 24 planes de inspección combinando los factores y niveles. Para cada combinación de variables se realizó una inspección determinando las dimensiones de la discontinuidad para evaluar posteriormente cuál de estos planes y factores presentan variaciones en la exactitud de los resultados.

4.2 Interpretación y evaluación de los resultados

A continuación, se presenta el análisis de resultados obtenidos con base en la metodología experimental desarrollada.

4.2.1 Dimensiones de las discontinuidades empleando ultrasonido convencional. En la figura 5 se observa la amplitud generada por el eco al identificar dos discontinuidades verticales (muestras M2 y M4) con una característica diferente: la morfología de la punta, utilizando una zapata de 60°.

Figura 5. Vistas A-Scan en la detección de discontinuidades (M2 y M4) con diferente morfología; a) Punta plana M2, b) Punta redondeada M4.

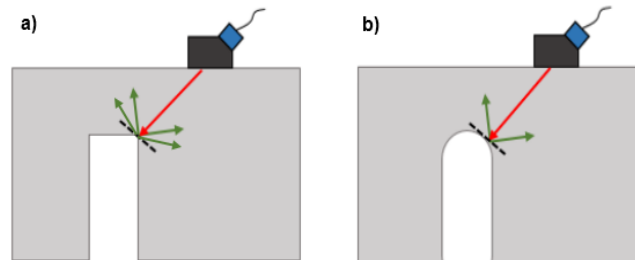


La figura 5a) corresponde a una discontinuidad con punta plana la cual generó una señal con una amplitud de 71% de la altura total en pantalla (ATP) y un tamaño de 3.9 [mm] a diferencia de la figura 5b) la cual hace referencia a una discontinuidad con punta redondeada, cuya amplitud generada por el eco es de 87% de la altura total en pantalla (ATP) (mayor a la anterior) y el tamaño calculado fue de 2.53 [mm]. Lo anterior muestra que existe variación en las dimensiones y amplitud generada por las variables de estudio. Para todas las muestras se registró la información en la tabla 1- Anexo E.

En base a los resultados obtenido, se encontraron errores menores en las mediciones a discontinuidades verticales con punta redondeada; ésto ocurre probablemente debido a que

en este caso la onda emitida que llega a la punta de la discontinuidad se encuentra con un extremo que genera mayor reflexión del haz hacia el palpador en comparación con la medición de una discontinuidad con punta plana, para la cual se refleja hacia el transductor una menor energía del eco. En la figura 6 se pueden visualizar ambos casos.

Figura 6. Incidencia del haz respecto a una discontinuidad vertical; a) Con punta plana M2, b) Con punta redondeada M4.

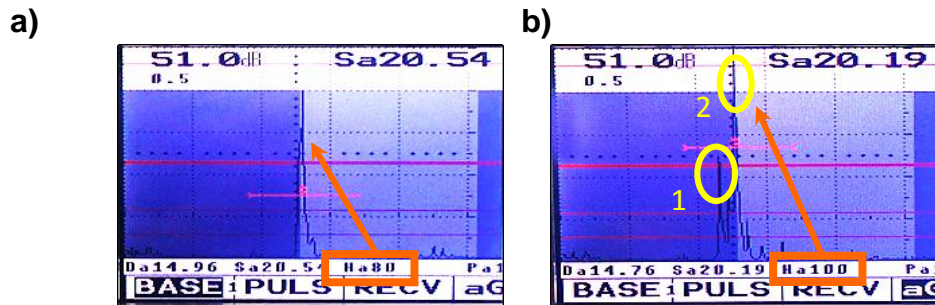


Para las discontinuidades inclinadas (M1 y M3) el comportamiento es diferente observando los resultados más satisfactorios para las mediciones de la discontinuidad con punta plana (M1); en este caso la señal emitida por el haz, independientemente de manera en que incide respecto a la discontinuidad, llega a una superficie (extremo de la discontinuidad) que genera menor difracción del haz ultrasónico. Lo anterior se puede visualizar en el Anexo D- figura 1 para ambas incidencias del haz ultrasónico (perpendicular y paralela).

Uno de los factores evaluados y que fue determinante en los resultados finales es la incidencia del haz respecto a la discontinuidad, el cual está relacionado con el ángulo de refracción y la inclinación de la discontinuidad; obteniendo una variación de hasta 2 [mm] en el tamaño final calculado, lo cual es significativo teniendo en cuenta el tamaño de referencia de las discontinuidades.

En la figura 7 se presentan los resultados al inspeccionar la muestra M1 (inclinada a 55° y punta plana) variando la posición del palpador [ver tabla 2]. La imagen 7a) corresponde a una incidencia perpendicular a la discontinuidad, cuya señal tuvo una amplitud de 80% de la ATP; mientras que la imagen 7b) hace referencia a la señal recibida por una incidencia paralela a la discontinuidad con la cual se obtuvo una amplitud de 100% de la ATP.

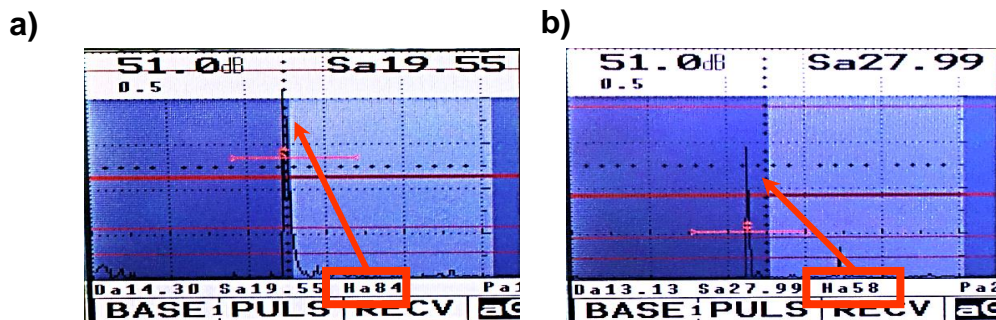
Figura 7. Vistas A-Scan en la detección de una discontinuidad (M1) variando la incidencia del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad; a) Incidencia perpendicular a la discontinuidad, b) Incidencia paralela a la discontinuidad.



Para las condiciones de medición del estudio se obtuvo mayor amplitud de la señal y mayor exactitud en los resultados (con un error máximo de 13,69%) con la incidencia del haz ultrasónico de forma paralela. Lo anterior ocurre porque existe reflexión de la punta de la discontinuidad: Eco 1 en la figura 7b); y de la raíz de la discontinuidad: Eco 2 de la figura 7b), con el cual se midió la caída de los 6db para calcular las dimensiones de la discontinuidad.

En la figura 8 se observan dos vistas distintas que hacen referencia a mediciones de una misma discontinuidad (M3) variando el ángulo de refracción. La figura 8a) corresponde a la medición de la pared posterior de la discontinuidad con un ángulo de refracción de 45° y la figura 8b) representa el eco producido al captar una señal que se refleja de la punta de la discontinuidad empleando un ángulo de 60°.

Figura 8. Vistas A-Scan en la detección de una discontinuidad (M3) variando la el ángulo de refracción; a) 45°, b) 60°.

