

**EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD Y LA PRECISIÓN PARA LA
DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES EN PIEZAS
METÁLICAS EMPLEANDO LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DE
ULTRASONIDO POR INMERSIÓN**

**ELSA NATHALIA BASTO DÍAZ
IVAN DARIO NIETO ROMERO**

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

2012

**EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD Y LA PRECISIÓN PARA LA
DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES EN PIEZAS
METÁLICAS EMPLEANDO LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DE
ULTRASONIDO POR INMERSIÓN**

**ELSA NATHALIA BASTO DÍAZ
IVAN DARIO NIETO ROMERO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero(a) Metalúrgico(a)**

DIRECTOR:

M.Sc. JULIAN ORLANDO HERRERA ORTÍZ

CODIRECTORA:

M.Sc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTÍZ

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

2012

DEDICATORIA

En primer lugar a mi Señor Dios, porque fue quien me regalo la vida y me sostuvo en los momentos difíciles a lo largo de mi formación universitaria, en los que creí desfallecer.

A mi Madre, quien ha sido el apoyo fundamental en mi vida, convirtiéndose en la mujer, amiga y confidente que a pesar de los obstáculos e inconvenientes presentes a lo largo de este tiempo, nunca dejo de creer en mí.

A mi Padre, que aunque las palabras no son el fuerte de él, siempre estuvo de una u otra manera apoyándome en cada una de las circunstancias y decisiones.

A mi hermosa hija, Ana Sofía, quien se convirtió en el motor, la fuerza necesaria para cada día luchar por esto, por ser mi máxima motivación para conseguir lo que deseaba.

A toda mi Familia, mi nonita, tías, tíos, primos, primas, a cada uno de los miembros de mi familia que nunca dejaron de apoyarme y de creer en mí.

Al Papá de mi hija y a su familia, de quienes siempre recibí el apoyo necesario cuando lo necesite.

A mi compañero de proyecto, Iván, "Mi Jefe", por ser esa excelente persona que siempre estuvo junto a mí en todo el desarrollo de esta importante etapa.

A mis amigos y compañeros más cercanos, Fabi, Luisito, Edy, Afanador, Kamo, Mary, Cindy, La Compis, Andre... a todos, por brindarme su cariño y amistad.

En fin a todas las personas que a lo largo de este camino me apoyaron, a quienes creyeron y no creyeron en mí, que me dieron las fuerzas suficientes para seguir adelante y demostrarles y demostrarme de lo que podía lograr.

Nathalia Basto

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios nuestro señor, que me dio la fuerza para seguir adelante en momentos difíciles, durante mi formación universitaria.

A mi Madre, quien ha sido una de las personas más importantes de mi vida siendo mi confidente y un apoyo fundamental durante toda mi carrera.

A mi Padre, quien es la persona que siempre ha confiado en mí, brindándome su apoyo incondicional en todas las decisiones importantes de mi vida.

A mis hermanos Claudia, Miguel, Carmelo y Hernando, quienes me brindaron el apoyo que solo un hermano puede dar.

A todos los miembros de mi familia que creyeron en mí y me brindaron su apoyo.

A mis amigos quienes me ofrecieron su amistad y cariño incondicionales siendo un apoyo muy grande e importante en cada uno de los momentos compartidos en la universidad.

Iván Darío.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Al querido director, **JULIAN ORLANDO HERRERA ORTIZ**, por el apoyo incondicional, paciencia, amistad, asesoría permanente, pero sobre todo la confianza que siempre demostró y que fue base fundamental para el desarrollo exitoso del presente proyecto, de corazón mil gracias.

A la profesora **LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ**, por el apoyo incondicional ofrecido, por creer en nuestras capacidades y brindarnos sus conocimientos para la realización de esta investigación.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, que de una u otra forma hicieron parte de nuestra formación universitaria, cuyos conocimientos transmitidos fueron base fundamental para el desarrollo de este trabajo de grado y finalizar nuestra carrera profesional.

Muchas Gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. MARCO TEÓRICO	23
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	38
3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	39
3.2 ETAPA 2: ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	39
3.2.1 Actividad 1: Entrenamiento con el equipo de ultrasonido.	40
3.2.2 Actividad 2: Reconocimiento del sistema de inmersión	41
3.2.3 Actividad 3: Selección del palpador.	42
3.2.4 Actividad 4: Calibración del equipo.	43
3.3 ETAPA 3: REALIZACIÓN DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO	44
3.3.1 Actividad 1: Estimación de la variación de espesor en las piezas patrón y en la pieza a inspeccionar.	44
3.4 ETAPA 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	50
3.5 ETAPA 5: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	50
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	51
4.1 REALIZACIÓN DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO	51

5. CONCLUSIONES	76
6. RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFIA	79
ANEXOS	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación de la evaluación de una pieza metálica por ultrasonido	25
Figura 2. Geometría típica de un haz ultrasónico.	30
Figura 3. Palpadores de inmersión. A) Palpador no focalizado. B) Palpador focalizado.	35
Figura 4. Equipo de ultrasonido KRAUTKRAMER USM 35XS.	40
Figura 5. Representación gráfica del sistema de inmersión.	41
Figura 6. Palpadores de inmersión. A) Palpador no focalizado de 10 [MHz]. B) Palpador focalizado de 20 [MHz]	43
Figura 7. Escalerilla patrón marca KRAUTKRAMER	44
Figura 8. Base fabricada para sostener la escalerilla patrón.	45
Figura 9. Sistema de inmersión para la escalerilla patrón empleando: A) palpador no focalizado y B) palpador focalizado.	46
Figura 10. Tubo patrón. A) Cambios de espesor externos. B) Cambios de espesor en la pared interna.	47
Figura 11. Sistema de inmersión para el tubo patrón empleando: A) palpador no focalizado y B) palpador focalizado.	48
Figura 12. Sección de tubo soldado	49
Figura 13. Sistema de inmersión para la sección de tubo soldado empleando palpador focalizado.	50
Figura 14. Comparación gráfica de la toma realizada empleando palpador no focalizado.	52
Figura 15. Contorno de la escalerilla, empleando palpador no focalizado.	53
Figura 16. Comportamiento del eco de entrada en el cambio de espesor de la escalerilla calibrada (Paso de 8 a 6 [mm]).	55

Figura 17. Comparación gráfica de la toma realizada empleando el palpador focalizado.	56
Fuente: Autores	56
Figura 19: Comportamiento del eco de entrada en el cambio de espesor de la escalerilla calibrada. (Paso de 8 a 6 [mm]).	58
Figura 20. Comparación entre las tomas representativas seleccionadas del palpador no focalizado y el palpador focalizado.	59
Figura 21. Registro del escalón de 10 [mm] con el microscopio HIROX HK 7700.	60
Figura 22. Micrografía de uno de los escalones de la escalerilla milimetrada.	61
Figura 23. Micrografía frontal de la escalerilla milimetrada	61
Figura 24. Comparación gráfica de los registros obtenidos, empleando el palpador no focalizado.	63
Figura 25. Contorno del tubo patrón, empleando el palpador no focalizado	63
Figura 26. Comportamiento de los ecos en la medición de los espesores de la pared interna de la sección de tubería.	64
Figura 27. Comparación gráfica de las tomas realizadas empleando el palpador focalizado.	65
Figura 28. Contorno del tubo patrón, empleando el palpador focalizado	66
Figura 29. Comportamiento de los ecos en la medición de los cambios de espesor externos del tubo patrón, empleando el palpador focalizado.	67
Figura 30. Comparación entre las tomas de mejor comportamiento para cada uno de los palpadores utilizados.	68
Figura 31. Sección de tubo soldado.	71
Figura 32. Trayectoria de inspección de la sección de tubo soldado.	73
Figura 33. Comparación gráfica de las tomas realizadas empleando el palpador focalizado.	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales ventajas y desventajas del ensayo no destructivo de ultrasonido	24
Tabla 2. Clasificación y características de las ondas ultrasónicas.	26
Tabla 3. Características del efecto piezoeléctrico y el efecto magnetostrictivo.	28
Tabla 4. Características fundamentales de un palpador.	29
Tabla 5. Zonas que componen el haz ultrasónico.	30
Tabla 6. Sistemas de ensayo y técnicas de ultrasonido.	32
Tabla 7. Sistemas de representación de pantallas TRC para ensayos ultrasónicos.	36
Tabla 8. Rango de espesores establecidos en cada uno de los palpadores.	53
Tabla 9. Rango de espesores establecidos en cada uno de los palpadores.	64
Tabla 10. Porcentajes de error obtenidos en cada sección de la tubería, para cada uno de los palpadores empleados.	69
Tabla 11: Medidas de los espesores en los orificios obtenidas con el microscopio HIROX HK 7700 y los palpadores empleados.	70

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. CÁLCULO DE LA DISTANCIA MÍNIMA PERMITIDA ENTRE EL PALPADOR Y LA PIEZA A INSPECCIONAR	81
ANEXO B. PLANOS DE LA PROBETA TUBULAR PROBLEMA	83
ANEXO C. CÁLCULO DE VARIANZA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y RANGO DE ESPESORES PARA LA ESCALERILLA, CON LOS PALPADORES FOCALIZADO Y NO FOCALIZADO.	84
ANEXO D. CÁLCULO DE VARIANZA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y RANGO DE ESPESORES PARA EL TUBO PATRÓN, CON LOS PALPADORES FOCALIZADO Y NO FOCALIZADO.	90

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD Y LA PRECISIÓN PARA LA DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES EN PIEZAS METÁLICAS EMPLEANDO LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DE ULTRASONIDO POR INMERSIÓN *

AUTORES: ELSA NATHALIA BASTO DÍAZ
IVAN DARIO NIETO ROMERO **

PALABRAS CLAVES: Ultrasonido por inmersión, palpador focalizado, palpador no focalizado, perdidas de espesor, ondas longitudinales.

RESUMEN: Este trabajo presenta el estudio de comparación de la sensibilidad entre los palpadores focalizados y no focalizados en la estimación de pérdidas de espesor en piezas planas y tubulares, empleando la prueba no destructiva de ultrasonido por inmersión.

Inicialmente se realizó la calibración del equipo, para lo cual se emplearon dos piezas patrones: la escalerilla inoxidable calibrada en milímetros (ASTM E797-05) y un tramo de tubería de acero ASTM A53, grado A, tipo S, a las cuales se les realizó una inspección milímetro a milímetro con cada uno de los palpadores seleccionados, determinando en cada punto la altura de la columna de agua y de esta manera la pérdida de espesor superficial.

Posteriormente, se realizó de igual manera la inspección a la pieza problema, una sección de tubería soldada previamente seleccionada y con una vida de uso desconocida.

Con el fin de verificar los datos obtenidos para cada una de las piezas inspeccionadas, se realizaron tomas micrográficas con el microscopio HIROX HK-7700.

Analizados los datos, finalmente se pudo comprobar que la inspección con la prueba de ultrasonido por inmersión empleando palpador focalizado, presenta mayor grado de sensibilidad a la hora de determinar el cambio de espesor superficial en las diferentes piezas metálicas, sin importar el grado de deterioro superficial que estas llegaran a presentar.

* Trabajo de Grado (Investigación)

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: M.Sc. Julian Orlando Herrera Ortiz Codirectora: M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz

ABSTRACT

TITLE: TITLE: EVALUATION OF THE ACCURACY SENSIBILIDAD AND FOR THE DETECTION OF METAL PARTS surface discontinuities IN USING THE TECHNICAL DISRUPTION OF ULTRASOUND BY IMMERSION*

AUTHORS: ELSA NATHALIA BASTO DÍAZ
IVAN DARIO NIETO ROMERO**

KEYWORDS: Immersion ultrasound, focused probe, probe unfocused, lost in thickness, longitudinal waves.

SUMMARY:

This paper presents a study comparing the sensitivity between the targeted and nontargeted probes in the estimation of loss of thickness in flat and tubular parts, using the ultrasonic nondestructive testing by immersion.

We initially performed the calibration of equipment, for which two pieces were used patterns: Stainless ladder calibrated in millimeters (ASTM E797-05) and a length of steel pipe ASTM A53, Grade A, Type S, which are an inspection millimeter at each of the selected probes, determining at each point the height of the water column and thus the loss of surface thickness.

He was treated similarly to the work piece inspection problem, a section of pipe welded preselected and a lifetime of use unknown. He was treated similarly to the work piece inspection problem, a section of pipe welded preselected and a lifetime of use unknown.

In order to verify the data obtained for each of the test pieces were made with the microscope micrographs jacks HIROX HK-7700.

Analyzed the data, finally it was found that the inspection with the ultrasound probe using focused immersion, showed the greatest sensitivity in determining the change in surface thickness in the different metal parts, regardless of the degree of surface damage this were to occur.

* Graduate Project (Investigation)

** Faculty of Engineering Physical - Chemistry. Metallurgical Engineering. School Director: M.Sc. Julian Orlando Herrera Ortíz Codirectora: M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortíz

INTRODUCCIÓN

El uso de tanques y tuberías en la industria petrolera, se hace necesario para el transporte y almacenamiento de hidrocarburos. Debido al ambiente en el que se mantienen dichos dispositivos, están expuestos a daños en su estructura; es por esto que se deben tener en cuenta diferentes técnicas de control, para así evitar problemas que posteriormente puedan causar daños ambientales, económicos y sociales. De esta forma se recurre a las técnicas no destructivas como el ultrasonido, con el fin de implementar una inspección integral para evitar posibles problemas, entre ellos las pérdidas de espesor que llevan a un descenso de las propiedades mecánicas de los dispositivos en cuestión.

Por lo mencionado anteriormente en el presente proyecto se evaluó la sensibilidad de palpadores focalizados y no focalizados en la estimación de la pérdida de espesor en piezas planas y tubulares mediante el ensayo no destructivo de ultrasonido, utilizando la técnica de inmersión, donde se empleo el agua como medio de transmisión de la onda ultrasónica y que a diferencia de la técnica tradicional de ultrasonido, no se requirió tener contacto entre la pieza y el transductor.

Para el desarrollo de las pruebas a nivel de laboratorio, se seleccionaron tres piezas diferentes: una escalerilla estandarizada de acero inoxidable, patrón para la calibración del equipo de ultrasonido; un tramo de tubería con cambios de espesor en sus paredes tanto internas como externas con agujeros de diferentes diámetros y profundidades; y una sección de tubo soldada, con un alto grado de deterioro superficial debido a la corrosión. A cada una de ellas, se le realizó la medición de sus espesores.

De acuerdo a los resultados obtenidos y realizando los respectivos análisis se pudo concluir que aunque los dos palpadores utilizados permitieron trazar el contorno de las piezas estudiadas, el palpador focalizado presentó además de una alta resolución, una excelente sensibilidad y precisión en la detección de pequeñas discontinuidades superficiales.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria petrolera requiere de equipos para el almacenamiento de los hidrocarburos una vez son extraídos del subsuelo, al igual que dispositivos para el transporte de los mismos de un lugar a otro. Para ello se emplean principalmente ductos, tuberías y tanques, los cuales se encuentran expuestos a una serie de problemas, debido a las condiciones climáticas, ambientales y en general a las ofrecidas por el entorno en el que se encuentran, afectando de manera directa las condiciones superficiales de estos.

La corrosión, un proceso natural que se puede retardar y monitorear pero nunca impedir, podría considerarse el problema más grave al cual se ven expuestas dichas instalaciones, pues originan una considerable pérdida de espesores, traducida en una disminución de las propiedades mecánicas, dando paso a daños ambientales, sociales y económicos representados ya sea por el costo de la reparación, la sustitución de tramos degradados o simplemente por el paro no planificado en la producción.

La inspección integral de los sistemas sometidos a presión, tanques de almacenamiento y tuberías de oleoductos, que contienen materiales peligrosos, tanto para la vida humana como para el medio ambiente y que están en servicio, ha tomado gran importancia en los últimos años, por lo que se ha estudiado y desarrollado un gran número de pruebas no destructivas que garanticen el estado real y el correcto funcionamiento, con el fin de realizar las operaciones pertinentes en el momento adecuado.

Una técnica no destructiva tiene como propósito determinar el estado de un material, proporcionando las acciones necesarias para revelar los detrimentos

que pueda tener la pieza en funcionamiento antes de que pueda ocurrir la falla. Hoy en día se cuenta con un gran conjunto de dichas técnicas, desarrolladas para ser aplicadas, teniendo en cuenta el material a inspeccionar y la defectología asociada al mismo.

Una de las principales pruebas empleadas en la inspección de las tuberías y sistemas a presión es el ultrasonido, el cual mediante uso de ondas ultrasónicas, ha permitido analizar el factor primordial influyente en la disminución de las propiedades mecánicas de la misma: la pérdida de espesor.

Es por ello, que en los últimos tiempos, se ha tomado un gran interés en el desarrollo continuo de equipos más potentes y especializados de alta tecnología que respondan de manera eficiente a las condiciones tanto de la pieza a inspeccionar como de la accesibilidad y posibles defectos a evaluar.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la sensibilidad y la precisión para la detección de discontinuidades superficiales en piezas metálicas empleando la técnica no destructiva de ultrasonido por inmersión.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la precisión y entre palpadores focalizados y no focalizados cuando se presentan cambios de espesor en piezas metálicas empleando la técnica de ultrasonido por inmersión.
- Estimar la sensibilidad para la detección de discontinuidades superficiales en piezas metálicas, empleando palpadores focalizados y no focalizados por medio de la técnica de ultrasonido por inmersión.

2. MARCO TEÓRICO

Los ensayos no destructivos son pruebas realizadas a materiales, piezas y estructuras para llevar un control de calidad sin causar algún daño que pueda afectar sus propiedades operacionales, asegurando la calidad y confiabilidad del objeto a inspeccionar con el fin de prevenir accidentes y producir beneficios económicos en vez de pérdidas¹. La información dada por estas pruebas puede ser de gran ayuda a la hora de establecer posibles discontinuidades tanto superficiales como internas, ya sea en uso o durante su fabricación.

Entre los ensayos no destructivos se tienen los ensayos visuales (EV), el radiológico (ER), el ultrasónico (EU), el magnético (EM), ensayo con líquidos penetrantes (EP), ensayo por corrientes inducidas (ECI), etc. Cada ensayo nombrado anteriormente tiene un criterio de escogencia determinado según el propósito que se tenga, entonces, se hace necesario seleccionar el método que mejor se adapte².

Actualmente el aprovechamiento del ultrasonido ha ganado espacio importante entre las técnicas de ensayos no destructivos a nivel industrial, siendo aplicable a todos los elementos y accesorios en tuberías sometidas a presión interna o externa, a las tuberías de acero al carbono y baja aleación empleadas en el transporte de líquidos (petróleo, crudo, condensado, gasolina natural, gas líquido natural, gas de petróleo licuado y productos líquidos de petróleo), a la inspección y

¹INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO. Curso de Ultrasonido Nivel II. ECOPETROL. 1996, Cap. III, p 3

²ECHEVARRIA, RICARDO. END - GENERALIDADES. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos no Destructivos. 2001. p 5.

evaluación de soldaduras en recipientes a presión³. De la misma forma este ensayo se puede emplear en la medición de espesores y detección de discontinuidades en productos laminados y piezas forjadas.

