

**APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PARA LA ESTIMACIÓN DE
LA PÉRDIDA DE ESPESOR EN LA SUPERFICIE EXTERNA DE UNA PIEZA
TUBULAR**

**ADRIANA CATALINA MOROS DURAN
ELKIN YESID TORRES BENÍTEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
GRUPO DE INVESTIGACIÓN GIMAT
BUCARMANGA**

2009

**APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PARA LA ESTIMACIÓN DE
LA PÉRDIDA DE ESPESOR EN LA SUPERFICIE EXTERNA DE UNA PIEZA
TUBULAR**

**ADRIANA CATALINA MOROS DURAN
ELKIN YESID TORRES BENÍTEZ**

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

Director

**LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ
M.Sc. Ingeniera Metalúrgica**

Co-Director

**EDWARD YESITH MENDOZA GONZALEZ
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
GRUPO DE INVESTIGACIÓN GIMAT
BUCARMANGA**

2009

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A la Profesora **LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ**, por su apoyo incondicional, su calidad humana y con su paciencia nos condujo para la realización exitosa de este trabajo de grado.

Al Ingeniero Electrónico **EDWAR YESITH MENDOZA**, quien con su gran dinamismo e ingenio contribuyo en el desarrollo de esta investigación.

Al Ingeniero Metalúrgico **JULIAN ORLANDO HERRERA ORTIZ**, gracias por el tiempo y paciencia que tuvo, por los conocimientos sobre la técnica de ultrasonido, nos ayudo y oriento en el desarrollo de esta investigación.

Y a todos los profesores de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, que de alguna forma contribuyeron en la realización de este trabajo de grado.

A nuestros amigos. Yurani Acosta, Edwin Macabeo, Edgar Farfán, Javier Flórez, Briyidth Riveros, William Sotelo, Leidy Olarte, Juan Carlos Amaya, Orlando Buitrago, Carlos Oviedo, Javier Gómez, Deyci Peña.

Muchas Gracias.

DEDICATORIA

A **Díos**, por darme la oportunidad de seguir luchando cada día por todos mis sueños.

A **mís padres**, por brindarme su amor, apoyo y confianza, por ser siempre la razón de mí vivir y por quienes seguiré saliendo adelante.

A **mís hermanos**, María Geovana porque en algunos momentos difíciles ha sido apoyo incondicional para mi familia y a Pípe, porque por él seguimos y seguiremos luchando, para que al igual que nosotras cuente con todo lo necesario para que pueda llegar a ser todo un profesional.

A **mís tíos y tías**, que siempre han estado ahí, cuando más los necesitamos y con los cuales conté durante esta etapa de mi vida.

A **mís amigos**, por su amistad, compañerismo y confianza.

ADRIANA CATALINA MOROS DURAN

DEDICATORIA

*Al Señor Dios Todo Poderoso, que en mi vida y durante mi formación en la
Universidad, ha sido mi Roca fuerte.*

*A mi Mamá que ha sido mi razón de ser y sobre todo el ser más hermoso que me ha regalado
Dios,*

*A mi Abuelita Linda, que ha sido mi fortaleza, gracias abuelita por estar ahí y apoyarme en
todos mis sueños*

*A mis hermanos Cipriana, Gloria y Edinson, quienes con su gran carisma que solo los
hermanos saben dar, han sido mi apoyo fundamental*

*A mi toda mi familia que ha creído en mí que a cada instante estuvieron ahí brindándome su
apoyo*

A todos mis amigos de verdad, quienes me han brindado su amistad y cariño

Elkin Pesid

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	4
1.1 OBJETIVOS GENERALES	4
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1 ENSAYO DE ULTRASONIDO	5
2.1.1 Ventajas de la técnica de ultrasonido	6
2.1.2 Desventajas de la técnica de ultrasonido	7
2.1.3 Técnicas de ensayo	7
2.1.4 Palpadores	9
2.2 TÉCNICA DE ULTRASONIDO POR INMERSIÓN	13
2.2.1 Palpadores de Inmersión	15
2.2.2 Uso de altas frecuencias	16
2.3 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE LOS SISTEMAS DE INSPECCIÓN ULTRASÓNICA PULSO-ECO	17
2.5 BLOQUES DE CALIBRACIÓN O REFERENCIA	21
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	24
3.2 ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	24
3.2.1 Montaje del ensayo y puesta a punto del sistema ultrasónico para la realización de la prueba por inmersión.	24
3.2.1.1. Entrenamiento para el manejo del Equipo Ultrasónico	25