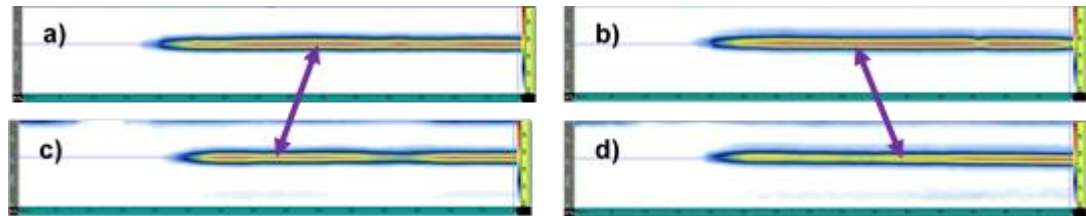


Para la muestra M3 (discontinuidad inclinada con punta redondeada), al utilizar una zapata de 60° la amplitud del eco obtenida fue menor independientemente del punto medido; generando tamaños más cercanos al de referencia cuando la incidencia del haz es perpendicular a la discontinuidad. El comportamiento anterior se presentó de igual manera en la muestra M1 (discontinuidad inclinada con punta plana), y en la muestra M4 (discontinuidad vertical con punta redondeada) para una incidencia oblicua. Con esto, se presentaron mediciones más exactas cuando el ángulo de refracción es de 60°, mientras que cuando este ángulo es de 45° o 70° los errores aumentaron de hasta un 83%, indicando que es una variable de consideración en la medición de una discontinuidad.

4.2.2 Dimensiones de las discontinuidades empleando Phased Array. A continuación, se presenta un análisis de los resultados obtenidos con PA basado en la interpretación de vistas S-Scan y C-Scan (figuras 9-12) en donde se muestran diferencias en los resultados de las mediciones al variar los parámetros de estudio. Este sistema facilitó la obtención de los resultados reduciendo demoras y posibles errores en los cálculos matemáticos. Los tamaños finales se registraron en la tabla 1- Anexo E.

En la figura 9 se presentan cuatro C-Scan para dos muestras verticales variando la resolución angular: las figuras 9a) y 9c) corresponden a M2 (discontinuidad con punta plana) con resolución de 0.5 y 1.0 respectivamente y las figuras 9b) y 9d) hacen referencia a M4 (discontinuidad con punta redondeada) con resolución de 0.5 y 1.0 respectivamente. Comparando los resultados obtenidos al variar este factor, se puede observar la diferencia en cuanto a amplitud de la señal, en donde para ambas muestras al emplear una resolución angular de 0,5° aparece un color rojo más intenso indicando amplitudes de 71% para M2 [ver figura 9a)] y 59% para M4 [ver figura 9b)], en comparación con las vistas obtenidas para una resolución angular de 1.0° las cuales representan amplitudes de 65% para la muestra M2 [ver figura 9c)] y 68% para la muestra M4 [ver figura 9d)].

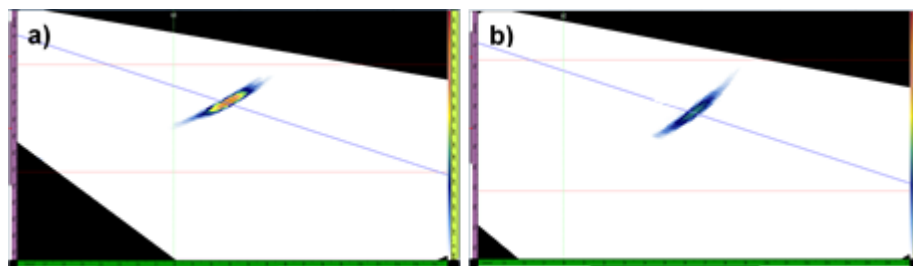
Figura 9. Vistas C-Scan en la detección de dos discontinuidades (M2 y M4) variando la resolución angular; **a y b)** Resolución de 0.5°, **c y d)** Resolución de 1.0°.



Estos resultados se relacionan con la investigación de J. Poguet y P. Ciorau [5], quienes al evaluar la influencia de los parámetros de PA en la ubicación, patrón y tamaño de grietas obtuvieron mediciones más exactas al emplear un valor de resolución menor a 1°. El comportamiento anterior no se presenta en todas las muestras estudiadas y estadísticamente se emplearon todos los datos para determinar cuáles factores tienen mayor efecto sobre las mediciones. Los resultados se presentan en la tabla 5 del Anexo F.

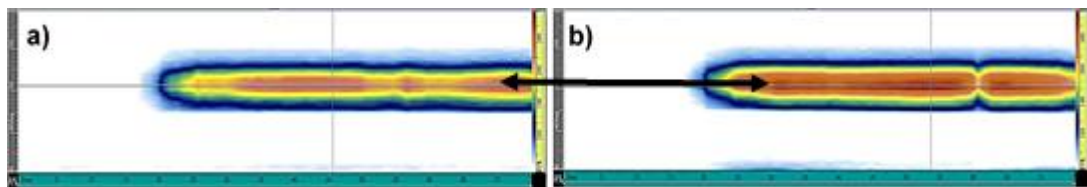
En la figura 10 se observan vistas S-can correspondientes a la muestra M1 (discontinuidad con inclinación de 55° y punta plana) al variar la incidencia del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad, paralela o perpendicular. Cabe resaltar el notable cambio que presenta la variación de este factor; pues para una incidencia perpendicular podemos observar un color naranja intenso evidenciando una mayor amplitud, de 91%, además del crecimiento de la indicación en la vista C-scan presentada; con respecto a una incidencia paralela que generó una amplitud de 43%. Este comportamiento se presenta para ambas muestras (M1 y M2).

Figura 10. Vistas S-Scan en la detección de una discontinuidad (M1) variando la incidencia del haz ultrasónico; **a)** Incidencia perpendicular a la discontinuidad, **b)** Incidencia paralela a la discontinuidad [ver tabla 2].



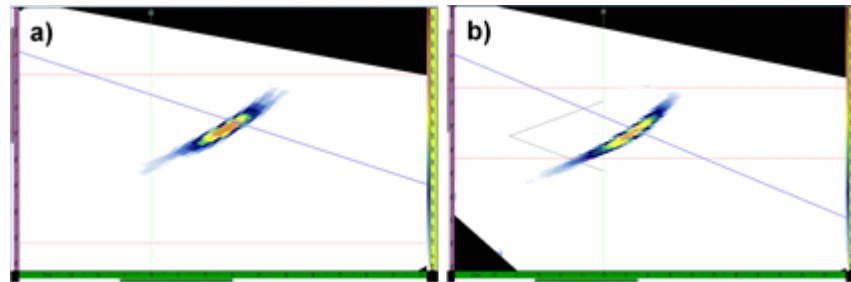
En la figura 11 se observan dos vistas C-Scan de dos discontinuidades diferentes: la imagen 11a) hace referencia a la muestra M2 (discontinuidad vertical con punta plana) y la imagen 11b) corresponde a la muestra M4 (discontinuidad vertical con punta redondeada). No es relevante su diferencia en cuanto a forma; sin embargo, se puede notar un cambio en la amplitud de la señal de la indicación: para la muestra con punta redondeada (M4) se incrementa la intensidad del color rojo evidenciando una mayor amplitud de 92% en comparación con la discontinuidad de punta plana (M2) que presentó una amplitud de 73.4%. Este comportamiento probablemente se debe a la difracción del haz ultrasónico en el extremo de la discontinuidad.