Como se había mencionado anteriormente, cada uno de los diferentes ensayos no destructivos presenta su criterio de escogencia según el propósito, por lo cual es importante conocer inicialmente las ventajas, desventajas o limitaciones de la inspección por ultrasonido como se expone en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales ventajas y desventajas del ensayo no destructivo de ultrasonido

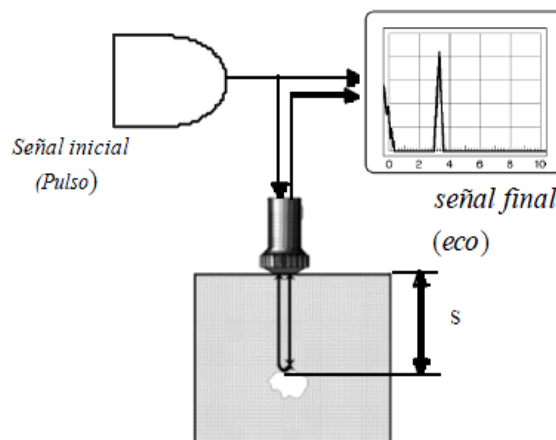
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Alta capacidad de penetración, lo que permite la identificación de discontinuidades internas, determinando tamaño, forma y ubicación exacta en el material. • Identificación de defectos relativamente pequeños debido a su alto grado de sensibilidad. • Equipo empleado es portátil y permite obtener lecturas inmediatas. • Debido a su operación electrónica, permite una mayor rapidez y automatización. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para emplear el equipo ultrasónico se requiere de técnicos especializados y con experiencia. • Para piezas de áreas mayores, se requiere de barridos mecánicos y/o arreglos de varios palpadores. • Se requiere de un medio acoplante que permita la propagación de las ondas ultrasónicas. • Se dificulta detectar discontinuidades cercanas a la superficie y en materiales con rugosidad elevada, geometría compleja y no homogénea. • Se debe realizar previamente a cualquier inspección, una calibración del equipo mediante el empleo de bloques patrón.

Fuente: Autores

³MANUAL DE INTRODUCCIÓN AL ULTRASONIDO INDUSTRIAL [en línea]. [Consultado 10 de Agosto, 2011]. Disponible en internet: <http://es.scribd.com/doc/29285450/Manual-de-Procedimiento-de-Ensayos-No-Destructivos-Por-EI-Metodo-de-Ultrasonido>

Durante el siglo XIX, se encontró que el sonido podía generarse con frecuencias superiores de las percibidas por el oído humano denominado sonido ultrasónico⁴; dichas vibraciones son las empleadas en la técnica no destructiva que permite inspeccionar las piezas metálicas como se menciona anteriormente. Estas son introducidas en el material a ensayar, como impulsos muy cortos de energía mecánica en forma de oscilaciones de altas frecuencia⁵, que son reflejadas por la existencia de interfases y analizadas para detectar la presencia y localización de fallas y discontinuidades, (como se puede apreciar en la Figura 1), permitiendo detectar con facilidad grietas, laminaciones, poros, socavados, inclusiones y otros defectos que producen interfaces reflectivas.

Figura 1. Representación de la evaluación de una pieza metálica por ultrasonido



Fuente: El ultrasonido y sus aplicaciones REDALYC

Dependiendo del modo de vibración de las partículas y la dirección de propagación, las ondas ultrasónicas pueden clasificarse en: longitudinales, transversales, superficiales y de Lamb. En la Tabla 2 se resumen sus principales características.

⁴INSTITUTO COLOMBIANO DE PETROLEO. Op. Cit., Cap I. p 4.

⁵IBID Cap. II, p 1

Tabla 2. Clasificación y características de las ondas ultrasónicas.

TIPOS DE ONDA	CARACTERÍSTICAS	ECUACIÓN VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN
<p>Longitudinal</p>	<p>También llamadas ondas de compresión.</p> <p>La dirección de propagación de las partículas, es paralela a la dirección de propagación de la onda. Se propagan tanto en sólidos, como en líquidos y gases.</p>	<div style="border: 1px solid green; padding: 5px; display: inline-block;"> $V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ </div> <p>Ecuación 1⁶</p> <p>V_L : velocidad longitudinal</p> <p>E: modulo de elasticidad</p> <p>ρ: densidad</p>
<p>Transversal</p>	<p>Las partículas oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda y se generan cuando se hacen incidir ondas longitudinales, con cierto ángulo respecto de la superficie. Solo puede propagarse en medios sólidos.</p>	<div style="border: 1px solid green; padding: 5px; display: inline-block;"> $V_T = \frac{1}{2} V_L$ </div> <p>Ecuación 2¹⁰</p> <p>V_T : velocidad transversal</p> <p>V_L : velocidad longitudinal</p>
<p>Superficial</p>	<p>Es un tipo especial de onda transversal donde las partículas oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. Se propagan solamente en medio sólido, en la superficie del material siguiendo el contorno del mismo, a un espesor de</p>	<div style="border: 1px solid green; padding: 5px; display: inline-block;"> $V_S = 0.9 V_T$ </div> <p>Ecuación 3¹⁰</p> <p>V_S: velocidad de las ondas superficiales.</p> <p>V_T: velocidad de las</p>

⁶TORRES, B, ELKIN YESID y MOROS, D, ADRIANA CATALINA; TESIS “Aplicación de la Técnica de Ultrasonido para la Estimación de la Pérdida de Espesor en la Superficie Externa de una Pieza Tubular”, Universidad Industrial de Santander, 2009, Bucaramanga.

TIPOS DE ONDA	CARACTERÍSTICAS	ECUACIÓN VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN
	aproximadamente una longitud de onda por debajo de la superficie del material.	ondas transversales.
De lamb	Se consideran como otro tipo especial de ondas transversales. Se producen en láminas muy delgadas, cuyo espesor es igual o inferior a la longitud de onda. Se propagan solamente en medio sólido y dependerá tanto de las propiedades elásticas, estructura del medio, como también de su espesor y frecuencia, modo de vibración y tipo de onda sónica ⁷ .	

Fuente: Autores

En cuanto a la emisión y recepción de las ondas ultrasónicas, se puede recurrir a diversos fenómenos físicos, de los cuales dos son los más utilizados: el efecto piezoeléctrico y el magnetostrictivo⁸. En la Tabla 3 se realiza un paralelo de ellos, donde se visualizan las principales características y diferencias.

⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO, Op. Cit., Cap. II, p 6.

⁸ FORERO GARCIA, EDWIN FRANCISCO. Diseño de un prototipo para la medición de espesores usando ultrasonido. Trabajo de grado Ingeniero Eléctrico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. 2005. P19.

Tabla 3. Características del efecto piezoeléctrico y el efecto magnetostrictivo.

EFEECTO PIEZOELÉCTRICO	EFEECTO MAGNETOSTRICTIVO
<p>Los materiales encargados de transformar la energía eléctrica en mecánica, dando la función de emisor al cristal, y en receptor cuando la transformación es inversa, reciben el nombre de materiales piezoeléctricos, y son los encargados de producir las ondas longitudinales para los ensayos no destructivos.</p> <p>Este fenómeno es reversible debido a que tienen la capacidad de contraerse o expandirse dependiendo del signo de la carga eléctrica aplicada.</p> <p>Los principales cristales piezoeléctricos son: Cuarzo, sulfato de litio y materiales cerámicos polarizados como el titanio de bario, metabianato de plomo y titanatozirconato de plomo⁹.</p>	<p>Para la inspección de materiales como el hormigón, se deben utilizar frecuencias ultrasónicas bajas, para lo cual se emplean materiales como el níquel y sus aleaciones, el acero y las ferritas, que presentan propiedades ferromagnéticas; estos tienen la capacidad de contraerse o expandirse bajo la influencia de un campo magnético.</p> <p>Se presenta de manera recíproca, por lo cual estos materiales están en la disposición de emitir y recibir ondas ultrasónicas.</p>

Fuente: Autores

Actualmente existe una amplia variedad de palpadores y frecuencias. Entre los principales y comúnmente utilizados se tienen los generadores de ondas longitudinales y transversales de un solo cristal y doble cristal¹⁰. Sin embargo, para

⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO, Op. Cit., Cap. III, p 1

¹⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO, Op. Cit., Cap. III, p 5.

la selección adecuada de uno de ellos al momento de realizar una prueba no destructiva específica, se debe tener en cuenta tres características fundamentales: la sensibilidad, la resolución y la eficiencia. (Ver Tabla 4).

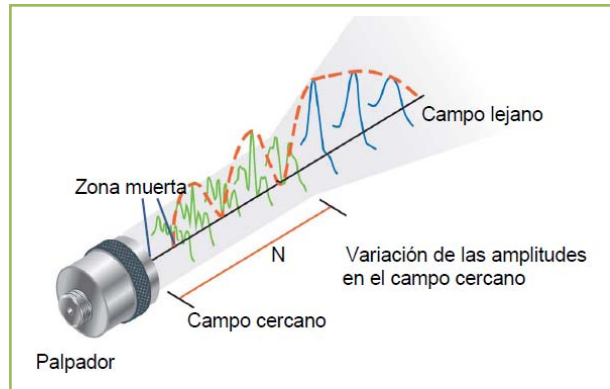
Tabla 4. Características fundamentales de un palpador.

SENSIBILIDAD	Se refiere a la capacidad con la que el transductor puede identificar pequeñas discontinuidades. De esta manera, el grado de sensibilidad aumentará a medida que el orificio detectado a una distancia determinada sea más pequeño.
RESOLUCIÓN	Se define como la capacidad de dar indicaciones separadas de dos discontinuidades muy próximas entre sí, y dependiendo de la distancia desde el transmisor de pulsos se puede clasificar como resolución próxima o resolución lejana.
EFICIENCIA	La eficiencia del palpador de convertir energía eléctrica en mecánica y viceversa es de gran importancia, ya que a mayor eficiencia, mayor será la sensibilidad del palpador y mayores las posibilidades de detectar discontinuidades pequeñas.

Fuente: Autores

Dependiendo de la geometría y frecuencia del cristal empleado en el palpador, se obtendrá un haz ultrasónico específico, que al ser analizado a varias distancias de su punto de origen, se podrá distinguir las tres zonas que lo componen: zona muerta, zona de campo cercano o zona de Fresnell y zona de campo lejano o zona de Fraunhofer, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Geometría típica de un haz ultrasónico.



Fuente: www.olympus.com/panametrics/ultrasonictransducer.pdf

Tabla 5. Zonas que componen el haz ultrasónico.

<p>ZONA MUERTA</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se da debido a la interferencia producida por las vibraciones del cristal. • La presencia en el haz está determinada por el tiempo de oscilación. • Se le da este nombre porque cualquier discontinuidad presente, será totalmente ignorada durante este tiempo, debido a que la presión acústica del haz es nula en toda su profundidad.
<p>ZONA DE CAMPO CERCANO</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es la región del haz próxima al cristal, dentro de la cual ubicamos la zona muerta. • Es donde interactúan las ondas para crear un único frente de onda. • Debido a las grandes variaciones en los valores de la presión acústica, se da interferencias en la lectura de discontinuidades.
<p>ZONA DE CAMPO LEJANO</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es donde comienza a transmitirse el haz bajo un patrón de presión estabilizado. • Se obtiene la máxima reflexión de una discontinuidad

	<p>específica, y a partir del cual el haz ultrasónico diverge y la intensidad del sonido disminuye a medida que el haz se transmite en el material, manteniendo la mayor magnitud alrededor del eje central imaginario.</p>
--	---

Fuente: Autores

Dicho haz ultrasónico, requiere de un medio acoplante para poder viajar de manera perpendicular a la superficie de la pieza a inspeccionar. Dependiendo de este, el ensayo no destructivo por ultrasonido presenta dos técnicas: por contacto directo y por inmersión. De igual manera, presenta tres tipos básicos de procedimientos o sistemas de ensayos: transmisión, pulso-eco y resonancia. Cada una de las técnicas y procedimientos se describen brevemente en la Tabla 6. La elección de uso de estos dependerá de las características geométricas y estructurales de la pieza, su accesibilidad y los defectos más probables a detectar¹¹.

Enfatizando en la técnica de ultrasonido por inmersión, (fundamento del desarrollo del presente trabajo) y como se indica en la Tabla 6, esta emplea un palpador o transductor hermético a prueba de agua, el cual siempre se encuentra separado de la pieza a examinar por un líquido (generalmente agua con anticorrosivo).

El agua tiene como objetivo transmitir la onda ultrasónica al material evitando el desgaste y posterior deterioro del palpador (como en el caso de la técnica de contacto directo), además permite el uso de cristales más finos lográndose una mayor precisión en los resultados de la prueba. La distancia del agua queda representada en la pantalla del equipo como el espacio entre el pulso inicial y la reflexión proveniente de la superficie de entrada. Esta debe ser determinada para cada una de las pruebas, teniendo en cuenta que la velocidad del sonido en el agua es aproximadamente $\frac{1}{4}$ de la velocidad en el aluminio o el acero. Dicho esto

¹¹INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO, Op. Cit., Cap. V, p 1

se puede entender que 1 pulgada de agua aparecerá en la pantalla del equipo, en la misma distancia en tiempo que 4 pulgadas de acero¹². Por lo cual la distancia que debe haber entre el palpador y la pieza será 1 pulgada de agua por cada 4 pulgadas de espesor de la pieza, y se expresa mediante la Ecuación (4).

Tabla 6. Sistemas de ensayo y técnicas de ultrasonido.

SISTEMAS DE ENSAYO DE ULTRASONIDO	
	FUNCIONAMIENTO - CARACTERÍSTICAS
Transmisión	Se emplean dos palpadores, alineados perfectamente uno en cada extremo de la pieza. Uno envía la onda vibratoria ultrasónica (palpador emisor) a través de la pieza y el otro recibe la onda transmitida (palpador receptor). En presencia de un defecto, la intensidad sonora disminuye a causa de la reflexión parcial, o se hace nula en caso de reflexión total. Desde su principio ha presentado limitaciones debido al grado de complejidad que requería acceder a ambas caras de la superficie a inspeccionar y de la dificultad de detectar defectos pequeños ¹³ .
Pulso-eco	El oscilador piezoeléctrico funciona a la vez como emisor y como receptor. Al existir un posible defecto interno pequeño en referencia al haz, parte del haz sonoro emitido se reflejará en este, pero otra parte continuará su camino a través del material.
Resonancia 14	Se basa en que cada espesor tiene una frecuencia fundamental de resonancia que al ser aplicada en forma de haz continuo de sonido, se crean ondas estacionarias dentro de la pieza,

¹²IBID. Cap. V, p 5.

¹³ NDT EN ESPAÑOL [En línea]. 2008.[Consultado 10 de mayo, 2011]. Disponible en internet: [http://www.ndtenespanol.org/UT_2.html]

¹⁴CURSO DE ULTRASONIDO BÁSICO SISTENDCA [en línea].2010. [Consultado Julio, 2011]. Disponible en internet: http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/Curso%20Ultrasonido%20Basico.pdf

SISTEMAS DE ENSAYO DE ULTRASONIDO	
	causando un incremento en la amplitud de la señal de recepción. No resulta adecuado para la detección de discontinuidades, tampoco resulta adecuado para la medida de pérdida de espesores por corrosión o deterioro por agentes ambientales.
TÉCNICAS DE ULTRASONIDO	
Contacto directo	El palpador está en contacto con la pieza a inspeccionar, utilizando una delgada capa de líquido como medio de acoplamiento, que garantiza la buena transmisión de la onda ultrasónica. Algunos palpadores utilizan lentes acústicos focalizadores o cuñas plásticas protectoras.
Inmersión	Esta técnica utiliza un palpador hermético a prueba de agua, separado de la pieza por un líquido (generalmente agua), que tiene como objetivo transmitir las ondas ultrasónicas. En comparación con la técnica por contacto directo, en esta se evita el desgaste y el deterioro del palpador por fricción. Se permite el uso de cristales más finos logrando una mayor precisión.

Fuentes: Autores

$$\mathbf{D} = 6,35 + \frac{V_A}{V_M} \times E \text{ [mm]} \quad \text{ó} \quad \mathbf{D} = \frac{1}{4} + \frac{V_A}{V_M} \times E \text{ [in]} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Fuente: Instituto Colombiano de Petróleo. Curso de Ultrasonido Nivel II. Ecopetrol.

Donde: V_A = Velocidad del sonido en el agua

V_M = Velocidad del sonido en el metal de prueba

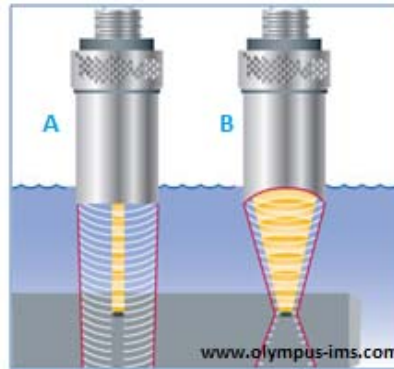
E = Espesor máximo del metal.

Generalmente esta técnica se utiliza en control automático, permitiendo un desplazamiento continuo y mutuo entre el palpador y la pieza a inspeccionar, reduciendo significativamente las variaciones de sensibilidad debido al acoplamiento ideal y el tiempo de barrido.

Los tipos de palpadores empleados pueden ser focalizados o no focalizados (Figura 3), presentes en diferentes configuraciones: plana (no focalizados), focalizados esféricos (puntuales) y focalizados cilíndricos (línea). Siendo adecuados los de tipo focalizado para superficies curvas permitiendo además de incrementar la sensibilidad a los pequeños defectos, mejorar la relación señal-ruido y optimizar la resolución cercana a la superficie.

Además de tener en cuenta la altura del agua y los palpadores específicos, el desarrollo de una inspección con ultrasonido por inmersión, requiere de unas adecuadas instalaciones. Generalmente un sistema de estos se compone del tanque de inmersión, del sistema de posicionamiento, puentes, manipuladores y el medio acoplante. Los tanques de inmersión deben ser lo suficientemente amplios permitiendo que las dimensiones y geometrías irregulares de las piezas a inspeccionar, no impidan ser sumergidas. Así mismo, el sistema de posicionamiento dependerá de los movimientos máximos y mínimos que requiera la evaluación, la geometría de barrido y la resolución requerida, cuyo desplazamiento a lo largo del tanque se realizará sobre los puentes o también llamados rieles.

Figura 3. Palpadores de inmersión. A) Palpador no focalizado. B) Palpador focalizado.



Fuente: www.olympus-ims.com

Llevar a cabo una inspección de estas, permite reducir costos y tiempos de operación, obtener una alta confiabilidad de medición, siendo posible detectar fallas internas hasta 0,2mm de diámetro y consecuentemente mejorar la calidad del producto¹⁵. Además se ha calificado como un excelente medio de inspección de soldaduras principalmente en piezas con geometría compleja y/o con acabados superficiales rugosos.

Sin embargo, la técnica presenta algunas desventajas relevantes a tener en cuenta al momento de ser empleada. Un claro ejemplo es la dispersión del haz ultrasónico debido a la contaminación del agua por burbujas de aire o agentes externos, provocando que las señales emitidas y recibidas por el equipo sean atenuadas en su trayecto detectando fallas no confiables, por ello es importante que el acoplante presente la menor contaminación posible.