3.2.1.2. Diseño y montaje del sistema de inmersión.....	26
3.2.1.3. Calibración del Equipo	28
3.2.1.4. Evaluación de las Características del Equipo	28
3.2.2 Selección del Palpador más adecuado.....	29
3.3 REALIZACIÓN DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO.	32
3.3.1 Determinación y registro de las variaciones del espesor de las escalerillas de acero calibradas, existentes en el laboratorio.	35
3.3.2 Representación de la Variación de Espesores de Piezas Planas (Escalerillas).	38
3.3.3 Estimación de la Pérdida de Espesores en la Superficie Externa de Probetas Tubulares.....	39
3.3.4 Representación de las Variaciones del Espesor en Piezas Tubulares.	40
3.3.6 Verificación de los Resultados.	42
3.4 INFORME FINAL.....	42
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
4.1 ESTABLECIMIENTOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	43
4.1.1 Montaje del ensayo y puesta a punto del sistema ultrasónico para la realización de la prueba por inmersión.	43
4.1.1.1 Diseño y montaje del sistema de inmersión.....	43
4.1.2 Selección del palpador.....	48
4.1.3 Evaluación de las Características del Equipo Ultrasónico	52
4.1.3.1 Linealidad y Límite Horizontal	52
4.1.3.2 Linealidad y Límite Vertical	54
4.1.3.3 Linealidad de control de Ganancia.....	55
4.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO	56
4.2.1 Determinación y registro de las variaciones de espesor de las escalerillas de acero calibradas.	56
4.2.1.1 Escalerilla Calibrada en Milímetros	57

4.2.1.2 Escalerilla Calibrada en Pulgadas	63
4.2.2 Representación de la variación de espesores de piezas planas (escalerillas).....	69
4.2.3 Estimación de la pérdida de espesores en la superficie externa de una probeta tubular.....	71
4.2.4 Representación de las variaciones del espesor en piezas tubulares...	75
4.2.5. Medición de la profundidad de los agujeros en la probeta tubular	77
4.2.6 Perfil para los agujeros de la probeta tubular.....	80
4.3 VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	81
5. CONCLUSIONES	84
6. RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evaluación de una placa por el ensayo de ultrasonido	6
Figura 2. Componentes de un palpador ultrasónico.....	10
Figura 3. Campo cercano y campo lejano.....	12
Figura 4. Ensayo de ultrasonido por inmersión	14
Figura 5. Palpadores de inmersión. a) Enfoque cilíndrico. b) Enfoque esférico o cónico.....	16
Figura 6. Bloque patrón. (a)Bloque patrón IIW ASTM E164-08 (b) Bloque Distancia amplitud (c) Escalerilla calibrada ASTM E797-05	21
Figura 7. Diagrama de la metodología experimental indicando fases y actividades desarrolladas.	23
Figura 8. Plano del Bloque Distancia-Amplitud	31
Figura 9. Representación esquemática del ensayo con la adquisición de datos en escalerillas para la visualización del perfil.....	39
Figura 10. Representación esquemática del ensayo con la adquisición de datos en probeta tubular para la visualización del perfil.	41
Figura 11. Esquema del Sistema de Inmersión.....	44
Figura 12. Representación de la relación 2:1 para la linealidad y limite vertical	97
Figura 13. Palpador sobre el bloque IIW justo en el barreno de 0.060”	98