Figura 11. Vistas C-Scan en la detección de discontinuidades (M3 y M4) con diferente morfología; a) Punta plana, b) Punta redondeada.



En la figura 12 se observan dos vistas S-Scan para dos discontinuidades que difieren en su ángulo de inclinación: la imagen 12a) hace referencia a la muestra M3 (discontinuidad inclinada a 55° con punta redondeada) donde el haz incide perpendicular a la discontinuidad y la imagen 12b) corresponde a la muestra M4 (discontinuidad vertical con punta redondeada) para la cual el haz ultrasónico incide de manera oblicua respecto a la discontinuidad. Se presentó una diferencia en cuanto a amplitud y forma: la señal correspondiente a la muestra M3 presenta una mayor amplitud de 73,4% y leve ensanchamiento, además de haber obtenido resultados más exactos (con un máximo porcentaje de error de 49,44%) para este tipo de discontinuidad en la mayoría de planes de inspección diseñados. Lo anterior se presenta de igual manera al comparar los resultados de las muestras M1 (discontinuidad inclinada 55° con punta plana) y M2 (discontinuidad vertical con punta plana).

Figura 12. Vistas S-Scan en la detección de discontinuidades (M3 y M4) con diferente ángulo de inclinación; **a)** Discontinuidad inclinada (55° con respecto a la superficie de la muestra), **b)** Discontinuidad vertical (90° respecto a la superficie de la muestra).



Teniendo todos los resultados de las mediciones con ultrasonido UT y PA, se realizó un análisis del efecto de las variables en estudio y de la exactitud de los resultados obtenidos, el cual se presenta a continuación.

4.3 Análisis estadístico de los resultados de ultrasonido

A continuación, se presentan los análisis estadísticos que permitieron conocer la exactitud y precisión de los resultados.

4.3.1 Resultados Con Ultrasonido Convencional. Se calculó la desviación estándar de los resultados obtenidos para cada muestra respecto a cada factor en estudio, así como también el porcentaje de error al comparar los valores experimentales con los de referencia. Lo anterior se puede observar en las tablas 2, 3 y 4 del anexo E enfocadas en el ángulo de refracción, la morfología de la punta y la incidencia del haz respecto a la discontinuidad, respectivamente; y en las cuales se señalan los resultados de mayor y menor desviación y porcentaje de error.

Una desviación estándar de cero obtenida al analizar un factor determinado indica que los demás factores en estudio no alteran las mediciones y el resultado es muy confiable; pero,

si por el contrario existe una desviación diferente de cero, entre mayor sea el valor de ésta indica que al medir con diferentes configuraciones las mediciones varían y el resultado es dependiente de los factores restantes. Los porcentajes de error presentados en cada caso permiten calcular la exactitud en las mediciones.

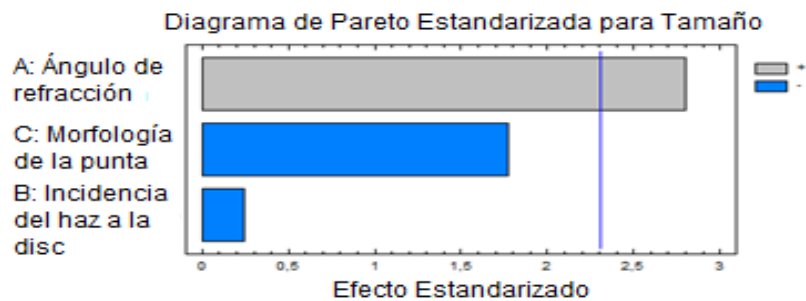
En la tabla 2-Anexo E se puede observar que al variar el ángulo de refracción se obtuvo una mínima desviación estándar de 0,045 mm al inspeccionar la muestra M4 (discontinuidad vertical con punta redondeada) con un ángulo de refracción de 45° y una máxima desviación de 1,048 mm para la misma muestra (M4) empleando un ángulo de 70°. Por otro lado, el resultado más y menos exacto con errores del 3,72% y 77,50% respectivamente, se obtuvieron al inspeccionar las muestras M1 y M2 con un ángulo de 70°, siendo el más exacto correspondiente a la medición de M1 (discontinuidad inclinada con punta plana).

En la tabla 3-Anexo E se pueden observar los resultados obtenidos enfocándose en la morfología de la punta. De ella se puede deducir que para las muestras con punta plana (M1 y M2) se obtuvo una mínima desviación estándar de 0,52 mm y error mínimo de 8,76% para una discontinuidad inclinada a 55° respecto a la superficie (M1); y para las muestras con punta redondeada (M3 y M4) resultó una mínima desviación estándar de 0,74 mm para una discontinuidad vertical (M4) y un error mínimo del 10,85% para una discontinuidad inclinada a 55° respecto a la superficie (M3). Lo anterior permite concluir que: la morfología de la punta es una variable que influye en mayor proporción sobre la exactitud de los resultados en la medición de discontinuidades verticales (M2 y M4) en comparación con las inclinadas (M1 y M3).

De la tabla 4-Anexo E se puede deducir que, al modificar la incidencia del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad, para las muestras inclinadas se obtuvo mejores resultados al inspeccionar con incidencia paralela la muestra M1 (discontinuidad inclinada 55° con punta plana) logrando una desviación estándar de 0,21 mm y un 6,77% de error. Respecto a las discontinuidades verticales cuya incidencia es siempre oblicua, se obtuvo una desviación estándar mínima de 0,74 mm y un error mínimo de 8,11% al inspeccionar una discontinuidad con punta redondeada (M4).

Además de lo anterior, con ayuda del programa STATGRAPHICS se diseñó un experimento que contenía cada uno de los resultados obtenidos para cada plan de inspección, el cual permitió obtener un diagrama de Pareto que presenta el efecto que tiene cada factor en las mediciones realizadas, con un nivel de confianza del 95%; ilustrado en la figura 13.

Figura 13. Efecto de los parámetros analizados en las mediciones utilizando la técnica de ultrasonido convencional.



En el diagrama anterior, la línea vertical azul corresponde al límite hasta el cuál no hay efecto relevante en los resultados; y con esto se puede determinar que el factor principal que produjo mayor efecto en este tipo de mediciones fue el ángulo de refracción, el cual determina la perpendicularidad entre el haz ultrasónico y la discontinuidad, lo cual influye en la reflexión de la señal y el resultado final de cada plan de inspección.

Finalmente, para conocer y comparar la exactitud de los resultados de las diferentes mediciones realizadas; se calculó el porcentaje de error de cada medición y se determinaron los resultados más y menos exactos para cada muestra, los cuales se resaltan con color amarillo y verde respectivamente, en la tabla 5 del Anexo E. En esta tabla, se puede observar que los resultados con mayor exactitud corresponden a las mediciones para una discontinuidad inclinada con punta plana (M1), utilizando un ángulo de refracción de 45° y con una incidencia paralela del haz respecto a la discontinuidad; y se obtuvo mayor error en la toma de mediciones para una discontinuidad vertical con punta plana (M2), utilizando un ángulo de 60° y con una incidencia oblicua del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad.