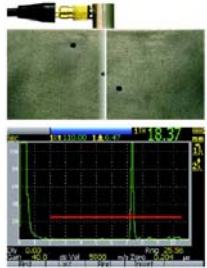
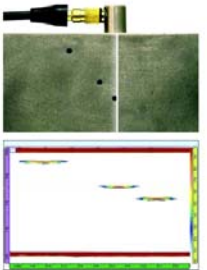
De igual manera, se debe tener en cuenta que las piezas inspeccionadas son metálicas y la inmersión de ellas en agua, podría afectar las características superficiales del material por lo cual debe estar desaireado y contener un aditivo

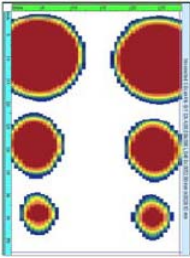
¹⁵BARRERA M., MARÍN M J. y otros, "Inspección Ultrasónica por Inmersión de Placas Combustibles para Reactores Nucleares de Investigación", IV Conferencia Panamericana de END, Octubre 2007, Buenos Aires.

que libere las tensiones superficiales y facilite el humedecimiento completo de la superficie de inspección garantizando así un acople uniforme, además de un agente anticorrosivo que garantice el buen estado de la pieza examinada.

La pantalla de tubos de rayos catódicos (TRC) reconoce tres sistemas básicos de representación para ensayos ultrasónicos: SCAN A, SCAN B y SCAN C, empleándose en el desarrollo del presente proyecto de grado el sistema SCAN A. En la Tabla 7, se indican las principales características y utilidades de cada uno de ellos.

Tabla 7. Sistemas de representación de pantallas TRC para ensayos ultrasónicos.

 <p>SCAN A</p>	<p>En la pantalla se representa el tiempo en la escala horizontal y la amplitud en la escala vertical. Permite la evaluación de las discontinuidades internas en cuanto a su tipo, tamaño y localización (profundidad).</p> <p>Características: Se discrimina de izquierda a derecha y el método de registro más sencillo es el de fotografía directa del oscilograma.</p>
 <p>SCAN B</p>	<p>Se usa una pantalla de osciloscopio típico que muestra una vista de una sección transversal del material a ser ensayado. Se utiliza principalmente para determinar el tamaño (longitud en una dirección), localización (posición y profundidad) y hasta cierto punto, la forma y orientación de discontinuidades internas grandes.</p> <p>Características: La imagen es retenida sobre el TRC el tiempo necesario para evaluar la pieza y para fotografiar la</p>

	<p>pantalla, con el objeto de obtener un registro permanente y se reserva especialmente para los ensayos automáticos por inmersión.</p>
 <p>SCAN C</p>	<p>Representa una vista en la planta, similar a una placa radiográfica. Se utiliza para obtener un mapa con las posiciones de las discontinuidades en el plano horizontal o vista de planta de una pieza, dando la longitud y ancho pero no la profundidad.</p> <p>Características:</p> <p>Los sistemas de alta velocidad de barrido generalmente usan este tipo de representación. Se caracteriza por su velocidad y capacidad de producir registros permanentes.</p> <p>Como el SCAN B, se reservan para los ensayos automáticos por inmersión.</p>

Fuente imágenes: www.olympus-ims.com/es/pdf-library/157-catId.268435489.html. [*Phased Array*

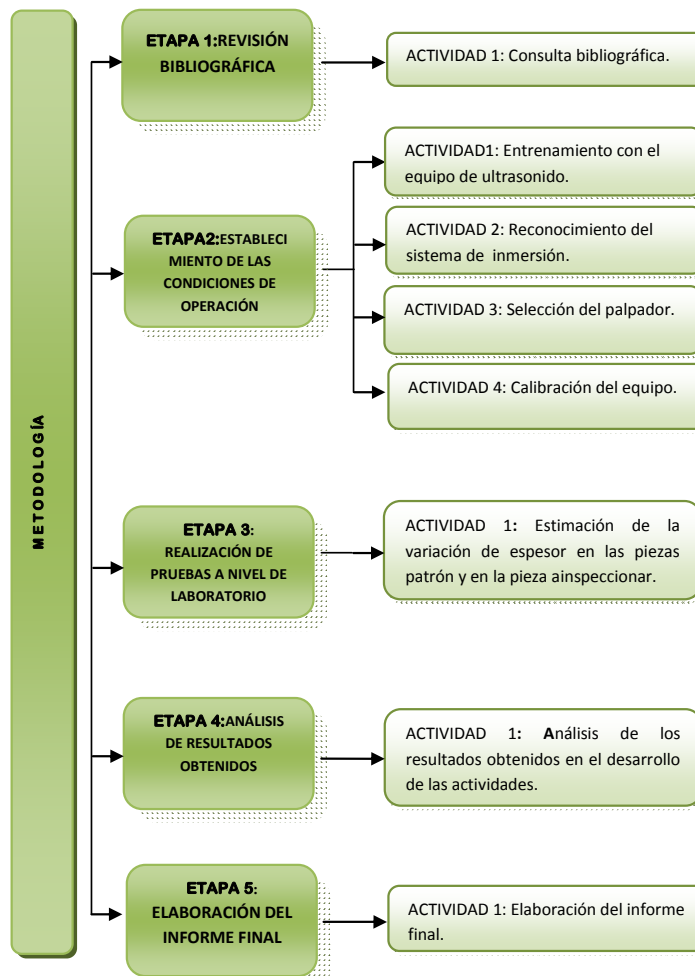
Testing Basic Theory for Industrial Applications]

Fuente tabla: Autores

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el siguiente diagrama se observa las diferentes etapas con las respectivas actividades llevadas a cabo para el desarrollo del presente proyecto de grado.

Diagrama de la metodología experimental indicando etapas y actividades desarrolladas.



A continuación se presentan detalles de las actividades desarrolladas en cada una de las etapas mencionadas.

3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En primera instancia se realizó la búsqueda y recopilación de información en libros, bases de datos, revistas, artículos, trabajos de grado, normas y códigos, referentes a la técnica de ultrasonido, sus principios básicos, tipos de ondas empleados, técnicas de ensayo existente con especial énfasis en el procedimiento, condiciones y tipo de palpadores empleados en el método por inmersión.

Durante el desarrollo de las pruebas de laboratorio se hizo necesaria la búsqueda de nuevos artículos científicos, revistas, libros, manuales de los equipos y accesorios utilizados, con el fin de verificar que los resultados obtenidos se encontraban dentro de lo esperado teóricamente. Esto fue posible gracias a las bases de datos ofrecidas por la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.

3.2 ETAPA 2: ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Esta etapa comprende las actividades que se hicieron necesarias para que el equipo y el diseño del sistema de inmersión a emplear, cumpliera con las condiciones óptimas para la inspección de las piezas seleccionadas para el desarrollo del presente proyecto.

3.2.1 Actividad 1: Entrenamiento con el equipo de ultrasonido.

El equipo utilizado para el desarrollo de las pruebas fue el KRAUTKRAMER USM35XS marca GENERAL ELECTRIC de fabricación alemana, el cual se aprecia en la Figura 4, disponible en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Para el aprendizaje del manejo de este equipo se procedió a la identificación de los diferentes menús y submenús con los cuales cuenta, con lo que se dio inicio a la calibración por la técnica de contacto utilizando una escalerilla patrón de marca KRAUTKRAMER (ASTM E 797-05). Esta parte del proceso tuvo una duración de dos semanas.

Posteriormente y teniendo en cuenta los conocimientos adquiridos con la técnica de contacto, se procedió a realizar el montaje de inmersión y su respectiva calibración, adecuación que se hizo complicada debido a la alta sensibilidad que esta presenta. Es por esto que el aprendizaje para la calibración del equipo por la técnica de inmersión tomo dos meses.

Figura 4. Equipo de ultrasonido KRAUTKRAMER USM 35XS.



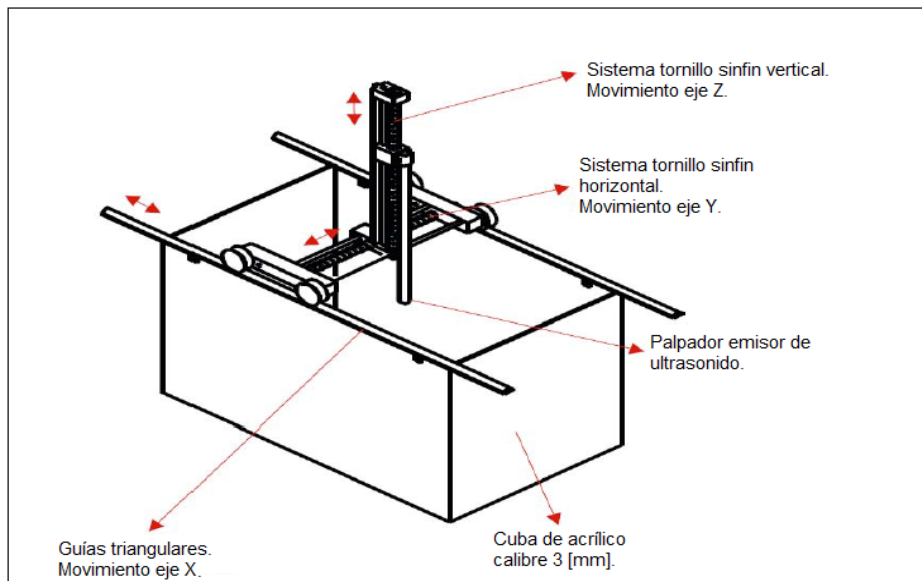
Fuente: Autores

3.2.2 Actividad 2: Reconocimiento del sistema de inmersión

Adquiridos ya algunos conocimientos sobre el funcionamiento del equipo empleando palpadores de contacto, se procedió a revisar las condiciones físicas que presentaba el sistema disponible en el laboratorio de ensayos no destructivos para el desarrollo de pruebas con la técnica de ultrasonido por inmersión.

El sistema de inmersión cuenta con una cuba rectangular de 50 [cm] de ancho, 30 [cm] de alto, y 31[cm] de profundidad, hecha en acrílico transparente que permite con facilidad la visualización de la pieza en inspección. De igual manera consta de un sistema de desplazamiento del palpador en los tres diferentes ejes (X, Y, Z) como se puede apreciar en la Figura 5.

Figura 5. Representación gráfica del sistema de inmersión.



Fuente: TORRES, B, ELKIN YESID y MOROS, D, ADRIANA CATALINA; TESIS “Aplicación de la Técnica de Ultrasonido para la Estimación de la Pérdida de Espesor en la Superficie Externa de una Pieza Tubular”, Universidad Industrial de Santander, 2009, Bucaramanga.

En la parte superior, sobre los lados mayores de la cuba, se encuentran instalados dos rieles que permiten el desplazamiento manual de cuatro ruedas de acero

(carro mecánico), que controlan la movilidad del palpador en la coordenada X, magnitud representada en una regla metálica que se encuentra próxima a una de las guías triangulares.

También consta de un brazo mecánico acoplado sobre el carro, que permite el desplazamiento manual en los ejes Y y Z, mediante la manipulación de dos perillas diferentes. Estas se encuentran calibradas de tal manera que un giro completo desplazará el sistema un milímetro sobre la cinta.

Adherido al lado izquierdo del brazo mecánico, se encuentra el tubo porta palpador. Este debe estar ubicado perpendicularmente al fondo de la cuba, asegurando de esta manera tanto la movilidad del palpador en los tres diferentes ejes como la penetración adecuada del haz ultrasónico en la pieza a inspeccionar. Los transductores son asegurados al extremo inferior de dicho tubo mediante el uso de una rosca universal de conexión BNC.

3.2.3 Actividad 3: Selección del palpador.

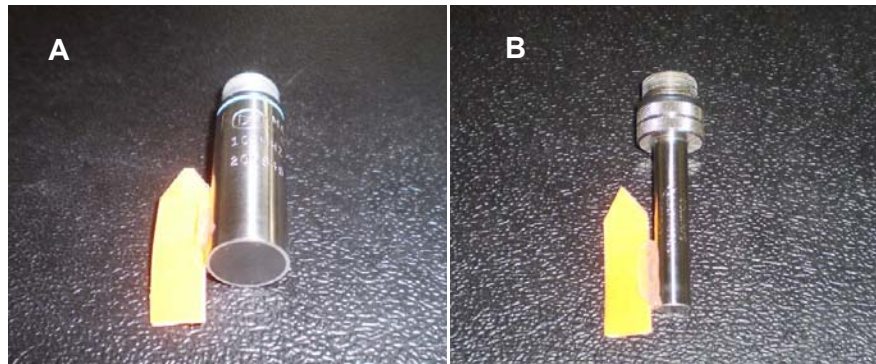
El laboratorio de ensayos no destructivos cuenta con cuatro palpadores de inmersión no focalizados (uno de 5, dos de 10 y uno de 15 MHz). Los cuales en el desarrollo de las pruebas de la tesis "*Aplicación de la Técnica de Ultrasonido para la Estimación de la Pérdida de Espesor en la Superficie Externa de una Pieza Tubular*", fueron caracterizados teniendo en cuenta la frecuencia, el diámetro y el campo cercano tanto en el agua como en el acero.

De esta manera se determinó que el palpador no focalizado de 10 [MHz], en comparación con los demás, presentaba una mayor sensibilidad y precisión para identificar discontinuidades cercanas a la superficie, condiciones que se requerían para realizar la inspección de las diferentes piezas a estudiar. En cuanto al

palpador focalizado, el laboratorio solo cuenta con uno de 20 [MHz] de frecuencia, por lo cual no se debió realizar ningún tipo de caracterización y selección.

En la Figura 6, se observa los dos palpadores empleados para el desarrollo de las pruebas, con un indicador de acetato que permitió identificar la ubicación exacta del haz central del transductor.

**Figura 6. Palpadores de inmersión. A) Palpador no focalizado de 10 [MHz].
B) Palpador focalizado de 20 [MHz]**



Fuente: Autores

3.2.4 Actividad 4: Calibración del equipo.

La calibración del equipo de ultrasonido, se llevó a cabo siguiendo las especificaciones técnicas (para la técnica de inmersión), suministradas por el manual del mismo.

Cada pieza fue calibrada con los dos palpadores (focalizado y no focalizado) previamente seleccionados, teniendo en cuenta las diferencias en las velocidades de propagación del sonido en el acero y en el agua (medio acoplante para la técnica de inmersión).

3.3 ETAPA 3: REALIZACIÓN DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO

En esta etapa se llevaron a cabo las pruebas de laboratorio empleando los patrones y las piezas a inspeccionar.

3.3.1 Actividad 1: Estimación de la variación de espesor en las piezas patrón y en la pieza a inspeccionar.

La estimación de las pérdidas de espesor mediante la técnica de ultrasonido, se efectuó inicialmente en piezas patrón planas y tubulares, con el fin de verificar el adecuado manejo del equipo y la toma apropiada de los datos. Posteriormente, se realizó la inspección a una sección de tubería soldada de dimensiones y condiciones de fabricación y uso desconocidas. A continuación se presentan detalles de cada una de las piezas estudiadas.

- **Escalerilla KRAUTKRAMER**

El laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con dos tipos de escalerillas de acero calibradas según la norma ASTM E-797, cada una de ellas con cuatro pasos descendentes: la primera con dimensiones en pulgadas que van desde 0.5 hasta 0.1 [in] y la segunda con dimensiones en milímetros que van desde 10 hasta 2 [mm]. Para el proyecto, se seleccionó la escalerilla calibrada en milímetros. (Ver Figura 7).

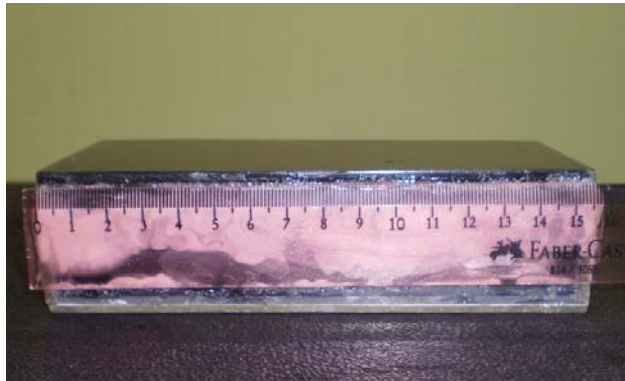
Figura 7. Escalerilla patrón marca KRAUTKRAMER



Fuente: Autores

Para esta primera actividad, se necesitó la fabricación de una base que sostuviera a la escalerilla dentro del agua, con el fin de darle más altura, ya que la pared de agua podría superar la longitud del palpador sumergido y tener filtraciones; se hizo necesario llenar la base con una mezcla de mortero para darle suficiente peso, de lo contrario flotaría alterando la altura de agua y como consecuencia la medición del espesor. La base empleada finalmente en esta inspección se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Base fabricada para sostener la escalerilla patrón.



Fuente: Autores

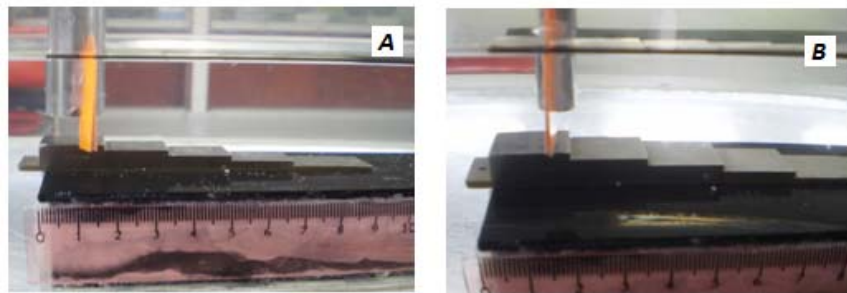
De igual forma fue necesario adaptarle un sistema de aletas a los palpadores, con el fin de indicar la salida del haz central, lo que facilitó el movimiento del sistema de desplazamiento, ya que este se trasladaba milímetro a milímetro en cada toma. La altura calculada para la medición de los espesores en la escalerilla fue de 8,883 [mm] (Calculo registrado en el Anexo A), calculada con el máximo espesor de la pieza a inspeccionar; esta representa la mínima altura que se debe tener entre el palpador y la pieza para no presentar interferencias. Para efectos de la prueba, se decidió tomar 10 [mm] de altura.

Posteriormente se procedió a la calibración del equipo con cada palpador y al registro de los datos obtenidos en cada una de las tomas realizadas (para cada

transductor se realizaron cuatro tomas diferentes). En la Figura9, se muestra el montaje realizado para cada uno de los casos.

Adicionalmente se realizó una toma de espesores por contacto con el equipo de ultrasonido KRAUTKRAMER DM-4 con el fin de confirmar los espesores suministrados por la ficha técnica de la escalerilla debido a que podía presentar un deterioro superficial por su tiempo en servicio. De esta manera se logró establecer un valor teórico confiable para llevar a cabo los análisis pertinentes.

Figura 9. Sistema de inmersión para la escalerilla patrón empleando: A) palpador no focalizado y B) palpador focalizado.



Fuente: Autores

- Tubo patrón¹⁶

La pieza patrón tubular empleada para la verificación de los cambios de espesor mediante la técnica de ultrasonido por inmersión, fue un tramo de tubería de acero ASTM A53, grado A, tipo S, empleada en la industria para el transporte de fluidos y gas¹⁷, como se muestra en la Figura 10.