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Equipo ultrasónico USM 35XS y sus accesorios.....	26
Fotografía 2. Sistema de inmersión.....	27
Fotografía 3. Bloque Distancia-Amplitud	31
Fotografía 4. (a). Escalerillas calibradas en milímetros. (b) Escalerillas calibradas en pulgadas	32
Fotografía 5. Probeta tipo tubular.....	34
Fotografía 6. Agujeros en la superficie de la probeta tubular	35
Fotografía 7. Caja soporte con regla milimetrada.....	36
Fotografía 8. Montaje experimental caja más escalerilla	36
Fotografía 9. Ubicación del haz central por medio de una aleta de acetato. 37	
Fotografía 10. Montaje experimental para estimación de la pérdida de espesor en la escalerilla	38
Fotografía 11. Tubería con la cinta en escala de centímetros.....	40
Fotografía 12. Montaje experimental para la tubería	41
Fotografía 13. Cuba de inmersión	46
Fotografía 14. Vistas principales del sistema de desplazamiento. (a) vista frontal. (b) Vista lateral.....	47
Fotografía 15. Tubo porta palpador	48
Fotografía 16. Establecimiento del punto de partida para la escalerilla de 10[mm]. (a) Palpador sobre el borde de la escalerilla. (b) Imagen del eco... 59	
Fotografía 17 Determinación del punto final de un escalón. (a) Palpador ubicado sobre el fin del escalón (b) Imagen del eco	59
Fotografía 18. Visualización del siguiente paso. (a) Palpador justo sobre el siguiente escalón. (b) Altura del eco sobre la pantalla.....	60

Fotografía 19. Establecimiento del punto de partida para la escalerilla de 0.5 [in]. (a) Palpador sobre el borde de la escalerilla. (b) Imagen del eco. ...	65
Fotografía 20. Determinación del punto final de un escalón. (a) Palpador ubicado sobre el fin del escalón (b) Imagen del eco	65
Fotografía 21. Visualización del siguiente paso. (a) Palpador justo sobre el siguiente escalón. (b) Altura del eco sobre la pantalla	66
Fotografía 22. Agujeros de la probeta tubular a evaluar.....	77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características más importantes de los palpadores no focalizados.	30
Tabla 2. Clase de acero según norma ASTM, junto con su composición química	33
Tabla 3. Características de los Palpadores de Inmersión	49
Tabla 4. Condiciones de Operación del Equipo Ultrasónico para de Curvas Distancia-Amplitud.	50
Tabla 5. Resultados de la linealidad horizontal y rangos de tolerancia.	53
Tabla 6. Resultados de linealidad vertical y los rangos de tolerancia.....	54
Tabla 7. Linealidad y Control de Amplitud	55
Tabla 8. Características principales de calibración.....	57
Tabla 9. Datos para el Escalón de 10[mm] de la Escalerilla Calibrada	60
Tabla 10. Datos para el Escalón de 8[mm] de la Escalerilla Calibrada	61
Tabla 11. Datos para el Escalón de 6[mm] de la Escalerilla Calibrada	61
Tabla 12. Datos para el Escalón de 4[mm] de la Escalerilla Calibrada	62
Tabla 13. Datos para el Escalón de 2[mm] de la Escalerilla Calibrada	62
Tabla 14. Características principales de calibración.....	64
Tabla 15. Datos para el Escalón de 0,5[in] de la Escalerilla Calibrada.....	66
Tabla 16. Datos para el Escalón de 0,4[in] de la Escalerilla Calibrada.....	67
Tabla 17. Datos para el Escalón de 0,3[in] de la Escalerilla Calibrada.....	67
Tabla 18. Datos para el Escalón de 0,2[in] de la Escalerilla Calibrada.....	68
Tabla 19. Datos para el Escalón de 0,1[in] de la Escalerilla Calibrada.....	68
Tabla 20. Características Principales de Calibración	72
Tabla 21. Datos para el Escalón de 6[mm] de la Probeta Tubular	73
Tabla 22. Datos para el Escalón de 4,75[mm] de la Probeta Tubular	73
Tabla 23. Datos para el Escalón de 3,5[mm] de la Probeta Tubular	74

Tabla 24. Datos para el Escalón de 2,5[mm] de la Probeta Tubular	74
Tabla 25. Datos para el Escalón de 1,0[mm] de la Probeta Tubular	75
Tabla 26. Datos para la superficie inicial sin agujero.....	78
Tabla 27 Datos del primer agujero D =.5 [mm].....	78
Tabla 28. Datos del segundo agujero D =3.4 [mm].	78
Tabla 29. Datos del tercer agujero D= 5[mm].....	79
Tabla 30. Datos del cuarto agujero D = 3.4[mm]	79
Tabla 31. Datos para la superficie final sin agujeros	79
Tabla 32. Comparación de las pérdidas de espesor obtenidas de la probeta tubular con respecto al plano de diseño	82
Tabla 33. Comparación de las lecturas de la profundidad de los agujeros con las obtenidas por ultrasonido.	82
Tabla 34 Código ANSI/ASME BPV, sección V, artículo 4, edición 2004.....	98