4.3.2 Resultados con Phased Array PA. Para PA, también se analizó estadísticamente la precisión y exactitud de los resultados teniendo en cuenta cada factor evaluado. En las tablas de la 2, 3, 4 y 5 del Anexo F se muestran los resultados de las desviaciones estándar y porcentajes de error para cada muestra modificando cada factor en estudio.

En la tabla 2-Anexo F se pueden observar los resultados obtenidos variando la incidencia del haz respecto a la discontinuidad. En ella podemos observar que para las discontinuidades inclinadas (M1 y M3) se obtuvieron mejores resultados en las mediciones a M1, con una desviación estándar de 0,15 mm para una incidencia paralela y con un error mínimo del 6,92% para una incidencia perpendicular. Para las discontinuidades verticales cuya incidencia fue oblicua, se presentó una desviación mínima de 0,99 mm y un mínimo error de 31,34% para una discontinuidad con punta plana (M2).

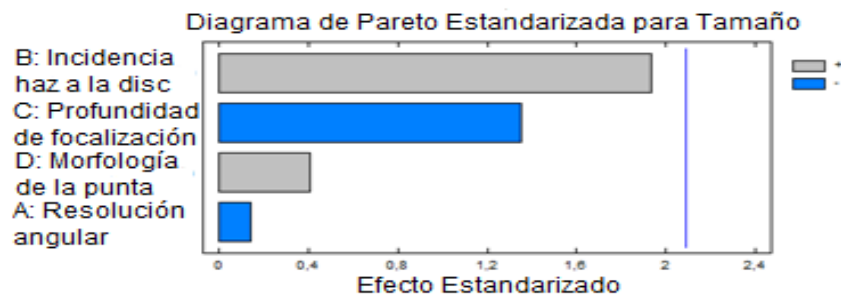
De la tabla 3-Anexo F, donde se enfoca en la morfología de la punta de la discontinuidad se puede deducir que para las muestras con punta plana (M1 y M2) se obtuvo una mínima desviación estándar de 0,34 mm y un mínimo error de 16,95% para la discontinuidad de M1; y para las muestras con punta redondeada (M3 y M4) resultó una mínima desviación estándar de 0,53 mm y un error mínimo del 18,40% para la discontinuidad de M3.

En la tabla 4-Anexo F, observando los resultados para cada muestra dependiendo de la profundidad de focalización, se deduce que el resultado más preciso con una desviación de 0,014 mm se obtiene al inspeccionar la muestra M2 empleando una focalización al final del campo cercano (10 mm) y el resultado más exacto con un error del 2,81% se logra con la medición de la discontinuidad de M4 focalizando en 10 mm.

En la tabla 5-Anexo F, se presentan las desviaciones y porcentajes de error obtenidos para cada muestra dependiendo de la resolución angular, permitiendo observar que el mejor resultado se obtuvo al inspeccionar la muestra M1, logrando una desviación estándar de 0,36 mm al emplear una resolución angular de 1° y un mínimo error del 16,77% para una resolución de 0, 5°.

A continuación, en la figura 14, se muestra un diagrama de Pareto del efecto que tiene cada factor evaluado en las mediciones con PA, obtenido con el programa STATGRAPHICS y de características similares al ilustrado en la figura 13.

Figura 14. Efecto de los parámetros analizados en las mediciones utilizando la técnica de Phased Array.



En el diagrama anterior, se puede observar que ninguno de los factores evaluados sobrepasa el límite de efecto; sin embargo, el factor con mayor influencia en las mediciones fue la incidencia del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad. Como se observó anteriormente en las vistas obtenidas por el programa OmniPc 4.3 este factor influye tanto en la amplitud de las señales como en la forma y tamaño resultante, demostrando que para la técnica de PA es un factor crítico que determina en gran medida la exactitud de los resultados finales. Lo anterior coincide con los resultados obtenidos por Carlos Galán en su investigación [8].

A continuación, se calculó estadísticamente el error para cada resultado, presentados en la tabla 6 del Anexo F, en la cual se señalan los resultados más exactos (color amarillo) y menos exactos (color morado) para cada una de las muestras analizadas. En esta tabla, se puede observar que la técnica de PA presentó mayor exactitud al inspeccionar la muestra M1 (discontinuidad inclinada y punta plana) empleando una resolución angular de $0,5^\circ$ con una incidencia perpendicular del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad y sin profundidad de focalización; y los resultados más desfavorables se obtuvieron en la medición realizada a la muestra M4 (discontinuidad vertical y punta redondeada) empleando una resolución angular de $0,5^\circ$ con incidencia oblicua del haz respecto a la discontinuidad y sin profundidad de focalización.

5 CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de la presente investigación, la cual se enfocó en evaluar dos técnicas de ultrasonido para la detección de discontinuidades en piezas metálicas, y bajo las condiciones experimentales, se concluye lo siguiente:

Al emplear el método de ultrasonido convencional, el ángulo de refracción es el factor que tiene mayor influencia y efecto significativo en las mediciones de una discontinuidad presente en un componente metálico, registrándose un error hasta de 77% dependiendo del ángulo empleado y el tipo de discontinuidad a inspeccionar, demostrando que el resultado de las mediciones depende del ángulo con el que incide el haz ultrasónico sobre la discontinuidad. Otros factores tales como la incidencia del haz respecto a la discontinuidad y la morfología de la punta de ésta, tienen un efecto menor en las mediciones dependiendo del plan de inspección diseñado; así, al modificar alguno de éstos se obtienen rangos de errores de hasta un 30% respecto a la incidencia del haz y de un 57% con referencia a la morfología de la punta, dependiendo de la configuración seleccionada y la discontinuidad a inspeccionar.

La técnica de *Phased Array* tiene muchos factores involucrados dentro de su procedimiento, los cuales influyen en las mediciones tomadas al inspeccionar discontinuidades presentes en piezas metálicas. Dentro de éstos se encuentra, principalmente, la incidencia del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad, obteniendo un rango de error de hasta un 32% dependiendo de la configuración diseñada. Los demás factores en estudio: Morfología de la punta, profundidad de focalización y resolución angular, también tienen efecto en los resultados finales, obteniendo porcentajes de error máximos de un 21%, 81% y 15% respectivamente los cuales varían dependiendo del plan de inspección planteado.

Mediante la técnica de ultrasonido convencional es posible identificar si una discontinuidad es vertical o inclinada debido a que el dimensionamiento se realiza de manera manual desplazando el palpador de forma perpendicular a la indicación; mientras que la técnica de *Phased Array* no diferencia fácilmente la forma inclinada o vertical de una discontinuidad.

La técnica de ultrasonido convencional permite conocer el tamaño de las discontinuidades presentes en un material metálico con mayor error en las mediciones en comparación con *Phased Array*, con el cuál se obtuvo en la mayoría de planes de inspección errores por debajo del 17%. Lo anterior se justifica principalmente por la escasa tecnología en el proceso, ya que en UT está involucrado el error del operario en cuanto a exactitud y precisión de los procedimientos, además de una menor rapidez en la inspección.

Para emplear alguna de las dos técnicas en estudio (Ultrasonido Convencional o *Phased Array*) es importante, inicialmente, diseñar el plan de inspección con los factores analizados, con el cual se va a realizar la inspección; ya que dependiendo del tipo de discontinuidad presente habrá una configuración específica para la cuál será posible reducir los errores en los resultados finales y obtener mayor exactitud en las mediciones realizadas.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar este tipo de investigación en muestras con grietas reales.