Este tramo de tubería tiene una longitud de 22.5 [cm], un diámetro exterior de 6,4 [cm] y una variación de espesores tanto internos como externos representados en

¹⁶OLARTE SANCHEZ LEIDY CRISTINA-VANEGAS MORENO ARMANDO. Digitalización de Imágenes Radiográficas para la Identificación y Caracterización de Discontinuidades Superficiales Presentes en Tuberías de Acero. Bucaramanga, 2009, 150p. Trabajo de Grado (Ingenieros Metalúrgicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

¹⁷TORRES, B, ELKIN YESID y MOROS, D, ADRIANA CATALINA, Op. Cit., p 33

cuatro escalones de aproximadamente 1,5 [cm] de ancho. Estos se realizaron con el fin de representar de manera aproximada la pérdida de material por ataque corrosivo.

Figura 10. Tubo patrón. A) Cambios de espesor externos. B) Cambios de espesor en la pared interna.



Fuente: Autores

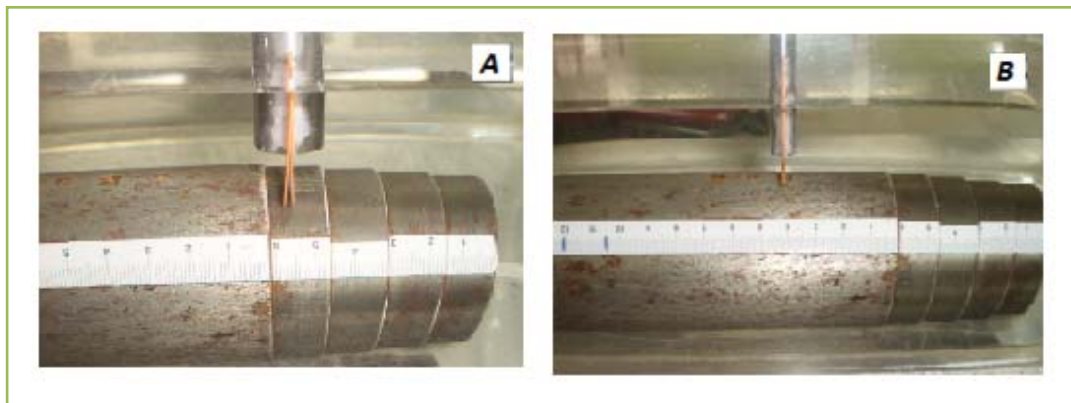
De igual manera, la tubería presenta cuatro agujeros con diferentes profundidades y diámetros, representando otro tipo de discontinuidad superficial a la cual están expuestos durante la puesta en servicio.

Las pruebas con dicho tubo, se iniciaron con la aplicación de una capa uniforme de laca transparente (anticorrosivo), con el fin de impedir pérdidas de material por corrosión debido al contacto con el agua.

Debido a la geometría de la pieza, fue necesario ubicarla contra la pared frontal de la cuba, con el fin de buscar una estabilidad y asegurar que la trayectoria de inspección fuera siempre la misma, en consecuencia, el sistema de desplazamiento en el eje Y debió movilizarse hacia el frente de la misma. De igual

forma se colocaron dos artefactos al otro lado del tubo con lo que se logró la inmovilidad completa dentro del agua, como se puede apreciar en la Figura 11.

Figura 11. Sistema de inmersión para el tubo patrón empleando: A) palpador no focalizado y B) palpador focalizado.



Fuente: Autores

Posteriormente se determinó la mínima altura de agua a trabajar dando como resultado 7,890 [mm] (Calculo registrado en el Anexo A), valor que se aproximó a 10 [mm] para mayor precisión y facilidad al momento de realizarse la calibración. Seguidamente se dio inicio a la toma de datos milímetro a milímetro, identificando el comportamiento de los ecos al registrar cambios de espesor que se encuentran en la pared interior y exterior del tubo, al igual que la profundidad y diámetro de las discontinuidades existentes. En total se realizaron cuatro tomas, dos para el palpador no focalizado y dos para el focalizado.

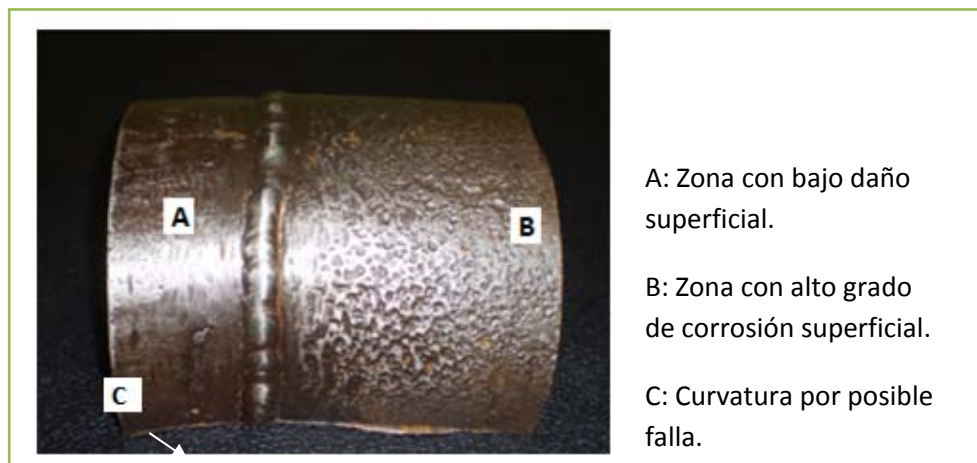
Adicionalmente a las pruebas por inmersión, se realizó una toma por contacto, empleando el equipo KRAUTKRAMER DM-4 y un palpador dual para la medición de espesores y corrosión (FH2E), con una frecuencia de 8 [MHz] y un diámetro de 6,3 [mm]. Esta inspección se realizó con el fin de comprobar y restablecer los valores patrones dados por el diseño (ver anexo B) debido a una posible pérdida de material ocasionada por un ataque corrosivo.

- Sección de tubo soldado.

Se seleccionó una pieza tubular soldada con falta de homogeneidad superficial debido a la pérdida de espesor por corrosión, como se puede observar en la Figura 12. Esta sección tiene un espesor de 6,286 [mm] (dato registrado por el microscopio HIROX HK-7700) y una longitud de 110[mm] los cuales fueron inspeccionados milímetro a milímetro.

Para realizar las pruebas, fue necesario inicialmente retirar los residuos de pintura presentes en su superficie, lijar algunas zonas con presencia de corrosión y aplicar una capa uniforme de laca transparente para evitar su recurrencia, con el fin de tener una superficie limpia para la inspección.

Figura 12. Sección de tubo soldado



Fuente: Autores

La toma de datos se realizó únicamente con el palpador focalizado (Ver Figura 13), ya que el palpador no focalizado debido a que el haz ultrasónico presentó gran dispersión impidió efectuar algún tipo de registro. En el capítulo siguiente se explica con detalles este acontecimiento.

Figura 13. Sistema de inmersión para la sección de tubo soldado empleando palpador focalizado.



Fuente: Autores

3.4 ETAPA 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

En esta etapa se analizaron los resultados obtenidos durante el desarrollo de las actividades. Con esto, se pudo establecer una comparación relacionada con el grado de sensibilidad que posee cada uno de los tipos de palpadores empleados en la técnica de inmersión. De forma paralela se trabajó en el análisis superficial de las piezas en inspección con la ayuda del microscopio marca HIROX HK-7700, con el cual se logró corroborar los datos obtenidos en el ensayo no destructivo de ultrasonido.

3.5 ETAPA 5: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Se realizó el análisis de resultados obtenidos y se elaboró el informe final.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del presente proyecto de grado con su respectivo análisis.

4.1 REALIZACIÓN DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO

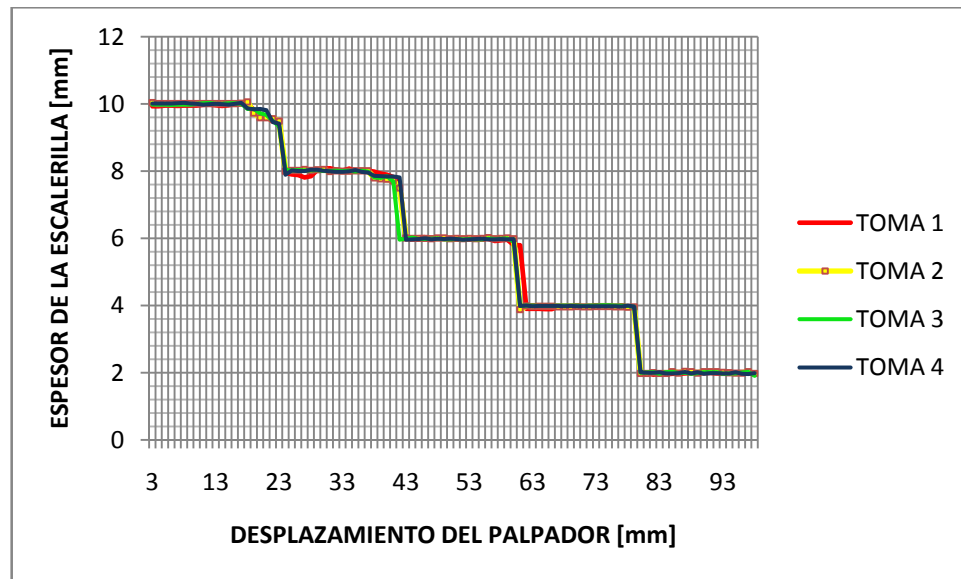
En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de la estimación de los diferentes espesores en la escalerilla, la pieza tubular y la sección de tubo soldado, medidas registradas teniendo en cuenta a velocidad del sonido en el agua, el desplazamiento en el eje X y la variación de la distancia entre el palpador y la pieza o también llamada columna de agua.

Para la realización de los respectivos análisis a cada una de las piezas examinadas, se procedió inicialmente al cálculo de la desviación estándar teniendo en cuenta los valores teóricos estipulados en cada una de ellas, con el fin de estimar un rango de espesores y establecer la precisión de cada uno de los registros arrojados por los palpadores y la técnica en estudio. Los datos obtenidos se presentan en los anexos C y D.

ESCALERILLA MILIMETRADA KRAUTKRAMER

Las pruebas de laboratorio iniciaron con el palpador no focalizado, realizándose cuatro tomas de datos, las cuales se trazaron milímetro a milímetro permitiendo así la construcción del contorno de la escalerilla y la estimación de espesores de hasta 2 [mm], como se puede apreciar en la Figura 14.

Figura 14. Comparación gráfica de la toma realizada empleando palpador no focalizado.



Fuente: Autores

En la anterior figura, se observa el contorno de la escalerilla trazado por cada una de las tomas realizadas, apreciándose un comportamiento similar.

Con el fin de escoger la toma más representativa, se determinó la desviación estándar de cada uno de los registros, seleccionándose un rango de espesores (Ver Tabla 8), que nos permitiera descartar tres de las gráficas anteriormente mostradas. Los cálculos obtenidos se pueden apreciar en el Anexo C.

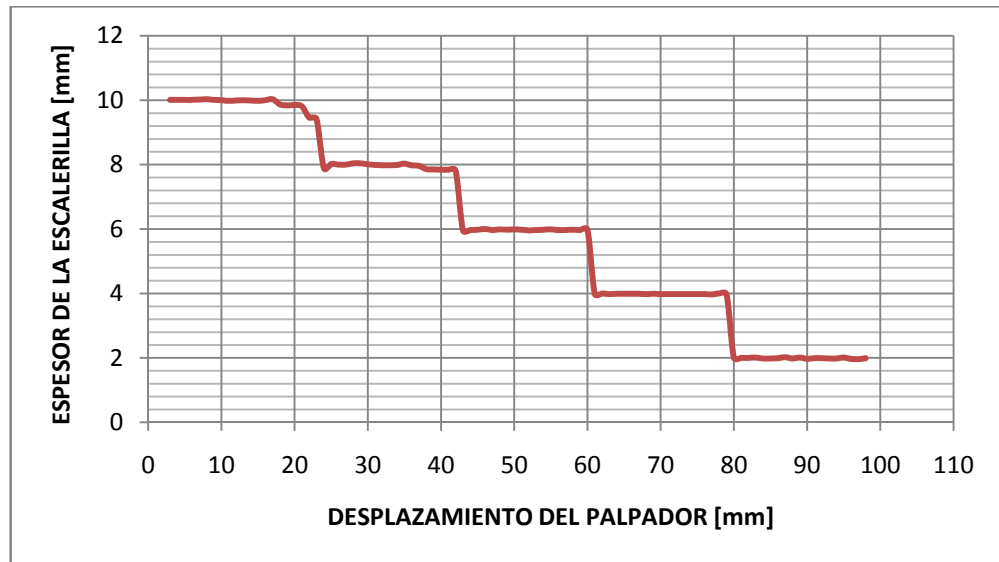
Tabla 8. Rango de espesores establecidos en cada uno de los palpadores.

ESPESOR [mm]	RANGO [mm]	
	FOCALIZADO	NO FOCALIZADO
10	9,99 -10,0	9,8- 10,2
8	7,93- 8,07	7,91 – 8,09
6	5,90 – 6,10	5,97 – 6,03
4	3,93 – 4,08	3,98 – 4,02
2	1,92 – 2,08	1,98 – 2,02

Fuente: Autores.

En la Figura 15, se muestra el contorno representando por la toma que mostró el menor número de datos por fuera del rango estimado y sobre el cual se realizará los posteriores análisis.

Figura 15. Contorno de la escalerilla, empleando palpador no focalizado.



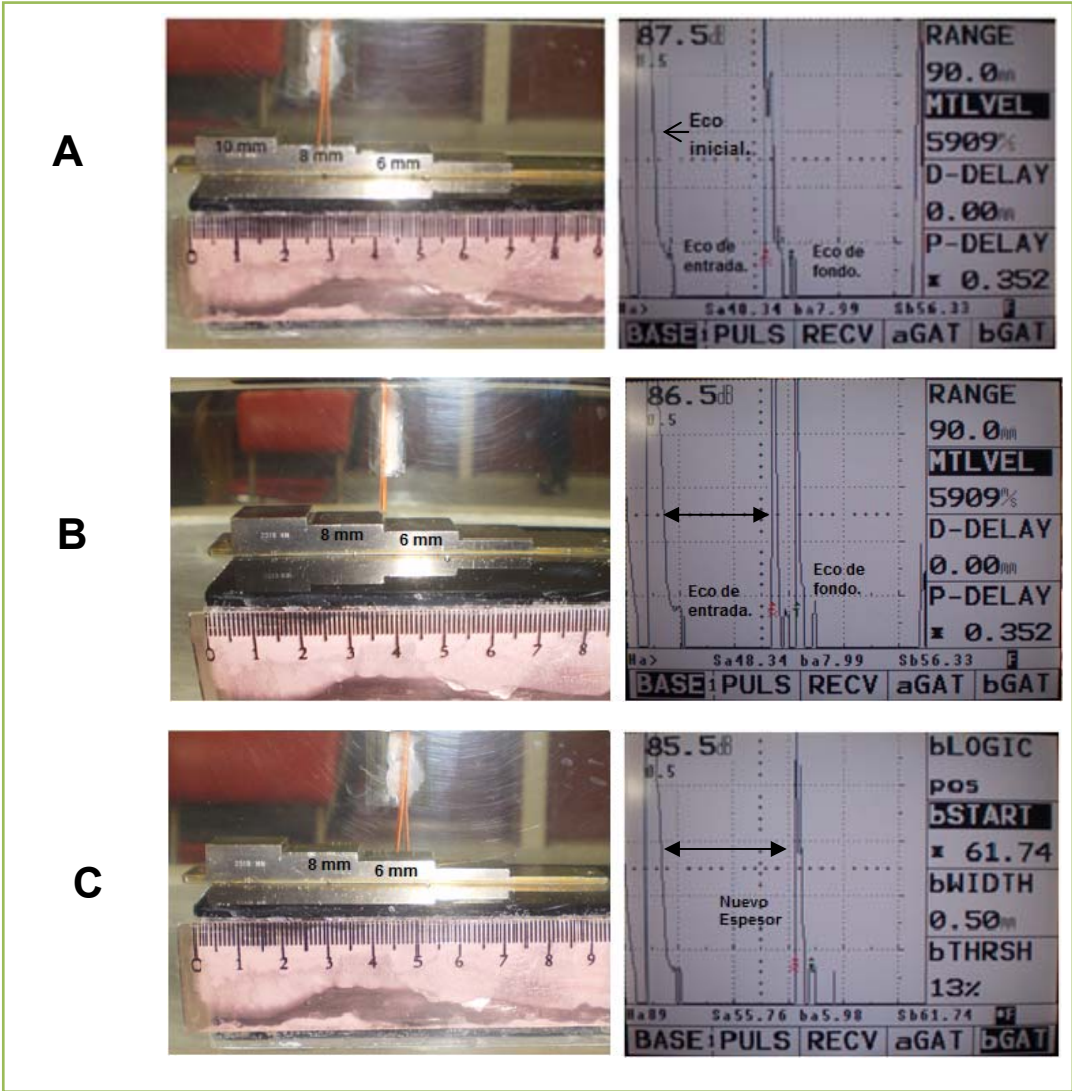
Fuente: Autores

A pesar de poderse construir un contorno de la escalerilla con los registros obtenidos empleando el palpador no focalizado, se observaron ciertas variaciones en cuanto a los datos reales de la pieza, producto de la dispersión del haz

ultrasónico y el diámetro del palpador, que dificultaron la lectura de los datos en la pantalla del equipo de ultrasonido, dando como resultado porcentajes de error comprendidos entre el 0% y el 2,375%. En la Figura 16, se muestra el comportamiento de los ecos al realizar el cambio de espesor de 8 a 6 [mm].

La Figura 16 representa el comportamiento del palpador no focalizado al detectar un cambio de espesor de hasta 2 [mm]. Es así como en la parte A se puede diferenciar el eco de entrada a la pieza y el eco de fondo de la misma, los cuales determinan el espesor a medir. En la parte B, (donde tenemos el palpador en el borde del escalón), se aprecia cómo debido al diámetro del palpador, el eco de fondo no se resuelve con claridad, ya que se está presentando reflexión del haz en los dos espesores. Finalmente en la parte C, se da el cambio de espesor de 8 [mm] a 6 [mm], y se observa que al ubicar el palpador en un espesor de menor valor, el eco de entrada a la pieza experimenta un desplazamiento hacia adelante en la pantalla del equipo, lo cual se debe a que la pared de agua entre el palpador y la superficie de la pieza se hace mayor, este acontecimiento se ve reflejado en el cambio de la distancia mostrada entre el eco inicial y el nuevo eco de fondo.

Figura 16. Comportamiento del eco de entrada en el cambio de espesor de la escalerilla calibrada (Paso de 8 a 6 [mm]).