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PROPIEDADES ACUSTICAS DE LOS MATERIALES.....	90
ANEXO B. PLANOS DEL SISTEMA DE INMERSIÓN CON MOVIMIENTOS EN LOS EJES X, Y, Z.....	91
ANEXO C. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE LOS SISTEMAS DE INSPECCIÓN ULTRASÓNICA PULSO-ECO.....	94
ANEXO D. PLANOS DE LA PROBETA TUBULAR.....	99
ANEXO E. PROGRAMACIÓN EN MATLAB (MATRIZ LABORATORY) PARA LA VISUALIZACIÓN DE LOS PERFILES	101

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE ESPESOR EN LA SUPERFICIE EXTERNA DE UNA PIEZA TUBULAR*

AUTORES: ADRIANA CATALINA MOROS DURAN
ELKIN YESID TORRES BENÍTEZ****

PALABRAS CLAVES: Ultrasonido por Inmersión, Pérdidas de espesor, Acero al Carbón Palpador.

RESUMEN: Este trabajo presenta el estudio de la aplicación de la técnica de ultrasonido por inmersión para la estimación de la pérdida de espesor en la superficie externa de escalerillas calibradas ASTM E797-05 (en milímetro y en pulgadas) y de una probeta tipo tubular, utilizando un transductor no focalizado.

Primero se realizaron ensayos con cada una de las escalerillas calibradas, las cuales cuentan con cuatro pasos descendentes, realizándose un barrido desde el espesor mayor hasta el espesor menor de cada una de estas, con pasos de 1 o 2 milímetros registrándose así la posición de la columna de agua, la cual determinó la pérdida de espesor en la superficie externa de cada escalerilla. Con base en estos datos se realizó la representación de la variación de espesores para cada uno de los escalones que tiene las escalerillas.

Posteriormente, se realizó de la misma forma el barrido para la probeta tipo tubular, con pasos de 1 milímetro, registrándose en cada paso la posición de la columna de agua, la cual determinó la pérdida de espesor en la superficie externa de la probeta tubular. Al igual que con las escalerillas, se realizó la representación de la variación de espesores para cada uno de los escalones que tiene la probeta.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo comprobar que la técnica de ultrasonido por inmersión, permite determinar cambios de espesor de hasta 2[mm] con buena precisión en piezas planas (escalerillas), además es una herramienta adecuada en la determinación de las pérdidas de espesor en la superficie de las probetas tubulares, presentando menor error en la determinación de pérdida de espesores mayores al 20%.

* Trabajo de Grado (Investigación)

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales Universidad Industrial de Santander Director Luz Amparo Quintero Ortiz

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF ULTRASOUND TECHNIQUE FOR ESTIMATING LOSS EXTERNAL THICKNESS ON THE SURFACE OF A TUBULAR PIECE *

AUTHORS: ADRIANA CATALINA MOROS DURAN
 ELKIN YESID TORRES BENÍTEZ****

KEYWORD: Ultrasonic Immersion Testing, Search Unit, Carbon Iron Pipe, Lost of Thickness,

Summary: This paper presents a study of the implementation of immersion ultrasound technique to estimate the lost of thickness on the outer surface of ladders calibrated ASTM E797-05 (in mm and inches) and a tubular cylinder, using a Unfocused transducer.

First tests were performed with each of the ladders calibrated, which has four steps down, carrying out a sweep from the greater thickness to the thickness under each of these, in steps of 1 or 2 mm and recorded the position of the water column, which determined the lost of thickness on the outer surface of each ladder. Based on these data was made representing the thickness variation for each of the steps that has the ladder.

Later, there were just as sweeping for the tubular specimen, with steps of 1 mm, recorded at each step the position of the water column, which determined the lost of thickness on the outer surface of the specimen tube. As with the stairs, there was representation of the variation in thickness for each of the steps that have the probe.

According to the results, it was found that the ultrasonic immersion technique, to determine changes in thickness up to 2 [mm] with good precision flat parts (ladders), also is a valuable tool in determining the losses thickness on the surface of the tubular specimens, presenting minor error in the determination of loss of thickness greater than 20%.