Esta información pueda ser recopilada junto con otras investigaciones similares con la posibilidad de crear un software que permita simular o sincronizarse con los que ya existan para crear un plan de inspección adecuado para la aplicación específica o tipo de discontinuidad a medir.

Implementar los planes de inspección con menores porcentajes de error sobre discontinuidades reales que permitan entender el comportamiento de la onda ultrasónica y obtener la mayor exactitud en las mediciones.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KALPAKIJAN, S.; SCHMID, S. R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5ta Edición. México: Pearson Educación, 2002..
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. Nondestructive Testing Vol 3.03: Evaluating Phased Array Characteristics of Phased Array Ultrasonic Testing Instruments and Systems, Conshohocken, PA: 2012. (ASTM E2491).
- [3] AMERICAN WELDING SOCIETY. Código de Soldadura Estructural. Miami: 2010. (AWS D1.1M:2010).
- [4] «UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Blogs de la Comunidad UTP. [15 de Julio de 2015].».
- [5] POGUET, Jerome; CIORAU, Peter. The influence of PAUT Parameters on Crack Location, Pattern and Height Sizing.
- [6] PITKÄNEN, Jorma; LAUKKANEN, Anssi; KEMPPAINEN, Mika; VIRKKUNEN, likka. Effect of Stress on Ultrasonic Response in Detection and Sizing of Cracks. En: NDT net [en línea] (2016) <http://evirtual.lasalle.edu.co/info_basica/nuevos/guia/GuiaClaseNo.3.pdf>, [Citado en Diciembre de 2017].
- [7] ARMITT, Tim; CIORAU, Peter; COULAS, Jason. A contribution to Quatifying the Sources of Errors in PAUT. En: NDT net. [En línea] (2012), <http://www.ndt.net/article/ndtnet/2012/40_Ciorau.pdf>[Citado Diciembre/ 2017].
- [8] GALAN PINILLA, Carlos Andrés. Estimación de la técnica de Ultrasonido con Arreglo de Fases del tamaño de Discontinuidades Planares Inducidas Artificialmente., Bucaramanga, 2017. Tesis de grado (Msc Ingeniero Metalúrgico) Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.

[9] RODRIGUEZ PAREDES, Eduardo Javier. Estudio de la efectividad del ensayo de ultrasonido para inspección estructural a aceros A 37 -24 ES de calidad SAE 1020. Tesis de Grado (Ingeniero Civil en Obras Civiles), Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles. Disponible en línea en la página de la Universidad Austral de Chile<<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcir696e/doc/bmfcir696e.pdf>>.

[10] NARDONI, G.; CERTO, M.; NARDONI, P.; et al. 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, En: NDT net. [En línea] (2012) Disponible en: <http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/28_wcndtfinal00028.pdf> [Citado en Diciembre de 2017].

[11] CHINOME, I.; PABON, D. Elaboración de Muestras Soldadas en T Empleando Tubería, para su evaluación Mediante Ensayos no Destructivos. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2015. Tesis de grado (Ingeniero Metalúrgico) Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.

[12] KURZ, Jochen H; JÜNGERT, Anne; DUGAN, Sandra; DOBMANN, Gerd. Probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering NDT in probabilistic damage assessments [En línea] (2012), <http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/329_wcndtfinal00329.pdf>[Citado en Diciembre de 2017].

[13] OLYMPUS NDT. Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications. En: NDT Field Guides (2010), Canada.

[14] DEPARTAMENTO TÉCNICO LLOOG S.A DE C.V. Manual de Operación USM 35. En: Llog S.A. [En línea] (2006), <http://evirtual.lasalle.edu.co/info_basica/nuevos/guia/GuiaClaseNo.3.pdf>[Citado en Noviembre 2017].

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. Nondestructive Testing Vol 3.03: Evaluating Phased Array Characteristics of Phased Array Ultrasonic Testing Instruments and Systems, Conshohocken, PA: 2012. (ASTM E2491).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. Nondestructive Testing Vol 3.03: Evaluating Phased Array Characteristics of Phased Array Ultrasonic Testing Instruments and Systems, Conshohocken, PA: 2012. (ASTM E2491).

ARMITT, Tim; CIORAU, Peter; COULAS, Jason. A contribution to Quantifying the Sources of Errors in PAUT. En: NDT net. [En línea] (2012), <http://www.ndt.net/article/ndtnet/2012/40_Ciorau.pdf>[Citado Diciembre/ 2017].

CHINOME, I.; PABON, D. Elaboración de Muestras Soldadas en T Empleando Tubería, para su evaluación Mediante Ensayos no Destructivos. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2015. Tesis de grado (Ingeniero Metalúrgico) Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

DEPARTAMENTO TÉCNICO LLOOG S.A DE C.V. Manual de Operación USM 35. En: Llog S.A. [En línea] (2006), <http://evirtual.lasalle.edu.co/info_basica/nuevos/guia/GuiaClaseNo.3.pdf>[Citado en Noviembre 2017].

GALAN PINILLA, Carlos Andrés. Estimación de la técnica de Ultrasonido con Arreglo de Fases del tamaño de Discontinuidades Planares Inducidas Artificialmente., Bucaramanga, 2017. Tesis de grado (Msc Ingeniero Metalúrgico) Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

KALPAKIJAN, S.; SCHMID, S. R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5ta Edición. México: Pearson Educación, 2002..

KURZ, Jochen H; JÜNGERT, Anne; DUGAN, Sandra; DOBMANN, Gerd. Probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering

NDT in probabilistic damage assessments [En línea] (2012), <http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/329_wcndtfinal00329.pdf> [Citado en Diciembre de 2017].

NARDONI, G.; CERTO, M.; NARDONI, P.; et al. 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, En: NDT net. [En línea] (2012) Disponible en: <http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/28_wcndtfinal00028.pdf> [Citado en Diciembre de 2017].

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

PITKÄNEN, Jorma; LAUKKANEN, Anssi; KEMPPAINEN, Mika; VIRKKUNEN, Iikka. Effect of Stress on Ultrasonic Response in Detection and Sizing of Cracks. En: NDT net [en línea] (2016) <http://evirtual.lasalle.edu.co/info_basica/nuevos/guia/GuiaClaseNo.3.pdf>, [Citado en Diciembre de 2017].

POGUET, Jerome; CIORAU, Peter. The influence of PAUT Parameters on Crack Location, Pattern and Height Sizing.

RODRIGUEZ PAREDES, Eduardo Javier. Estudio de la efectividad del ensayo de ultrasonido para inspección estructural a aceros A 37 -24 ES de calidad SAE 1020. Tesis de Grado (Ingeniero Civil en Obras Civiles), Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles. Disponible en línea en la página de la Universidad Austral de Chile <<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcir696e/doc/bmfcir696e.pdf>>.