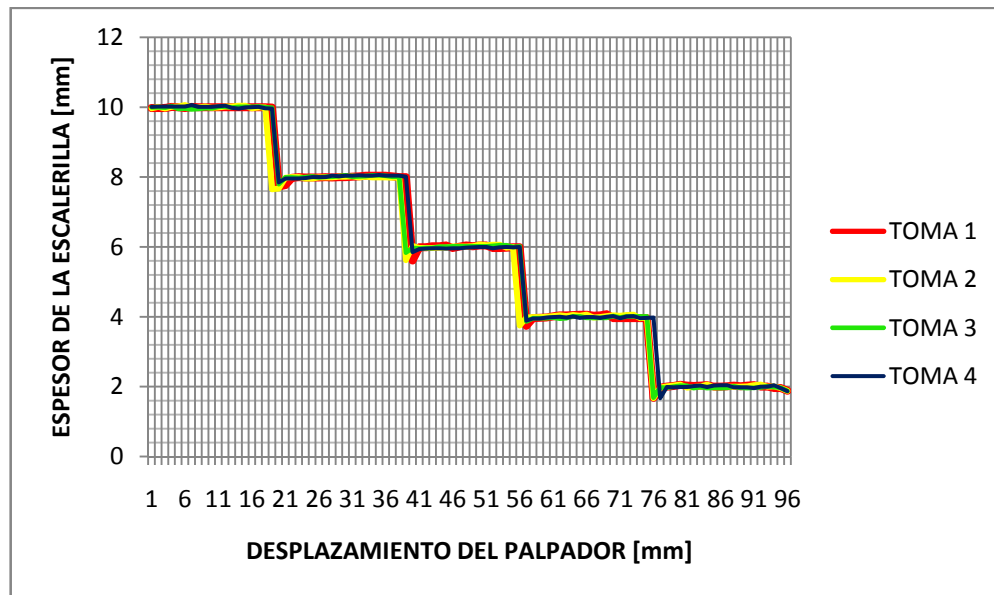


Fuente: Autores

Para las pruebas efectuadas con el palpador focalizado se realizaron cuatro tomas pertinentes, las cuales fueron tabuladas y graficadas para realizar una comparación entre ellas como se muestra en la Figura 17. En esta se puede apreciar la alta precisión de sus datos, ya que se ofrecen unos trazados del contorno de la escalerilla cercanos. De esta forma, se procedió a seleccionar el

registro más preciso entre estos, basados en los datos de rangos que se expone en la Tabla 8, dejando como único registro el mostrado en la Figura 17.

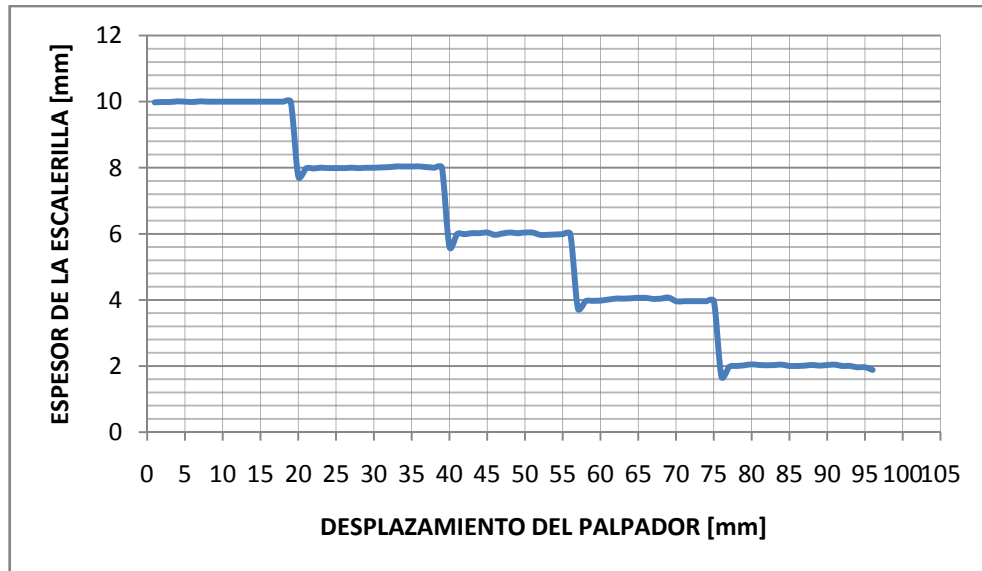
Figura 17. Comparación gráfica de la toma realizada empleando el palpador focalizado.



Fuente: Autores

En esta se puede observar un alto grado de precisión, ya que se encontró que la mayoría de los datos se encontraban dentro del rango establecido (Ver Tabla 8). De igual manera que con el palpador no focalizado, se seleccionó la toma de datos con menor dispersión (Ver Anexo C), la cual se expone en la Figura 18.

Figura 18. Contorno de la escalerilla, empleando el palpador focalizado.

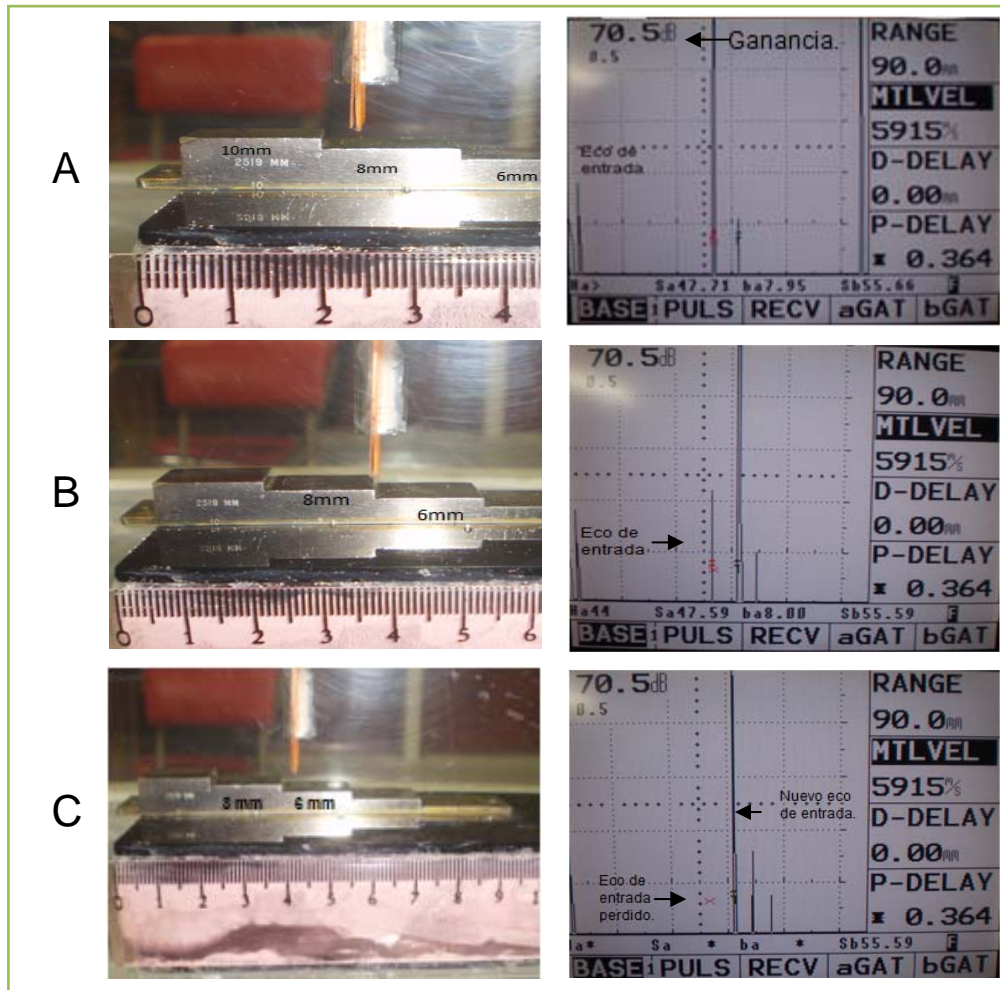


Fuente: Autores

Con este palpador se pudo construir el contorno de la escalerilla milímetro a milímetro, obteniendo una mejor representación de la pieza, ya que este palpador tiene la capacidad de resolver punto a punto cada dato medido, como se muestra en la Figura 19.

En el desarrollo de las pruebas con el palpador focalizado, se observa un comportamiento de los ecos durante el cambio de espesor, similar al del palpador no focalizado, sin embargo, ellos tienen una mayor resolución gracias a la forma como es emitido el haz ultrasónico hacia la pieza, facilitando la lectura de los espesores y presentando una ventaja mayor al utilizarse en una inspección. En la Figura 19, se visualiza lo anteriormente mencionado al realizarse un cambio de espesor de 8 a 6 [mm].

Figura 19: Comportamiento del eco de entrada en el cambio de espesor de la escalerilla calibrada. (Paso de 8 a 6 [mm]).



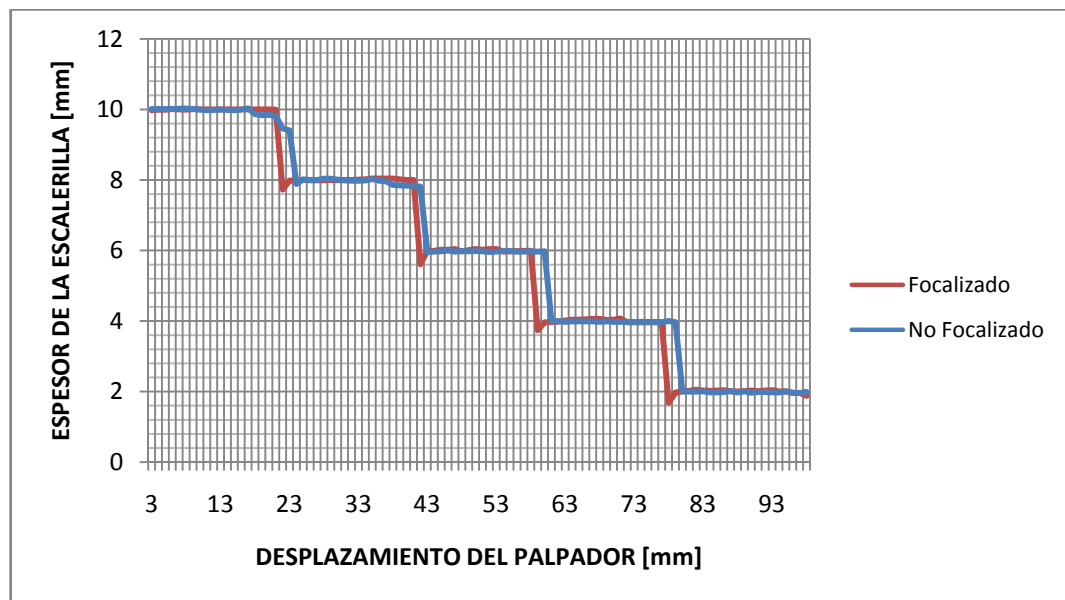
Fuente: Autores

La representación en la Figura 19, expone el desempeño del palpador focalizado frente a cambios de espesor de hasta 2 [mm]. En la parte A se observa el espesor medido en el escalón de 8 [mm], con una alta resolución del eco en comparación con la encontrada en la Figura 18 en el caso del palpador no focalizado. Una disminución en la intensidad de nuestro eco de entrada se refleja en la parte B, debido a que el palpador está reportando un nuevo espesor, de forma paralela, se muestra la aparición de un nuevo eco de entrada a la pieza generado por la detección de un espesor menor. Es así como en la parte C, tenemos el reporte del

nuevo espesor, el cual se muestra sin ninguna dispersión lo que permite afirmar que el palpador focalizado maneja una alta resolución de los ecos facilitando la lectura de espesores, sin importar que sean de menor dimensión.

En la Figura 20, se establece una comparación entre la toma de datos del palpador focalizado y no focalizado que fueron seleccionadas con anterioridad. Con el fin de establecer una referencia para los registros obtenidos por cada uno de los palpadores, se llevó a cabo un análisis micrográfico con el equipo HIROX HK 7700, perteneciente al Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Figura 20. Comparación entre las tomas representativas seleccionadas del palpador no focalizado y el palpador focalizado.

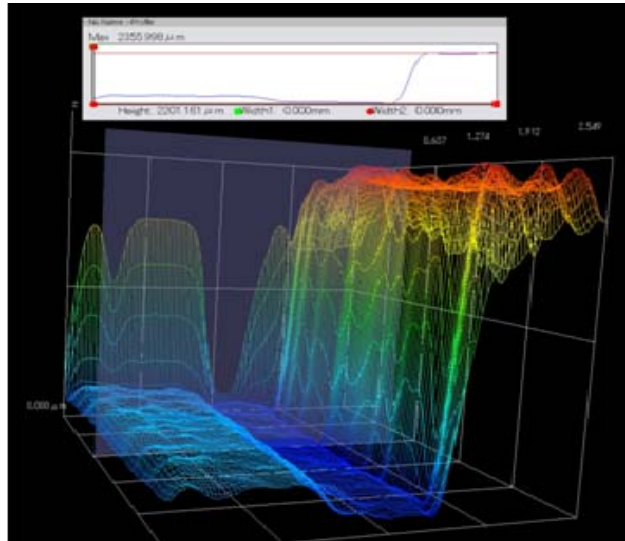


Fuente: Autores

En general se puede observar que los datos obtenidos con el palpador focalizado presentaron una precisión mayor con respecto al no focalizado debido a que se tiene un error de menor magnitud establecido por un máximo de 1,75%. A pesar de ser un elemento estandarizado en medidas se logró captar variaciones sobre

su superficie, las cuales se aprecian con el palpador focalizado y el microscopio HIROX HK7700. En la Figura 21 se muestra el deterioro superficial encontrado en la escalerilla por el equipo HIROX HK7700.

Figura 21. Registro del escalón de 10 [mm] con el microscopio HIROX HK 7700.

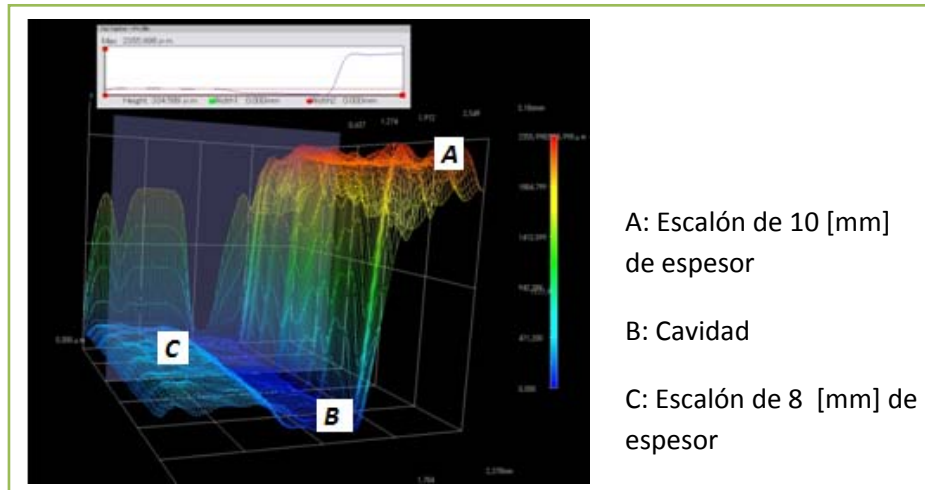


Fuente: Autores

De forma general los datos obtenidos por el palpador no focalizado se encontraron más alejados del valor teórico del espesor, (Ver Tabla 8 y Anexo C), en contraste con los valores obtenidos por el palpador focalizado, los cuales trazaron una mejor representación del contorno de la pieza.

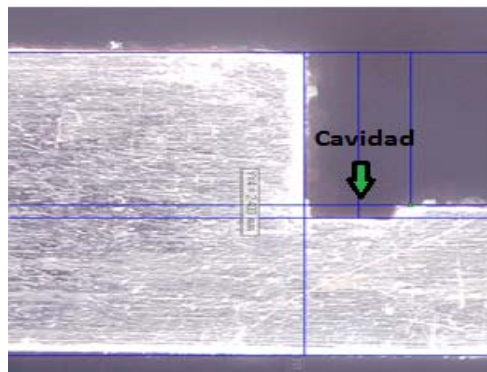
En la representación del palpador focalizado, se apreció un cambio de espesor ubicada al inicio de cada escalón, discontinuidad que no fue registrada por el palpador no focalizado, por razón esta se recurrió a la toma de imágenes micrográficas, en las que se verificó su presencia en la pieza (Ver Figura 22 y 23). De esta manera se demuestra la alta sensibilidad y resolución que presentó este palpador para detectar discontinuidades de tamaño minúsculo, que para este caso fue de 0,27 [mm].

Figura 22. Micrografía de uno de los escalones de la escalerilla milimetrada.



Fuente: Autores

Figura 23. Micrografía frontal de la escalerilla milimetrada



Fuente: Autores

Cabe aclarar que los registros realizados con ambos palpadores logró resolver los espesores hasta 2 [mm] para cada paso descendente, con una alta resolución del contorno construido especialmente en el caso del palpador focalizado, ya que este detecta con alta sensibilidad y precisión discontinuidades de menor tamaño.

TRAMO DE TUBERÍA A53

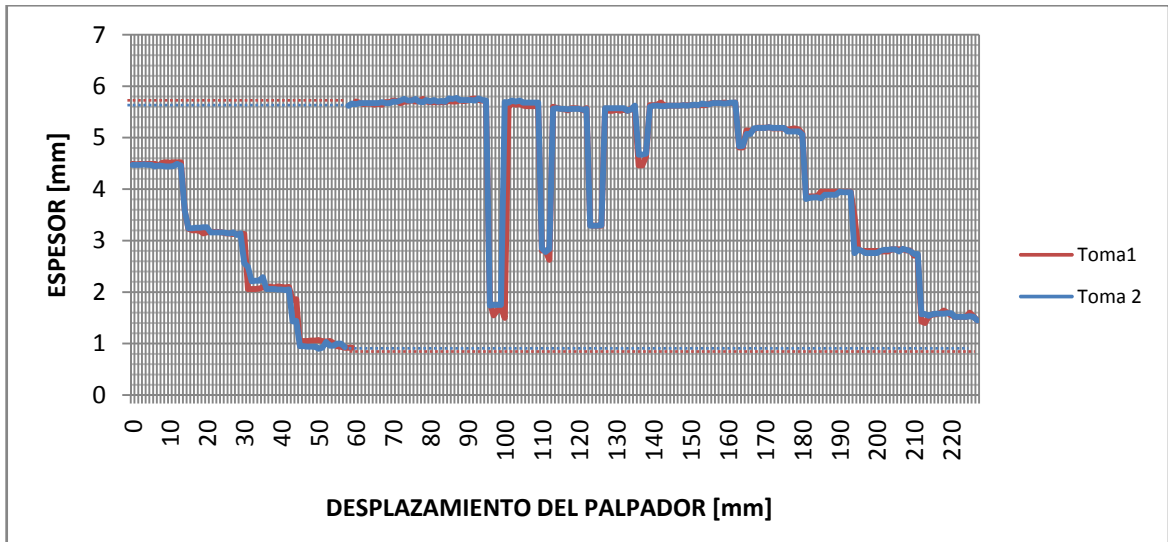
Para la inspección en el tramo de tubería de acero, inicialmente se debió seleccionar una única línea de inspección que permitiera no solo registrar los cambios de espesor de la escalerilla en la pared interna y externa, sino que también lograra registrar las posibles discontinuidades producidas por la presencia de cuatro agujeros superficiales.

Con cada uno de los palpadores, se efectuaron dos registros, que fueron analizadas de la misma forma que la escalerilla patrón, con el fin de seleccionar la más cercana a los datos de referencia determinados. Para este caso los valores teóricos se establecieron empleando el equipo de ultrasonido DM-4 para la estimación de espesor y de las imágenes micrográficas del HIROX HK 7700 para los agujeros.