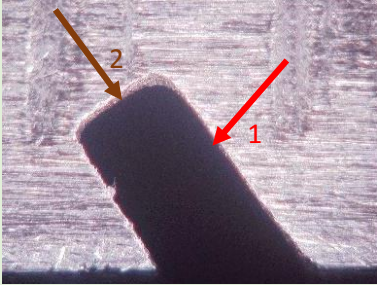
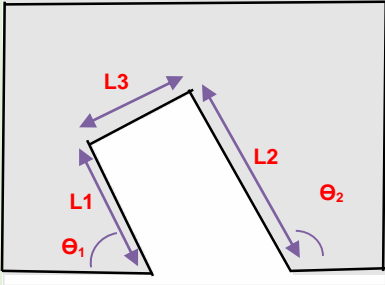
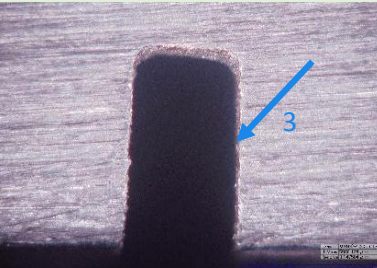
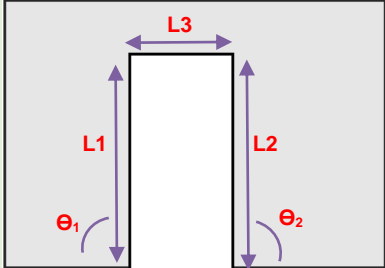
«UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Blogs de la Comunidad UTP. [15 de Julio de 2015].».

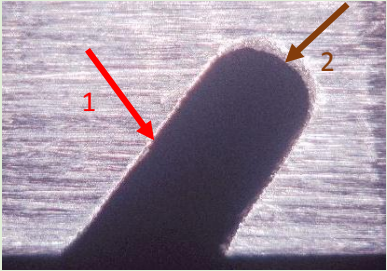
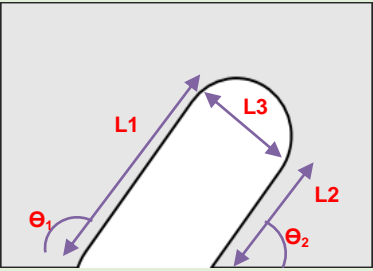
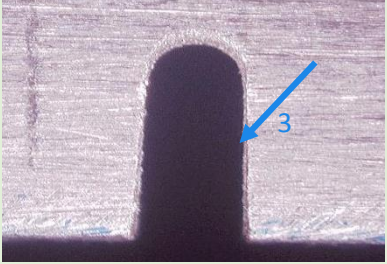
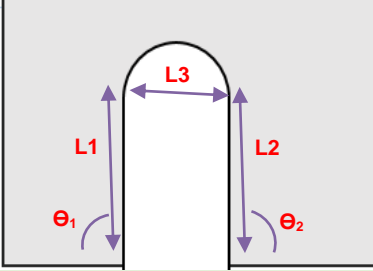
Anexos

Anexo A. Dimensionamiento de las discontinuidades evaluadas.

En la siguiente imagen se presenta el esquema de la discontinuidad presente en cada una de las muestras con sus respectivas mediciones, donde podemos observar sus dimensiones y los ángulos que forman con la superficie del material; además de una representación de las diferentes maneras en como incide el haz ultrasónico respecto a la discontinuidad. Las flechas 1 para una incidencia perpendicular, flechas 2 para una incidencia paralela y flechas 3 para una incidencia oblicua.

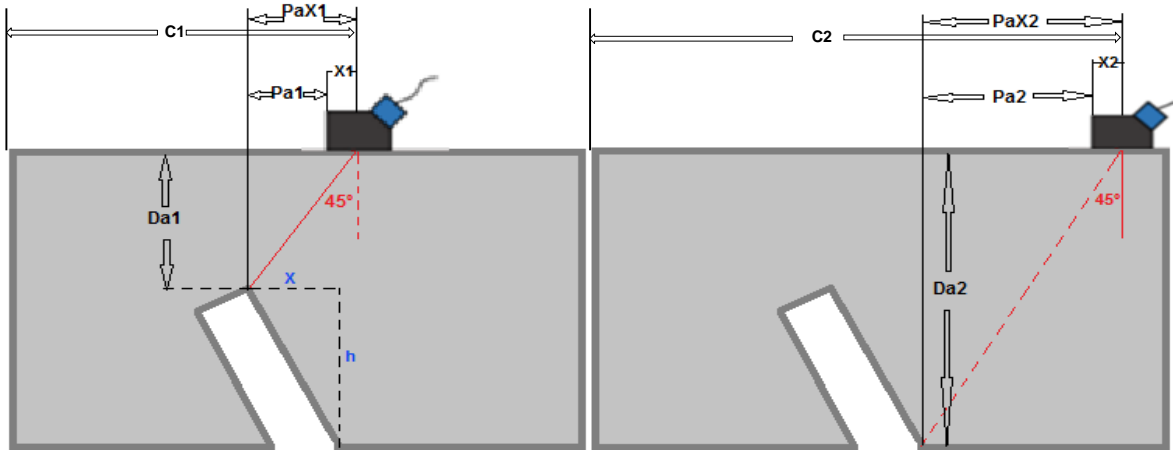
Tabla 1. Esquema y dimensiones de las discontinuidades evaluadas.

	DISCONTINUIDAD	PARÁMETROS	DIMENSIONES
MUESTRA M1			$L1=1830,512 \mu\text{m}$ $L2=2849,515 \mu\text{m}$ $L3=1204,719 \mu\text{m}$ $\theta_1=58,906^\circ$ $\theta_2=128,061^\circ$
MUESTRA M2			$L1=2383,128 \mu\text{m}$ $L2=2435,026 \mu\text{m}$ $L3=1311,950 \mu\text{m}$ $\theta_1=94,399^\circ$ $\theta_2=89,262^\circ$

<p>MUESTRA M3</p>			<p> $L1=2864 \mu\text{m}$ $L2=1859 \mu\text{m}$ $L3=1365 \mu\text{m}$ $P = 1930 \mu\text{m}$ $\Theta_1=131,186^\circ$ $\Theta_2= 58,787^\circ$ </p>
<p>MUESTRA M4</p>			<p> $L1=2477 \mu\text{m}$ $L2=2377 \mu\text{m}$ $L3=1395 \mu\text{m}$ $R=618 \mu\text{m}$ $\Theta_1=94,467^\circ$ $\Theta_2=93,397^\circ$ </p>

Anexo B. Procedimiento para calcular el tamaño de las discontinuidades medidas con ut.

Figura 1. Esquema empleado para determinar trigonométricamente el tamaño de las discontinuidades medidas con UT.



$$h = Da2 - Da1$$

$$x = (C2 - PaX2) - (C1 - PaX1)$$

$$\text{Tamaño final de la discontinuidad} = \sqrt{h^2 + x^2}$$

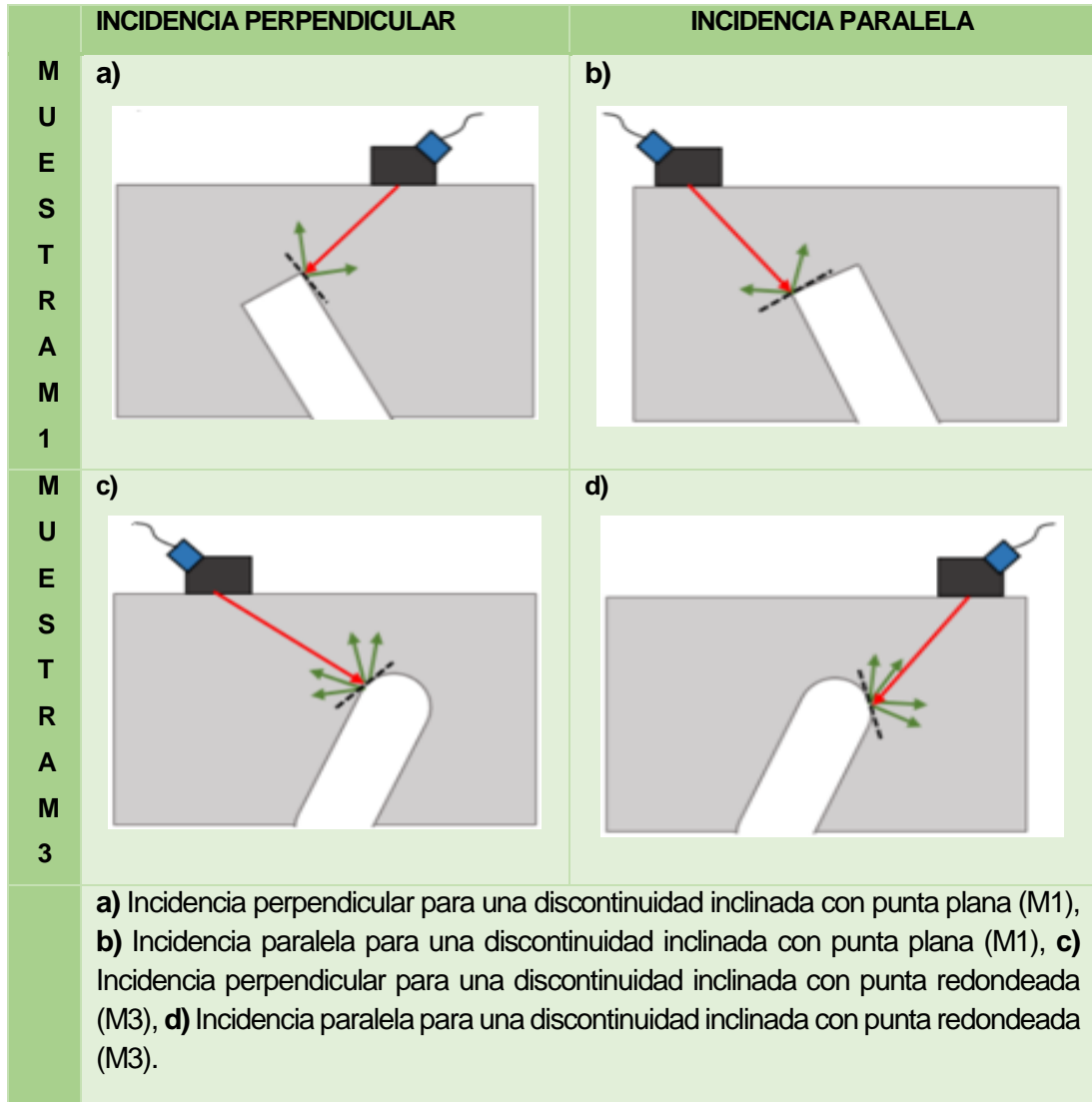
Anexo C. Diseño de los planes de inspección

Tabla 1. Diseño de experimentos realizados para cada técnica.

ULTRASONIDO CONVENCIONAL		PHASED ARRAY (Barrido Sectorial)	
PARÁMETROS	NIVELES	PARÁMETROS	NIVELES
Ángulo de refracción	45°-60°-70°	Resolución Angular	0,5° - 1°
		Profundidad de focalización	Sin focalizar – Focalizando al final de campo cercano.
VARIABLE DE RESPUESTA UT Y PA: Tamaño de las discontinuidades.			
Para las técnicas UT y PA se emplearon discontinuidades con un tamaño de 2,5 [mm]; con inclinación paralela, perpendicular y oblicua respecto al haz ultrasónico. Adicionalmente, la punta tenía morfología plana y redondeada.			

Anexo D. Forma de incidencia del haz (perpendicular y paralela)

Figura 1. Incidencias perpendicular y paralela del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad para las muestras M1 y M3.



Anexo E. Resultados de las mediciones con ultrasonido convencional

Tabla 1. Tamaño de las discontinuidades en las muestras medido con Ultrasonido Convencional para cada plan de inspección.

Plan de inspección	Muestra (m)	Ángulo de refracción (°)	*Incidencia del haz respecto a la discontinuidad	Morfología de la punta	Tamaño (mm)
1	m1	45	Perpendicular	Plana	3,7
2	m1	45	Paralela	Plana	2,81
3	m1	60	Perpendicular	Plana	3,5
4	m1	60	Paralela	Plana	3,06
5	m1	70	Perpendicular	Plana	2,24
6	m1	70	Paralela	Plana	3,23
7	m2	45	Oblicua	Plana	2,1
8	m2	60	Oblicua	Plana	3,9
9	m2	70	Oblicua	Plana	4,23
10	m3	45	Perpendicular	Redondeada	1,53
11	m3	45	Paralela	Redondeada	2,2
12	m3	60	Perpendicular	Redondeada	3,47
13	m3	60	Paralela	Redondeada	3,7
14	m3	70	Perpendicular	Redondeada	4,21
15	m3	70	Paralela	Redondeada	3,94
16	m4	45	Oblicua	Redondeada	1,85
17	m4	60	Oblicua	Redondeada	2,53
18	m4	70	Oblicua	Redondeada	3,33

* La incidencia paralela o perpendicular del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad para las muestras inclinadas 55° respecto a la superficie, hace referencia a que la inspección se realizó por ambos costados de la muestra.

Tabla 2. Desviación estándar para cada muestra dependiendo del ángulo de refracción.

Ángulo de Refracción (°)						
Muestra	45	60	70	45	60	70
	Desviación estándar (mm)			% Error		
m1	0,629325	0,3111269	0,7000357	14,5763	15,45636	3,727691
m2	0,117898	0,6198655	0,9547439	11,8757	63,65925	77,50734
m3	0,473762	0,1626345	0,1909188	34,8812	25,17458	42,28351
m4	0,045092	0,7299315	1,0482657	22,1708	6,43668	40,09255
Color amarillo: Mejores resultados para cada ángulo de refracción. Color verde: Peores resultados para cada ángulo de refracción.						

Tabla 3. Desviación estándar para cada muestra dependiendo de la morfología de la punta.

Morfología de la Punta				
Muestra	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada
	Desviación estándar (mm)		% Error	
m1	0,52184289	-	8,768348059	-
m2	1,14642924	-	43,0969366	-
m3	-	1,06543418	-	10,8589385
m4	-	0,74081037	-	27,3313701
Color amarillo: Mejores resultados para cada morfología.				

Tabla 4. Desviación estándar para cada muestra dependiendo de la incidencia del haz respecto a la discontinuidad.

Incidencia del haz respecto a la discontinuidad						
Muestra	Perpendicular	Paralela	Oblicua	Perpendicular	Paralela	Oblicua
	Desviación estándar (mm)			% Error		
m1	0,791538	0,21126	-	10,76302	6,77367	-
m2	-	-	1,14642	-	-	43,0969
m3	1,38405	0,94297	-	7,19273	14,5251	-
m4	-	-	0,74081	-	-	8,11947
Color amarillo: Mejores resultados para cada incidencia.						