Se iniciaron las pruebas con el palpador no focalizado, el cual permitió el trazado del contorno del tramo de tubería de los dos registros obtenidos como se muestra en la Figura 24, identificando las pérdidas de espesor en la pared interna como en la externa y la profundidad de los diferentes agujeros existentes sobre la línea de inspección seleccionada.

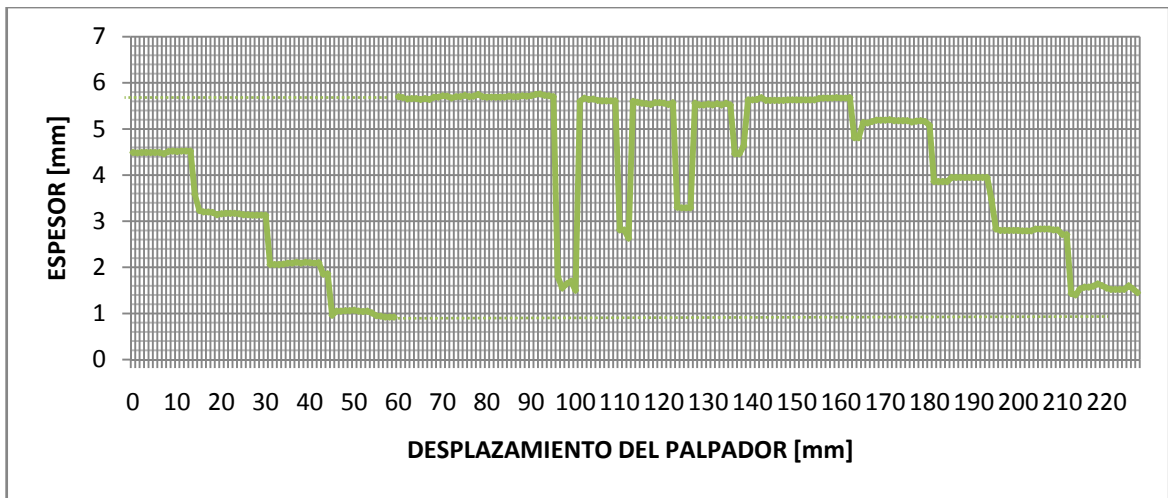
Teniendo en cuenta la desviación estándar calculada para cada uno de los datos obtenidos, se seleccionó la Toma 1 representada en la Figura 24, como la de menor cantidad de registros por fuera del rango estimado (Ver Tabla 9)

Figura 24. Comparación gráfica de los registros obtenidos, empleando el palpador no focalizado.



Fuente: Autores

Figura 25. Contorno del tubo patrón, empleando el palpador no focalizado



Fuente: Autores

Aunque el palpador no focalizado permitió el trazado del contorno de la sección de tubería, se presentó un alto grado de dificultad para determinar los espesores de la pared interna y de las profundidades de los agujeros presentes, debido a la

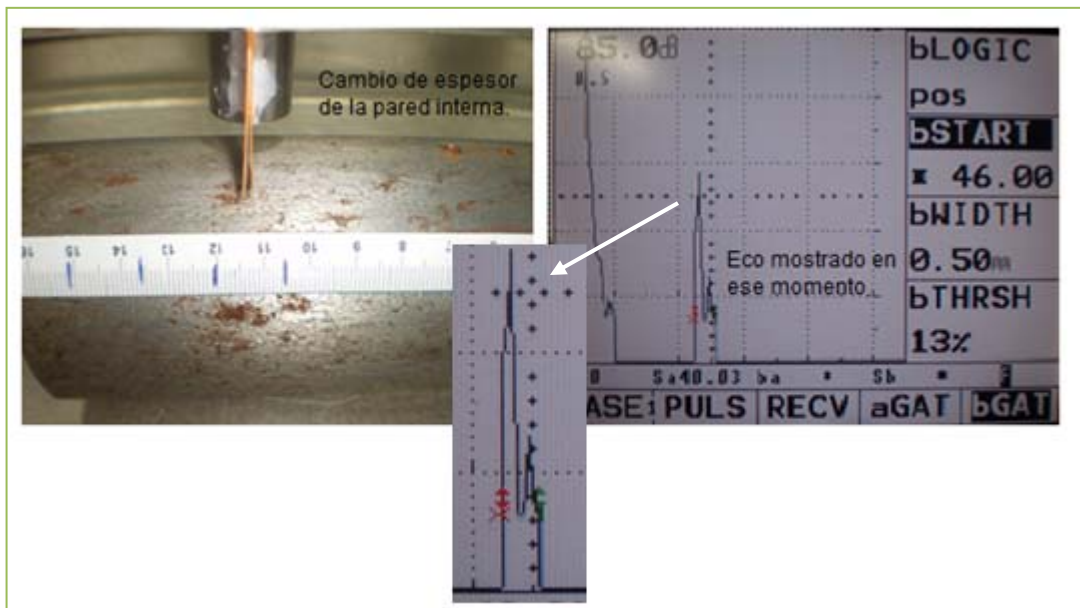
dispersión del haz (Ver Figura 26), obteniéndose porcentajes de error considerables presentes en la Tabla 10.

Tabla 9. Rango de espesores establecidos en cada uno de los palpadores.

ESPESOR [mm]	RANGO	
	NO FOCALIZADO [mm]	FOCALIZADO [mm]
1,07	0,62 - 1,52	0,61- 1,53
2,2	1,56 - 2,84	1,83- 2,57
3,2	2,46- 3,94	2,75- 3,65
4,3	3,62- 4,98	3,77- 5,22
6,08	5,7- 6,46	5,90- 6,26
3,87	3,74- 4	3,82- 3,921
2,67	2,53- 2,81	2,60- 2,739
1,57	1,11- 2,03	1,52- 1,623

Fuente: Autores

Figura 26. Comportamiento de los ecos en la medición de los espesores de la pared interna de la sección de tubería.

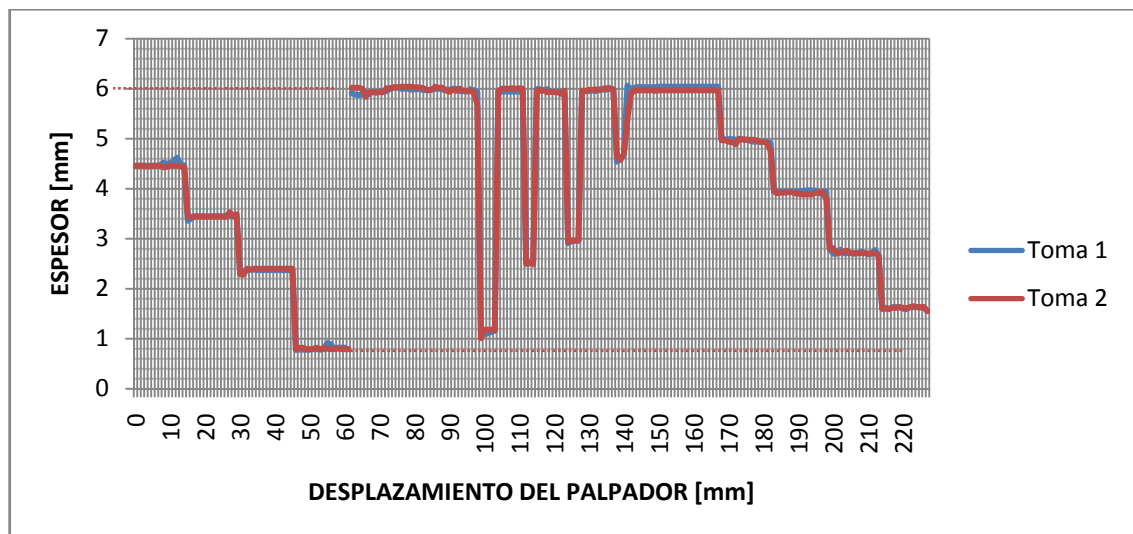


Fuente: Autores

En la Figura 26, se observa, que el palpador no focalizado carece de alta resolución, ya que no permite distinguir el eco de entrada a la pieza del eco de fondo al realizarse el cambio de espesor por la pared interna.

Posteriormente, se realizaron las dos tomas empleando el palpador focalizado, con las cuales se trazaron las gráficas representadas en la Figura 27, en la cual se puede apreciar la alta precisión que se tiene en los datos obtenidos con este palpador; sin embargo, no se lograron resultados satisfactorios en la medición de los espesores de la pared interna, así como de las profundidades de los agujeros que componen la tubería, debido a que se presentaba un alto nivel de dispersión del haz ultrasónico, lo cual generó una baja resolución en la pantalla del equipo de ultrasonido durante la medición de esta clase de discontinuidades. Además la pieza no es completamente estandarizada y presenta un deterioro superficial por corrosión, que induce a un error desde la primera medición.

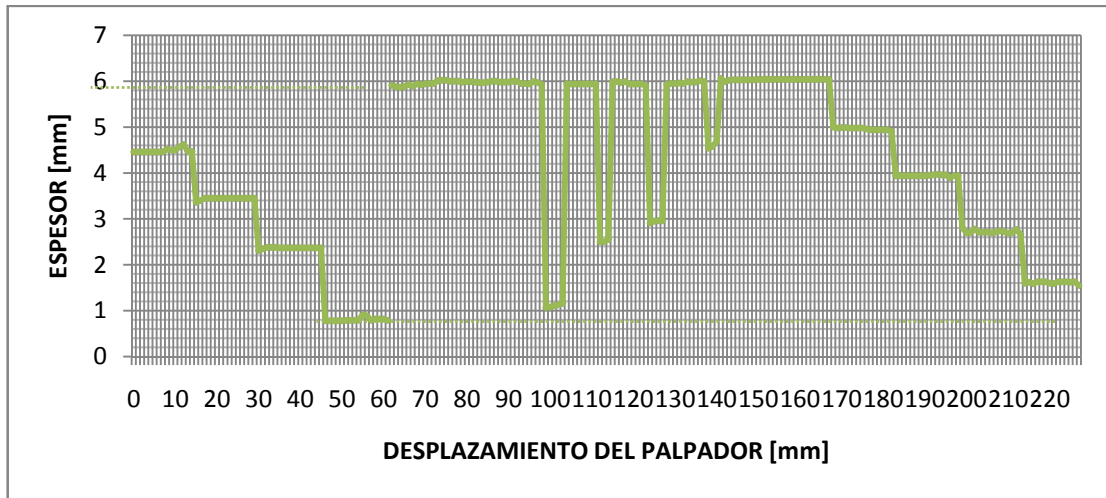
Figura 27. Comparación gráfica de las tomas realizadas empleando el palpador focalizado.



Fuente: Autores

En este caso se seleccionó la Toma 1 (Ver Figura 28), como la más representativa del contorno de la tubería, por ser la que menos registros por fuera de los rangos estipulados en la Tabla 9 presentaba.

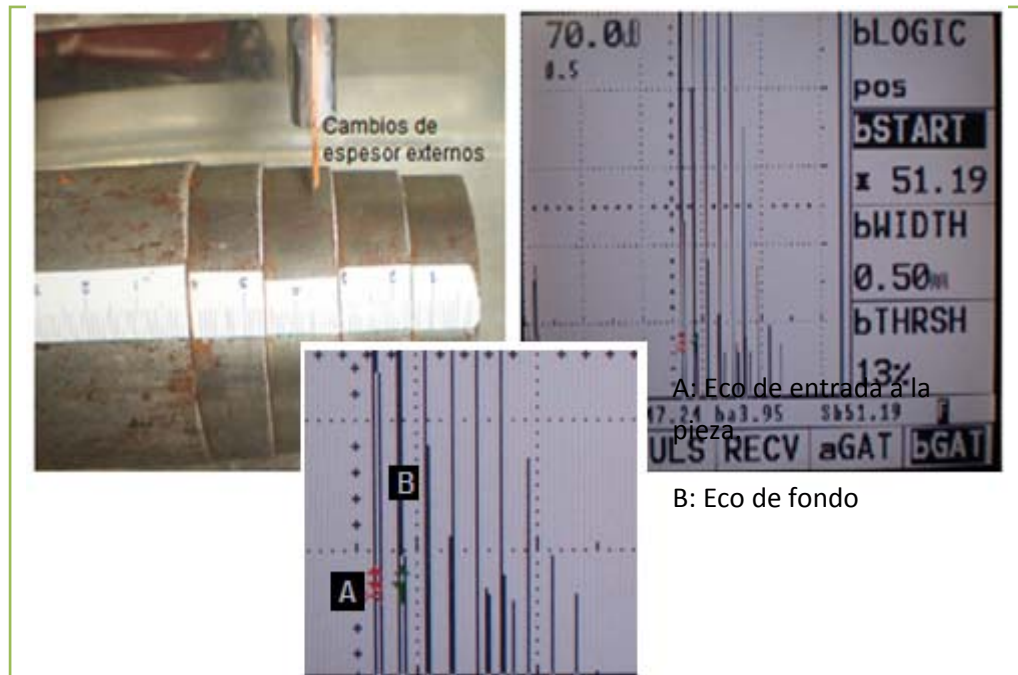
Figura 28. Contorno del tubo patrón, empleando el palpador focalizado



Fuente: Autores

A pesar de la precisión del palpador focalizado, se presentó gran dificultad al momento de dar resolución y determinar los datos de los cambios de espesor en la pared interna del tubo y en la identificación de los agujeros, representado en los elevados porcentajes de error calculados, expuestos en la Tabla 10. Sin embargo, mostró una alta resolución en la estimación de las pérdidas de espesor en la escalerilla externa, permitiendo el registro de datos cercanos al rango establecido, demostrando de esta manera, que presenta una alta definición al momento de observar defectos o imperfecciones superficiales como se aprecia en la Figura 29.

Figura 29. Comportamiento de los ecos en la medición de los cambios de espesor externos del tubo patrón, empleando el palpador focalizado.

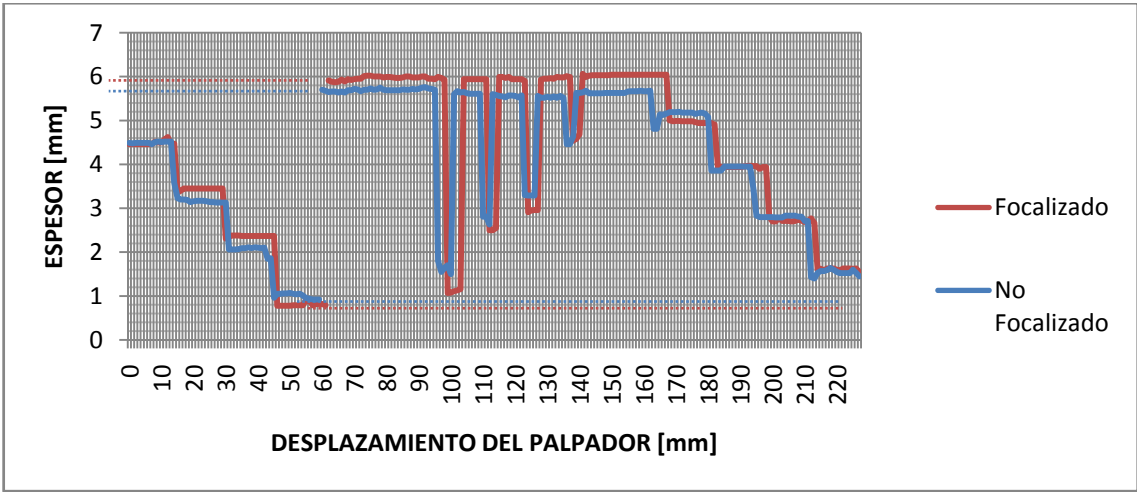


Fuente: Autores

En la Figura 29, se observa como el palpador focalizado, presenta una alta resolución, identificándose claramente el eco de entrada a la pieza y el eco de fondo permitiendo estimar de esta manera el espesor correspondiente.

A continuación, en la Figura 30, se expone la comparación entre las dos tomas de datos que mejor comportamiento mostraron por parte del palpador no focalizado y el focalizado.

Figura 30. Comparación entre las tomas de mejor comportamiento para cada uno de los palpadores utilizados.



Fuente: Autores

De la Figura 30, se establecen diferencias entre los registros tomados por cada uno de los palpadores, enfatizando en la zona superficial de la tubería; es decir, la escalerilla externa y los tramos de espesor mayor, encontrándose un error significativamente menor en los registrados por el palpador focalizado, lo cual demuestra que presenta una mayor sensibilidad y resolución para estimar discontinuidades de este tipo.

Tabla 10. Porcentajes de error obtenidos en cada sección de la tubería, para cada uno de los palpadores empleados.

PALPADOR	ESCALERILLA PARED INTERNA		ESPESOR MAYOR		ESCALERILLA EXTERIOR	
	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.
No Focalizado	13,12%	43,93%	5,26%	9,21%	1%	10,83%
Focalizado	3,48%	43,93%	0,98%	2,96%	0,77%	4,11%

Fuente: Autores

Al analizar los porcentajes de error calculados, se logró verificar la dificultad que los dos palpadores presentaron para la medición de los espesores de la pared interna de la tubería, alcanzando errores aproximados de 44%.

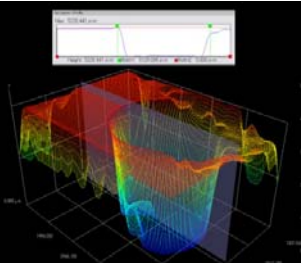
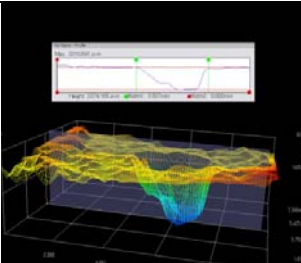
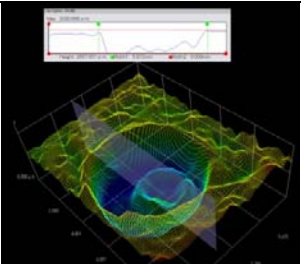
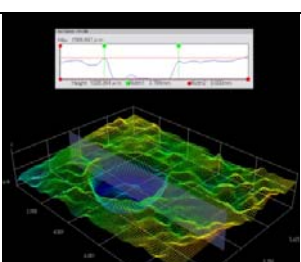
En cuanto a la medición de los agujeros presentes en la tubería, se observó que ninguno de los dos palpadores mostró un buen registro de los mismos, ya que la mayoría de los valores se encontraron alejados de los datos suministrados por la microscopia (Ver Tabla 11), y por esto se vieron errores de gran magnitud, apreciables en el Anexo D.

Teniendo en cuenta los datos registrados en la Tabla 11, se apreció que el palpador no focalizado registro los valores más próximos a los determinados por las micrografías, debido a la forma en la que es emitido el haz ultrasónico en este tipo de palpador, lo que permite establecer un promedio de los espesores medidos, eventualidad que no sucede con el palpador focalizado.

Debido a que el interior del agujero presenta irregularidades en su superficie, es posible que el haz emitido por el palpador focalizado presente una mayor

dispersión, generando un error significativo en sus registros, debido a que este palpador realiza la inspección punto a punto.

Tabla 11: Medidas de los espesores en los orificios obtenidas con el microscopio HIROX HK 7700 y los palpadores empleados.

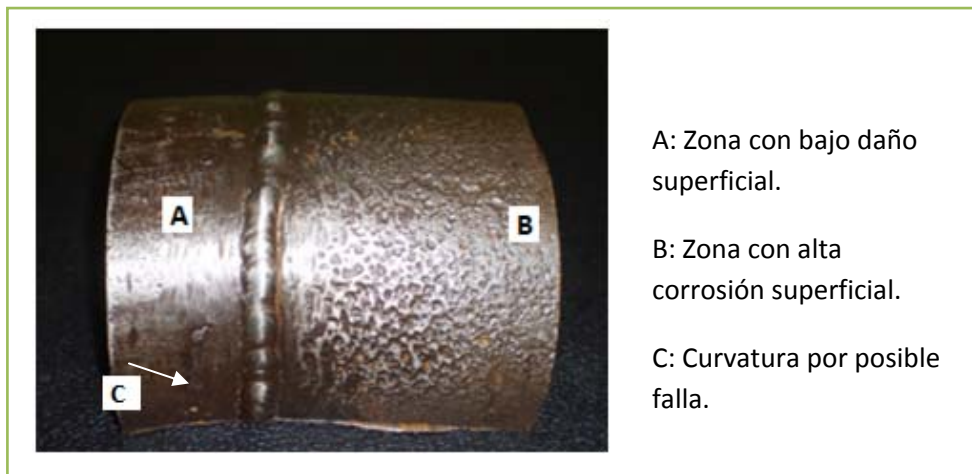
MICROGRAFIA HIROX HK 7700	ESPESOR [mm]		
	HIROX	NO FOCALIZADO	FOCALIZADO
	0,854	1,8	1,16
	3,706	2,81	2,5
	3,983	3,3	2,96
	5,04	4,63	4,69

Fuente: Autores

SECCIÓN DE TUBO SOLDADO

En cuanto al tubo soldado apreciado en la Figura 31, se hace necesario indicar que presenta dos tipos de superficies que están separadas por un cordón de soldadura. En la parte A, se tiene una superficie con un deterioro superficial mínimo, mientras que en la parte B, se encontró una superficie no homogénea debido a la pérdida de espesor por corrosión, lo cual dificultó en gran magnitud la medición de los espesores, impidiendo la lectura clara de los ecos y por tanto de los datos en la prueba.

Figura 31. Sección de tubo soldado.



Fuente: Autores

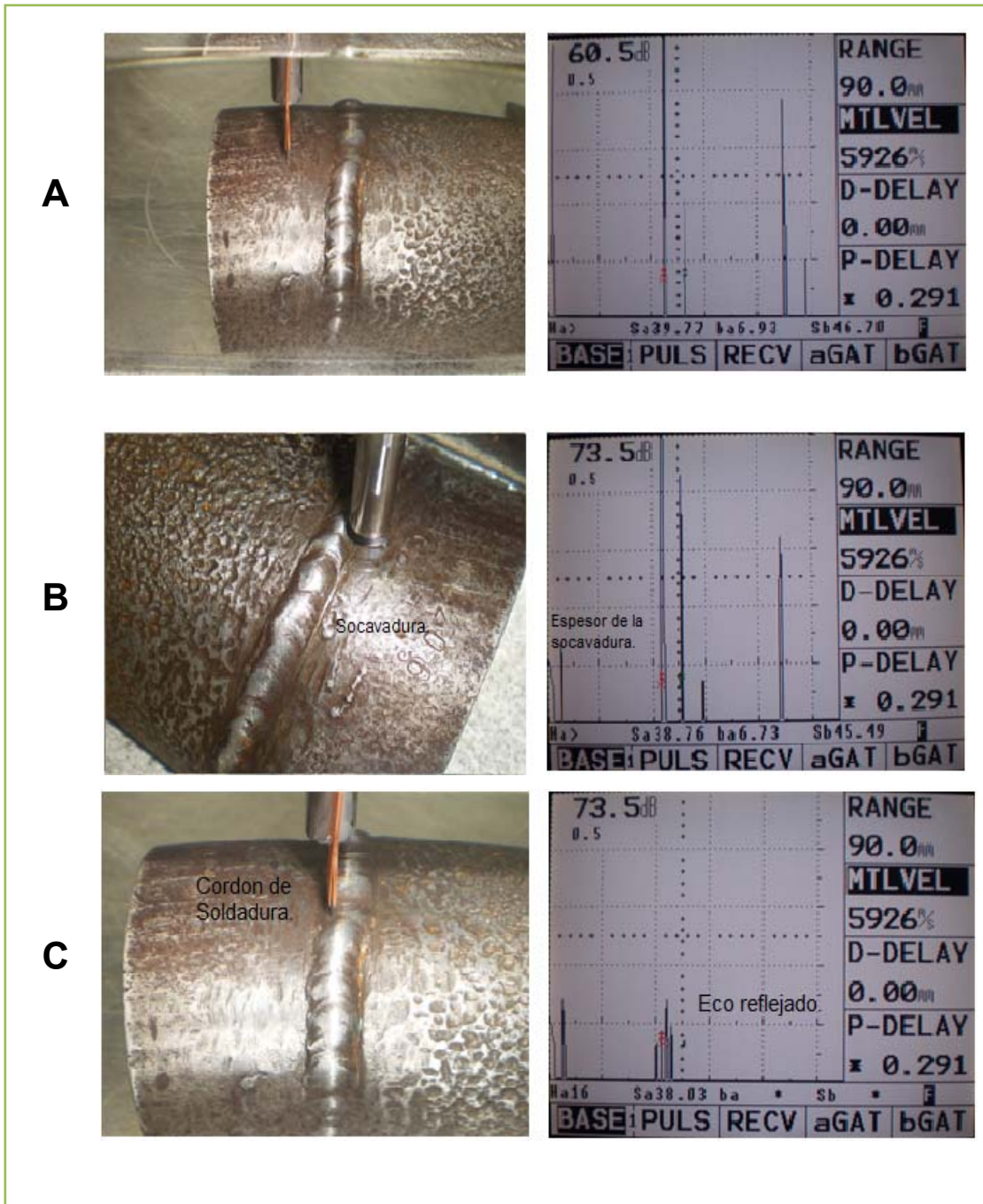
Debido a la condición superficial de las partes no fue posible la toma de datos con el palpador no focalizado en el tubo soldado, ya que presentó una alta dispersión del haz ultrasónico al incidir sobre la superficie corroída, lo cual ocasionaba la pérdida en la resolución de los ecos en la pantalla del equipo. Por otro lado el palpador focalizado presentó alta resolución y sensibilidad en toda la superficie del tubo, excepto sobre el cordón de soldadura donde únicamente se logró resolver la parte superior de la soldadura.

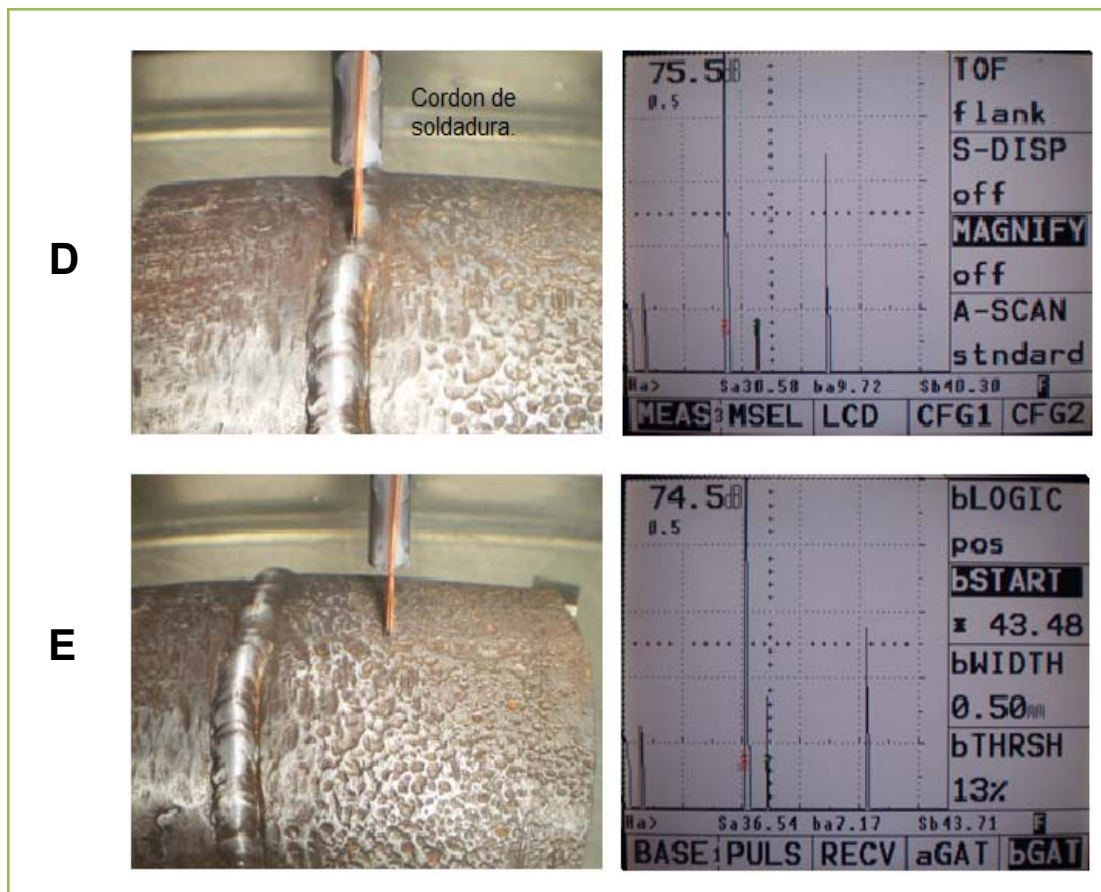
Esto se debió posiblemente a que por ser los lados del cordón superficies aproximadamente paralelas al haz no permitieron el registro del espesor, por el contrario dispersaron por completo las reflexiones del haz ultrasónico, lo cual se observó como una pérdida total del eco en pantalla.

A pesar de inspeccionarse dos regiones con diferente grado de deterioro superficial, el palpador focalizado, estimó el espesor con una buena resolución en cada punto de la trayectoria.

En la Figura 32, se dispone el comportamiento de los ecos en cada una de las zonas de la trayectoria inspeccionada, enfatizando en los visualizados al momento de ubicarse el palpador a los lados del cordón de soldadura, en los que se pudo determinar la presencia de una socavadura, siendo imposible determinar algunas mediciones en el cordón de soldadura, lo cual se indica en la Figura 33.

Figura 32. Trayectoria de inspección de la sección de tubo soldado.





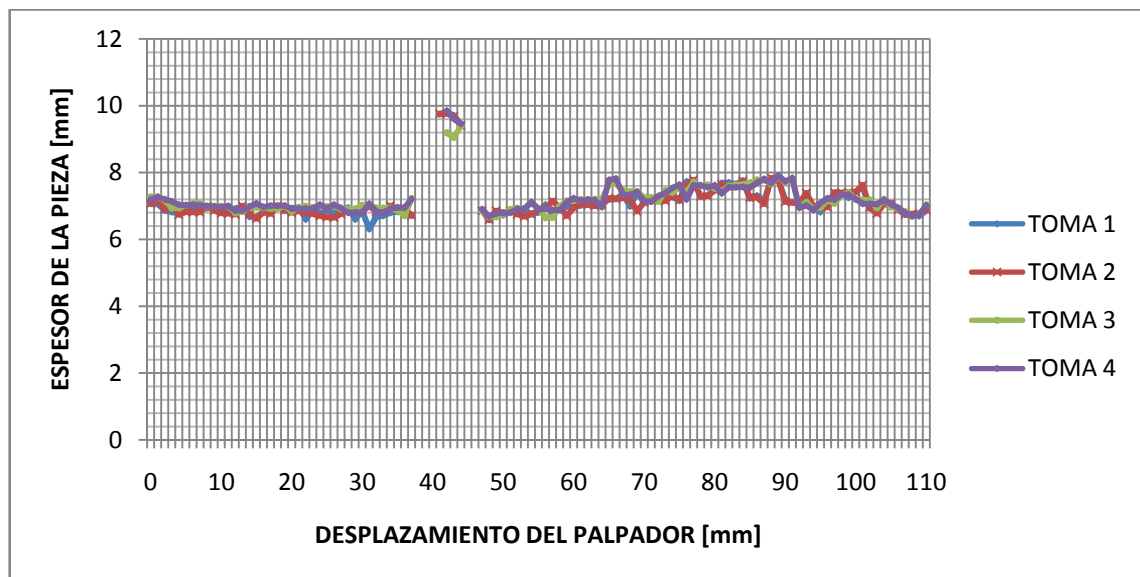
Fuente: Autores

En la parte A de la Figura 32 se observa la medición del espesor de la tubería en su primer tramo. Se hace especial énfasis en la alta calidad de la resolución del eco mostrado en la pantalla del equipo, donde se estima una medida de espesor de 6,93 [mm]. Posteriormente en la parte B se ubica el palpador en las cercanías del cordón de soldadura permitiendo detectar un espesor menor que se ve traducido en la presencia de una socavadura, lo cual demuestra la alta sensibilidad manejada por este tipo de palpador en cuanto a la detección de discontinuidades superficiales. Con la ubicación del palpador en la zona del cordón de soldadura se analiza la parte C de la Figura 32, donde se registra en la pantalla del equipo una pérdida total tanto del eco de entrada a la pieza, como del eco de fondo, producto de la dispersión generada por el haz al incidir sobre una

superficie que es aproximadamente paralela a este. En la parte D, el palpador se encuentra sobre la cresta del cordón donde se logra registrar espesores dentro de los cuales se encuentra el observado en la fotografía que corresponde a 9,72 [mm]. Por último se tiene la parte E, en la que el palpador focalizado permitió registrar milímetro a milímetro la variación de espesores a pesar del alto nivel de deterioro por corrosión presente en esta zona de la pieza (Ver Figura 33).

En la Figura 34 se establece una comparación entre los registros tomados por el palpador focalizado, los cuales se trazaron milímetro a milímetro sobre una línea de inspección.

Figura 33. Comparación gráfica de las tomas realizadas empleando el palpador focalizado.



Fuente: Autores

Con el análisis de la figura 34, se aprecia que la parte A de la tubería presenta menor grado de deterioro que la parte B, lo cual confirma lo establecido inicialmente por la inspección visual.

5. CONCLUSIONES

Con la realización del presente proyecto se concluye que:

- Con el análisis efectuado a los registros tabulados, se determinó que los resultados obtenidos por las pruebas con el palpador no focalizado, presentaban en algunos casos considerables diferencias, a pesar de mantener siempre las mismas condiciones de trabajo, lo cual se debe a la forma como este emite el haz ultrasónico, el cual realiza un promedio de los espesores a medida que se avanza en la línea de inspección, en contraste con la forma como el palpador focalizado interpreta dichos espesores, tomando la medida punto a punto.
- El palpador focalizado mostró un excelente comportamiento en cuanto a la detección de discontinuidades de la superficie externa de las piezas metálicas estudiadas, mostrando una alta resolución en la pantalla del equipo de ultrasonido, además de permitir la detección de pequeños detalles presentes, lo cual nos revela la alta sensibilidad con la que cuenta este dispositivo, ya que hace incidir el haz ultrasónico punto a punto sobre la pieza.
- En las pruebas hechas a las piezas tubulares, el palpador focalizado se adaptó mejor a la geometría de estas, debido a las características que posee este en cuanto a la emisión de su haz las cuales impiden que este se disperse, origina la pérdida de energía ultrasónica o atenuación del haz ultrasónico, presentando una excelente relación resolución-sensibilidad lográndose la medición de superficies no homogéneas. Lo anterior se reflejó en la claridad de los ecos mostrados en la pantalla del equipo, que permitían con mayor facilidad el registro de los datos.

- Se determinó durante la estimación del espesor en el cordón de soldadura la pérdida del haz ultrasónico, debido a que la superficie de la soldadura se encuentra aproximadamente paralela al haz ultrasónico, provocando que el ultrasonido se disperse, reflejándose en otras direcciones distintas a la ubicación del palpador para la recepción de la señal ultrasónica.
- En la evaluación de la sección de tubo soldado se determinó, con el palpador focalizado, el espesor de pared a pesar a la alta rugosidad superficial que presentaba la pieza, además se logró el trazado de la condición superficial del tubo, dos situaciones que por la técnica de ultrasonido por contacto no se lograrían determinar debido al pobre acoplamiento del transductor a la pieza debido a la rugosidad de la superficie, igualmente la técnica de contacto no permite conocer el estado superficial de una sección que ha estado sometida a procesos de corrosión.
- Con respecto a los resultados obtenidos en la medición de espesores en la pared interna de la tubería A53 con cada uno de los palpadores, se comprobó que estos presentan errores grandes en sus registros, debido a que manejan frecuencias muy altas (10 MHz y 20 MHz respectivamente), y en consecuencia una baja penetración a la pieza.

6. RECOMENDACIONES

- Implementar un sistema de desplazamiento automatizado, con el fin de garantizar movimientos con distancias exactamente precisas entre una y otra toma.
- Realizar una inspección empleando palpadores focalizados y no focalizados de igual frecuencia, que permita realizar una comparación con menos variables y de esta manera evaluar el rendimiento de cada uno de ellos.
- Mejorar las condiciones de estabilidad del sistema de desplazamiento en general, especialmente en el tubo porta palpador, ya que si presentan alteraciones en su perpendicularidad puede alterar la calibración del equipo de ultrasonido y la adecuada penetración del haz ultrasónico.
- Emplear para la técnica de inmersión en agua, un inhibidor que se adicione al medio, con el fin de evitar el ataque y deterioro de la pieza sumergida por corrosión.

BIBLIOGRAFIA

- American Society of testing for materials, ASTM E 797-95, Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method.
- American Society of testing for materials, ASTM E 1001-06, Standard Practice for Detection and Evaluation of Discontinuities by the Immersed Pulse-Echo Ultrasonic Method Using Longitudinal Waves.
- APLICACIÓN DE LA TECNICA DE ULTRASONIDO PARA LA ESTIMACION DE LA PERDIDA DE ESPESOR EN LA SUPERFICIE EXTERNA DE UNA SUPERFICIE DE UNA PIEZA TUBULAR. Moros Duran, Adriana Catalina, Torres Benítez, Elkin Yesid. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisco-Químicas 2009.
- BLITZ, Jack. Fundamentals of Ultrasonics. Second Edition. Department of Physic, BrunelUniversity, London. 1967.
- END-GENERALIDADES. Echeverría, Ricardo Ing. Universidad Nacional de Comahue, Facultad de Ingeniería, laboratorio de Ensayos no Destructivos 2001.
- FORERO GARCIA, EDWIN FRANCISCO. Diseño de un prototipo para la medición de espesores usando ultrasonido. Trabajo de grado Ingeniero Eléctrico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. 2005. 36p.
- Instituto Colombiano del Petróleo. Curso Ultrasonido Nivel II. Ecopetrol 1996.