Tabla 5. Exactitud de los resultados obtenidos para cada plan de inspección en las mediciones con UT.

Plan de inspección	Muestra	Tamaño (mm)	Tamaño real (mm)	Error (%)
1	m1	3,7	2,8409	30,24041677
2	m1	2,81	2,8409	1,087683481
3	m1	3,5	2,8409	23,20039424
4	m1	3,06	2,8409	7,71234468
5	m1	2,24	2,8409	21,15174769
6	m1	3,23	2,8409	13,69636383
7	m2	2,1	2,383	11,87578682
8	m2	3,9	2,383	63,65925304
9	m2	4,23	2,383	77,50734368
10	m3	1,53	2,864	46,57821229
11	m3	2,2	2,864	23,18435754
12	m3	3,47	2,864	21,15921788
13	m3	3,7	2,864	29,18994413
14	m3	4,21	2,864	46,9972067
15	m3	3,94	2,864	37,5698324
16	m4	1,85	2,377	22,17080353
17	m4	2,53	2,377	6,436684897
18	m4	3,33	2,377	40,09255364

Color amarillo: Mejores resultados para cada muestra.
Color verde: Peores resultados para cada muestra.

Anexo F. Resultados de las mediciones empleando phased array

Tabla 1. Tamaño de las discontinuidades en las muestras medido Phased Array para cada plan de inspección.

Plan de Inspección	Muestra (m)	Resolución angular (°)	Incidencia del haz respecto a discontinuidad	Morfología de la punta	Profundidad de Focalización	Tamaño (mm)
1	m1	1	Perpendicular	Plana	sin	2,92
2	m1	1	Perpendicular	Plana	foc 10	3,19
3	m1	0,5	Perpendicular	Plana	sin	2,81
4	m1	0,5	Perpendicular	Plana	foc 10	3,23
5	m1	1	Paralela	Plana	sin	3,79
6	m1	1	Paralela	Plana	foc 10	3,41
7	m1	0,5	Paralela	Plana	sin	3,57
8	m1	0,5	Paralela	Plana	foc 10	3,66
9	m2	1	Oblicua	Plana	sin	3,81
10	m2	1	Oblicua	Plana	foc 10	2,27
11	m2	0,5	Oblicua	Plana	sin	4,15
12	m2	0,5	Oblicua	Plana	foc 10	2,29
13	m3	1	Perpendicular	Redondeada	sin	2,94
14	m3	1	Perpendicular	Redondeada	foc 10	3,28
15	m3	0,5	Perpendicular	Redondeada	sin	2,68
16	m3	0,5	Perpendicular	Redondeada	foc 10	3,35
17	m3	1	Paralela	Redondeada	sin	3,32
18	m3	1	Paralela	Redondeada	foc 10	4,05
19	m3	0,5	Paralela	Redondeada	sin	3,23
20	m3	0,5	Paralela	Redondeada	foc 10	4,28
21	m4	1	Oblicua	Redondeada	sin	4,27
22	m4	1	Oblicua	Redondeada	foc 10	2,27
23	m4	0,5	Oblicua	Redondeada	sin	4,35
24	m4	0,5	Oblicua	Redondeada	foc 10	2,35

* La incidencia paralela o perpendicular del haz ultrasónico respecto a la discontinuidad para las muestras inclinadas 55° respecto a la superficie, hace referencia a que la inspección se realizó por ambos costados de la muestra.

Tabla 2. Desviación estándar para cada muestra dependiendo de la incidencia del haz respecto a la discontinuidad.

Incidencia del haz respecto a la discontinuidad						
Muestra	Perpendicular	Paralela	Oblicua	Perpendicular	Paralela	Oblicua
	Desviación estándar			% Error		
m1	0,20483	0,15966		6,92034	26,98440	-
m2			0,99129	-	-	31,34704
m3	0,31159	0,52364		6,93086	29,88826	-
m4			1,15562	-	-	39,25115
Color amarillo: Mejores resultados para cada incidencia.						

Tabla 3. Desviación estándar para cada muestra dependiendo de la morfología de la punta de la discontinuidad.

Morfología de la punta				
Muestra	Plana	Redondeada	Plana	Redondeada
	Desviación estándar		% Error	
m1	0,3489065	-	16,95237425	-
m2	0,9912954	-	31,34704154	-
m3	-	0,531639983	-	18,40956704
m4	-	1,15562393	-	39,25115692
Color amarillo: Mejores resultados para cada morfología.				

Tabla 4. Desviación estándar para cada muestra dependiendo de la profundidad de focalización.

Profundidad de focalización				
Muestra	Sin focalizar	Focalizado en 10 mm	Sin focalizar	Focalizado en 10 mm
	Desviación estándar		% Error	
m1	0,48113581	0,2142234	15,1923686	18,7123799
m2	0,24041631	0,01414214	67,0163659	4,32228284
m3	0,29101833	0,50046645	6,2325419	30,5865922
m4	0,05656854	0,05656854	81,3209928	2,81867901
Color amarillo: Mejores resultados para cada profundidad de focalización. Color morado: Peores resultados para cada profundidad de focalización.				

Tabla 5. Desviación estándar para cada muestra dependiendo de la resolución angular.

Muestra	Resolución angular			
	0,5		1	
	Desviación estándar		% Error	
m1	0,385692	0,36772952	16,776374	17,12837481
m2	1,3152186	1,088944443	35,123794	27,57028955
m3	0,6641536	0,467216937	18,191341	18,6277933
m4	1,414213562	1,414213562	40,93395	37,56836348
Color amarillo: Mejores resultados para cada profundidad de focalización. Color morado: Peores resultados para cada profundidad de focalización.				

Tabla 6. Exactitud de los resultados obtenidos para cada plan de inspección en las mediciones con PA.

Plan de Inspección	Muestra (m)	Tamaño (mm)	Tamaño real (mm)	% error
1	m1	2,92	2,8409	2,78432891
2	m1	3,19	2,8409	12,28835932
3	m1	2,81	2,8409	1,087683481
4	m1	3,23	2,8409	13,69636383
5	m1	3,79	2,8409	33,40842691
6	m1	3,41	2,8409	20,0323841
7	m1	3,57	2,8409	25,66440213
8	m1	3,66	2,8409	28,83241226
9	m2	3,81	2,383	59,88250105
10	m2	2,27	2,383	4,741921947
11	m2	4,15	2,383	74,1502308
12	m2	2,29	2,383	3,902643726
13	m3	2,94	2,864	2,653631285
14	m3	3,28	2,864	14,52513966
15	m3	2,68	2,864	6,424581006
16	m3	3,35	2,864	16,96927374
17	m3	3,32	2,864	15,92178771
18	m3	4,05	2,864	41,41061453
19	m3	3,23	2,864	12,77932961
20	m3	4,28	2,864	49,44134078
21	m4	4,27	2,377	79,63819941
22	m4	2,27	2,377	4,501472444
23	m4	4,35	2,377	83,00378629
24	m4	2,35	2,377	1,13588557
Color amarillo: Mejores resultados para cada profundidad de focalización. Color morado: Peores resultados para cada profundidad de focalización.				