- KRAUTKRAMER AND KRAUTKRAMER. Ultrasonic Testing of Materials.
- M. barrera M, J. Marin E, J. Lisboa M,L. olivares S, R Zuñiga T. Inspección ultrasónica por inmersión de placas combustibles parareactores nucleares de investigación 2007.
- NDT EN ESPAÑOL. [Citado: 10/05/2011] disponible en http://www.ndtenespanol.org/UT_2html.
- Rodríguez Jairo Alejandro, Vitola Jaime, Sandoval Juliana. Universidad Santo Tomas, Sede Bogotá. Diseño y Construcción de un Sistema de Ultrasonido para la Detección de Discontinuidades en Soldaduras 2008.
- Rodolfo Pontigo, Roman. Amezola Luna, Rogelio. Implantación de Técnicas de Ultrasonido por Inmersión en la Inspección de Ensamblajes Automotrices 2006.
- Sanhueza Almonacid, Pablo Alberto. Análisis en pro/engineer de un eje de motor y un polin pateador de celulosa arauco y constitución planta valdivia y posterior comparación con equipo de ultrasonido 2007.
- The American Society of Mechanical Engineers, ASME B31G, Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines.
- ULTRASONIDO. Echeverría, Ricardo Ing. Universidad Nacional de Comahue, Facultad de Ingeniería, laboratorio de Ensayos no Destructivos 2002.

ANEXOS

ANEXO A. CÁLCULO DE LA DISTANCIA MÍNIMA PERMITIDA ENTRE EL PALPADOR Y LA PIEZA A INSPECCIONAR

A continuación se muestran los cálculos realizados para determinar la altura mínima a la cual se debe ubicar el palpador sobre la pieza a inspeccionar, para evitar interferencias. Este valor depende directamente del espesor máximo a evaluar.

La ecuación empleada es la (5).

$$D = 6,35 + \frac{V_A}{V_M} \times E \text{ [mm]} \text{ Donde}$$

V_A = Velocidad del sonido en el agua

V_M = Velocidad del sonido en el metal de prueba

E =Espesor máximo del metal.

1. Escalerilla KRAUTKRAMER

$$D = 6,35 + \frac{1500}{5920} \times 10$$

$$D = 8,8837 \text{ mm}$$

2. Tubo patrón

$$D = 6,35 + \frac{1500}{5920} \times 6,08$$

$$D = 7,8905 \text{ mm}$$

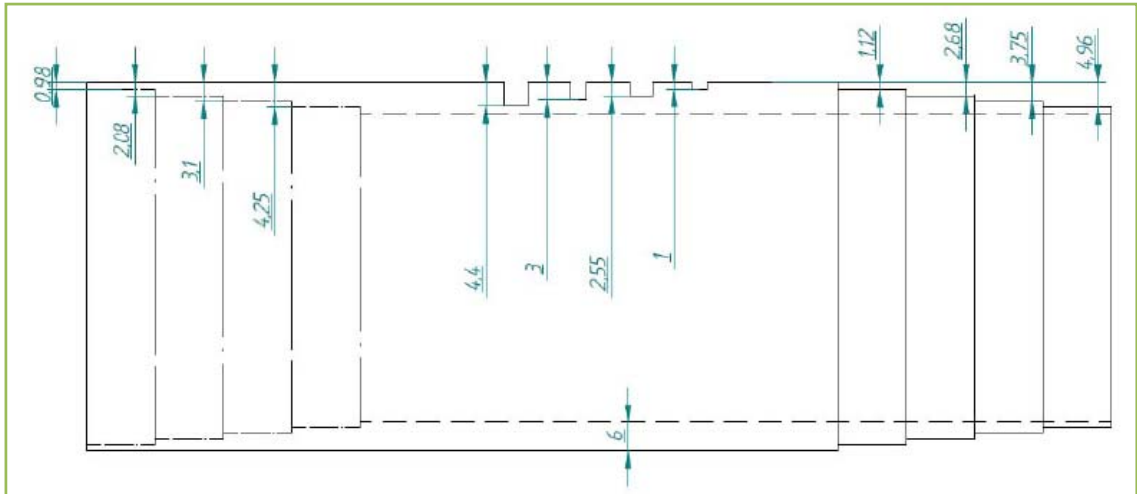
3. Sección de tubo soldado

$$D = 6,35 + \frac{1500}{5920} \times 6,286$$

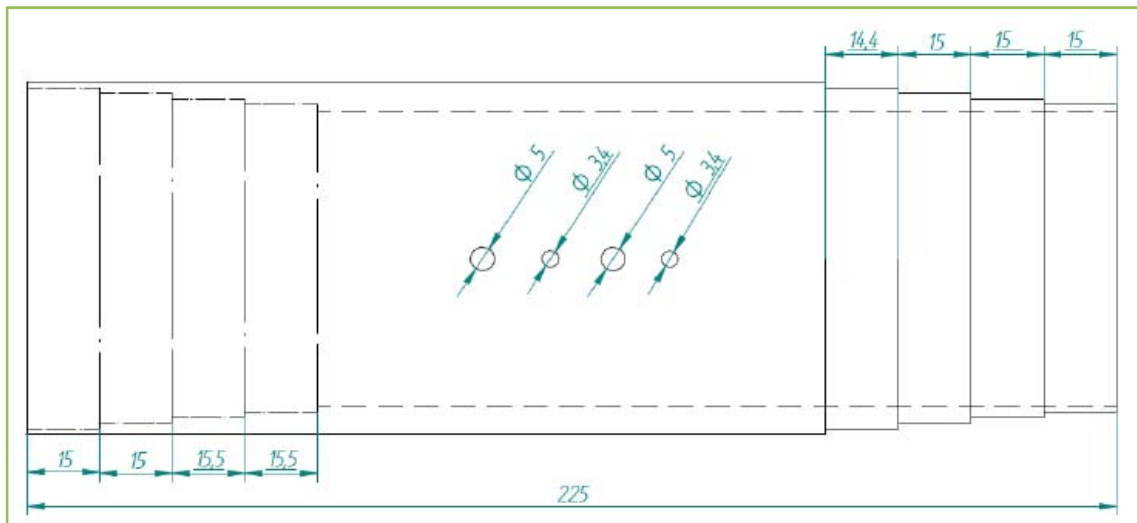
$$D = 7,9427 \text{ mm}$$

ANEXO B. PLANOS DE LA PROBETA TUBULAR PROBLEMA

VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR



*Todas las medidas indicadas se encuentran en [mm]

**ANEXO C. CÁLCULO DE VARIANZA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y RANGO DE
ESPEORES PARA LA ESCALERILLA, CON LOS PALPADORES
FOCALIZADO Y NO FOCALIZADO.**

- PALPADOR FOCALIZADO

POSICIÓN	ESPESOR	ESPESOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
1	9,98	10	5,26E-05	0,01	9,99 -10,01	0,2
2	9,99	10				0,1
3	9,99	10				0,1
4	10,01	10				0,1
5	10	10				0
6	9,99	10				0,1
7	10,01	10				0,1
8	10	10				0
9	10	10				0
10	10	10				0
11	10	10				0
12	10	10				0
13	10	10				0
14	10	10				0
15	10	10				0
16	10	10				0
17	10	10				0
18	10	10				0
19	9,99	10				0,1
20	7,73	8	0,004	0,0818	7,92- 8,08	3,375
21	7,98	8				0,25
22	7,98	8				0,25
23	8	8				0
24	7,99	8				0,125
25	7,99	8				0,125
26	7,99	8				0,125
27	8	8				0
28	7,99	8				0,125
29	8	8				0
30	8	8				0

POSICIÓN	ESPESOR	ESPESOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
31	8,01	8				0,125
32	8,02	8				0,25
33	8,04	8				0,5
34	8,04	8				0,5
35	8,04	8				0,5
36	8,04	8				0,5
37	8,02	8				0,25
38	8	8				0
39	8	8				0
40	5,61	6				6,5
41	5,99	6				0,166
42	5,99	6				0,166
43	6,02	6				0,333
44	6,02	6				0,333
45	6,04	6				0,666
46	5,97	6				0,5
47	6,01	6				0,166
48	6,04	6	0,0096	0,098	5,90 - 6,10	0,666
49	6,02	6				0,333
50	6,04	6				0,666
51	6,04	6				0,666
52	5,97	6				0,5
53	5,97	6				0,5
54	5,98	6				0,333
55	5,99	6				0,166
56	5,99	6				0,166
57	3,74	4				6,5
58	3,96	4				1
59	3,97	4				0,75
60	3,98	4				0,5
61	4,01	4	0,0053	0,0727	3,93 - 4,07	0,25
62	4,04	4				1
63	4,04	4				1
64	4,05	4				1,25
65	4,06	4				1,5
66	4,06	4				1,5

POSICIÓN	ESPESOR	ESPESOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
67	4,03	4				0,75
68	4,04	4				1
69	4,07	4				1,75
70	3,96	4				1
71	3,96	4				1
72	3,96	4				1
73	3,96	4				1
74	3,96	4				1
75	3,96	4				1
76	1,68	2				0,0062
77	1,97	2	1,5			
78	2	2	0			
79	2,02	2	1			
80	2,05	2	2,5			
81	2,03	2	1,5			
82	2,02	2	1			
83	2,03	2	1,5			
84	2,04	2	2			
85	2	2	0			
86	2	2	0			
87	2,01	2	0,5			
88	2,03	2	1,5			
89	2,01	2	0,5			
90	2,03	2	1,5			
91	2,04	2	2			
92	2	2	0			
93	2	2	0			
94	1,96	2	2			
95	1,96	2	2			
96	1,88	2	6			

- PALPADOR NO FOCALIZADO

POSICIÓN	ESPEJOR	ESPEJOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
1	10,01	10	0,03545238	0,1882	9,8- 10,2	0,1
2	10,01	10				0,1
3	10,01	10				0,1
4	10,01	10				0,1
5	10,02	10				0,2
6	10,03	10				0,3
7	10,01	10				0,1
8	10	10				0
9	9,98	10				0,2
10	9,99	10				0,1
11	10	10				0
12	9,99	10				0,1
13	9,98	10				0,2
14	10	10				0
15	10,03	10				0,3
16	9,87	10				1,3
17	9,84	10				1,6
18	9,85	10				1,5
19	9,81	10				1,9
20	9,46	10				5,4
21	9,41	10				5,9
22	7,89	8	0,00784737	0,0885	7,91 - 8,09	1,375
23	8,02	8				0,25
24	8	8				0
25	8	8				0
26	8,04	8				0,5
27	8,04	8				0,5
28	8,01	8				0,125
29	7,99	8				0,125
30	7,98	8				0,25
31	7,98	8				0,25
32	7,99	8				0,125
33	8,03	8				0,375
34	7,98	8				0,25

POSICIÓN	ESPESOR	ESPESOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
35	7,96	8				0,5
36	7,86	8				1,75
37	7,85	8				1,875
38	7,84	8				2
39	7,84	8				2
40	7,81	8				2,375
41	5,96	6				0,666
42	5,97	6				0,5
43	5,98	6				0,333
44	6	6				0
45	5,97	6				0,5
46	5,99	6				0,166
47	5,98	6				0,333
48	5,99	6				0,166
49	5,98	6	0,00062778	0,025	5,97 - 6,03	0,333
50	5,96	6				0,666
51	5,97	6				0,5
52	5,98	6				0,333
53	5,99	6				0,166
54	5,97	6				0,5
55	5,97	6				0,5
56	5,98	6				0,333
57	5,97	6				0,5
58	5,98	6				0,333
59	3,99	4				0,25
60	4	4				0
61	3,98	4				0,5
62	3,99	4				0,25
63	3,99	4				0,25
64	3,99	4	0,00031579	0,0177	3,98 - 4,02	0,25
65	3,99	4				0,25
66	3,98	4				0,5
67	3,99	4				0,25
68	3,98	4				0,5
69	3,98	4				0,5
70	3,98	4				0,5

POSICIÓN	ESPEJOR	ESPEJOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
71	3,98	4				0,5
72	3,98	4				0,5
73	3,98	4				0,5
74	3,98	4				0,5
75	3,97	4				0,75
76	4	4				0
77	3,97	4				0,75
78	2,01	2	0,00034737	0,0186	1,98 - 2,02	0,5
79	2	2				0
80	2	2				0
81	2,01	2				0,5
82	1,98	2				1
83	1,98	2				1
84	1,99	2				0,5
85	2,02	2				1
86	1,98	2				1
87	2,01	2				0,5
88	1,97	2				1,5
89	1,99	2				0,5
90	1,99	2				0,5
91	1,98	2				1
92	1,98	2				1
93	2,01	2				0,5
94	1,97	2				1,5
95	1,96	2				2
96	1,99	2				0,5

**ANEXO D. CÁLCULO DE VARIANZA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y RANGO DE
ESPEORES PARA EL TUBO PATRÓN, CON LOS PALPADORES
FOCALIZADO Y NO FOCALIZADO.**

FOCALIZADO

	POSICIÓN	ESPESOR	ESPESOR TEORICO	ERROR
1er agujero	1	1,07	0,854	25,2927
	2	1,08	0,854	26,4637
	3	1,11	0,854	29,9766
	4	1,13	0,854	32,3185
	5	1,16	0,854	35,8314
2do agujero	1	2,5	3,706	32,5418
	2	2,5	3,706	32,5418
	3	2,55	3,706	31,1927
3er agujero	1	2,91	3,983	26,9395
	2	2,95	3,983	25,9352
	3	2,96	3,983	25,6842
	4	2,96	3,983	25,6842
4to agujero	1	4,54	5,04	9,9206
	2	4,58	5,04	9,1270
	3	4,69	5,04	6,9444

NO FOCALIZADO

	POSICIÓN	ESPEJOR	ESPEJOR TEORICO	ERROR
1er agujero	1	1,8	0,854	-110,7728
	2	1,55	0,854	-81,4988
	3	1,64	0,854	-92,0375
	4	1,7	0,854	-99,0632
	5	1,5	0,854	-75,6440
2do agujero	1	2,81	3,706	24,1770
	2	2,81	3,706	24,1770
	3	2,63	3,706	29,0340
3er agujero	1	3,3	3,983	17,1479
	2	3,29	3,983	17,3989
	3	3,29	3,983	17,3989
	4	3,29	3,983	17,3989
4to agujero	1	4,46	5,04	11,5079
	2	4,46	5,04	11,5079
	3	4,63	5,04	8,1349

NO FOCALIZADO ESCALERA EXT

POSICIÓN	ESPEJOR	ESPEJOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
1	4,81	5,03	0,02396471	0,15	4,87-5,18	4,373757455
2	4,81	5,03				4,373757455
3	5,14	5,03				2,186878728
4	5,13	5,03				1,988071571
5	5,16	5,03				2,584493042
6	5,19	5,03				3,180914513
7	5,19	5,03				3,180914513
8	5,19	5,03				3,180914513
9	5,2	5,03				3,37972167
10	5,18	5,03				2,982107356
11	5,18	5,03				2,982107356
12	5,18	5,03				2,982107356
13	5,18	5,03				2,982107356
14	5,15	5,03				2,385685885
15	5,17	5,03				2,783300199
16	5,18	5,03				2,982107356
17	5,16	5,03				2,584493042
18	5,08	5,03				0,994035785
19	3,86	3,87	0,01676923	0,13	3,74- 4	0,258397933
20	3,86	3,87				0,258397933
21	3,86	3,87				0,258397933
22	3,86	3,87				0,258397933
23	3,95	3,87				2,067183463
24	3,95	3,87				2,067183463
25	3,95	3,87				2,067183463
26	3,95	3,87				2,067183463
27	3,95	3,87				2,067183463
28	3,95	3,87				2,067183463
29	3,95	3,87				2,067183463
30	3,95	3,87				2,067183463
31	3,95	3,87				2,067183463
32	3,47	3,87				10,33591731
33	2,83	2,67	0,01863125	0,14	2,53-2,81	5,992509363
34	2,8	2,67				4,868913858
35	2,8	2,67				4,868913858
36	2,8	2,67				4,868913858
37	2,8	2,67				4,868913858
38	2,8	2,67				4,868913858
39	2,79	2,67				4,494382022
40	2,79	2,67				4,494382022
41	2,79	2,67				4,494382022

POSICIÓN	ESPEJOR	ESPEJOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
42	2,83	2,67				5,992509363
43	2,83	2,67				5,992509363
44	2,83	2,67				5,992509363
45	2,83	2,67				5,992509363
46	2,81	2,67				5,243445693
47	2,81	2,67				5,243445693
48	2,71	2,67				1,498127341
49	2,71	2,67				1,498127341
50	1,43	1,57				0,21210667
51	1,4	1,57	10,82802548			
52	1,53	1,57	2,547770701			
53	1,57	1,57	0			
54	1,57	1,57	0			
55	1,59	1,57	1,27388535			
56	1,64	1,57	4,458598726			
57	1,6	1,57	1,910828025			
58	1,55	1,57	1,27388535			
59	1,52	1,57	3,184713376			
60	1,52	1,57	3,184713376			
61	1,52	1,57	3,184713376			
62	1,52	1,57	3,184713376			
63	1,6	1,57	1,910828025			
64	1,53	1,57	2,547770701			
65	1,45	1,57	7,643312102			

FOCALIZADO ESCALERA EXT

POSICIÓN	ESPEJOR	ESPEJOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
1	5	5,03	0,00545714	0,11	4,92-5,14	4,373757455
2	4,98	5,03				4,373757455
3	4,99	5,03				2,186878728
4	4,99	5,03				1,988071571
5	4,98	5,03				2,584493042
6	4,98	5,03				3,180914513
7	4,98	5,03				3,180914513
8	4,98	5,03				3,180914513
9	4,96	5,03				3,37972167
10	4,94	5,03				2,982107356
11	4,94	5,03				2,982107356
12	4,94	5,03				2,982107356
13	4,94	5,03				2,982107356
14	4,94	5,03				2,385685885
15	4,91	5,03				2,783300199
16	3,94	3,87				2,982107356
17	3,94	3,87				2,584493042
18	3,94	3,87				0,994035785
19	3,94	3,87	0,00604	0,051	3,82-3,921	0,258397933
20	3,94	3,87				0,258397933
21	3,94	3,87				0,258397933
22	3,94	3,87				0,258397933
23	3,94	3,87				2,067183463
24	3,95	3,87				2,067183463
25	3,96	3,87				2,067183463
26	3,97	3,87				2,067183463
27	3,96	3,87				2,067183463
28	3,96	3,87				2,067183463
29	3,9	3,87				2,067183463
30	3,94	3,87				2,067183463
31	3,94	3,87				2,067183463
32	2,81	2,67				10,33591731
33	2,7	2,67	0,00425714	0,069	2,60-2,739	5,992509363
34	2,7	2,67				4,868913858
35	2,78	2,67				4,868913858
36	2,71	2,67				4,868913858
37	2,71	2,67				4,868913858
38	2,71	2,67				4,868913858
39	2,7	2,67				4,494382022
40	2,71	2,67				4,494382022
41	2,74	2,67				4,494382022

POSICIÓN	ESPEJOR	ESPEJOR TEORICO	VARIANZA	DESVIACION ESTANDAR	RANGO	ERROR
42	2,72	2,67				5,992509363
43	2,69	2,67				5,992509363
44	2,7	2,67				5,992509363
45	2,77	2,67				5,992509363
46	2,66	2,67				5,243445693
47	1,6	1,57				5,243445693
48	1,62	1,57				1,498127341
49	1,59	1,57				1,498127341
50	1,63	1,57				0,00255385
51	1,63	1,57	10,82802548			
52	1,63	1,57	2,547770701			
53	1,6	1,57	0			
54	1,59	1,57	0			
55	1,63	1,57	1,27388535			
56	1,63	1,57	4,458598726			
57	1,63	1,57	1,910828025			
58	1,62	1,57	1,27388535			
59	1,63	1,57	3,184713376			
60	1,55	1,57	3,184713376			