* Graduate Proyect (Investigation)

** Faculty of Physical-Chemestry Engineering-Metallurgical School-Universidad Industrial de Santander Director: Luz Amparo Quintero Ortiz

INTRODUCCIÓN

La técnica de ultrasonido por inmersión permite entre otras la evaluación de partes con geometrías complejas como es el caso de la industria automotriz, la inspección automatizada de piezas como es el caso de la medición de espesores automatizada de tanques de almacenamiento, la estimación de la pérdida de espesor en superficies externas (tuberías) como el caso de la industria del petróleo. Con lo cual se evita demoras en la producción paradas inesperadas, daños severos al medio ambiente y pérdidas de vidas humanas, entre otras. Esto contribuye así a la eficiencia en los procesos, disminución de costos y riesgos. Para efectos de esta investigación se tendrá en cuenta la pérdida de espesor en superficies externas de tuberías.

El transporte de fluidos en la industria del petróleo hace necesario el uso de mecanismos que permitan su conducción de un lugar a otro. Hasta el momento la mejor opción ha sido la utilización de tuberías, porque se encuentran en continuo servicio y son el método más seguro según estadísticas de la DOT "Department of Transportation" de los Estados Unidos, proporcionando bajos costos en su implementación, en paralelo a otros métodos.

En Colombia y el mundo se ponen en funcionamiento continuamente cientos de tramos de tubería con el fin de suplir las necesidades de las industrias que dependen de los derivados del petróleo. El empleo de este tipo de dispositivos de conducción cuenta con grandes ventajas que ponen de manifiesto su uso, sin embargo, estas tuberías viajan a nivel del suelo y en muchos casos enterradas, enfrentándose así a factores que ponen en riesgo su vida útil.

Los daños ocasionados en las tuberías generan altos costos económicos, especialmente cuando están sometidos a presión. Las pérdidas de espesor por debajo del límite permitido de diseño en este tipo de elementos pueden generar explosiones, sin contar con la pérdida total del sistema, que en muchos casos puede provocar pérdida de vidas humanas y daños severos al medio ambiente.

Durante los últimos años fueron desarrolladas, muchas técnicas para investigar estos problemas. Cada técnica se especializa en detectar y calificar determinados mecanismos de daños y son regularmente usadas en diferentes condiciones, considerando que cada tipo de defecto y cada material pueden tener una técnica asociada.

La inspección de tuberías puede realizarse usando técnicas de ensayos no destructivos para detectar la pérdida de espesor del material debidas al servicio con el fin de evitar daños importantes, contribuyendo en la reducción de costos de mantenimiento en oleoductos o gasoducto y disminuyendo los riesgos a los que están expuestos la sociedad y el medio ambiente.

Las pérdidas de espesor afectan significativamente la eficiencia de las tuberías, registrando las bajas condiciones de operación de las mismas, haciendo necesario en algunos casos la reparación o sustitución de ciertos tramos, razón por la cual se hace indispensable su evaluación de manera continua y precisa.

Una técnica no destructiva empleada para la evaluación de espesores en tuberías es el ultrasonido. La aplicación de esta puede hacerse de diferentes maneras, una de estas es por inmersión, la cual consiste en utilizar el agua como medio de acoplamiento acústico entre el transductor y la pieza a examinar, que a diferencia de las técnicas tradicionales de ultrasonido por

contacto, el transductor y la pieza son sumergidos total o parcialmente en un tanque con agua de tal manera que no se requiere tener contacto entre ellos, ya que la onda de ultrasonido viaja a través del agua hasta penetrar en la pieza. Una de las ventajas principales que tiene esta técnica es que permite el uso de cristales mucho más finos y de alta frecuencia logrando mayor sensibilidad en la realización de las pruebas.

Con el desarrollo de este proyecto se busca evaluar la posibilidad de implementar el ensayo no destructivo de ultrasonido, utilizando la técnica de inmersión, con el fin de estimar la pérdida de espesor en la superficie externas de piezas tubulares, contribuyendo al análisis de su integridad.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVOS GENERALES

Aplicar la técnica de ultrasonido por inmersión para estimar la pérdida de espesor en la superficie externa de una pieza tubular.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar los cambios de espesor de escalerillas calibradas utilizando la técnica ultrasónica de inmersión.

Representar gráficamente la variación del espesor contra la distancia longitudinal de las piezas analizadas utilizando el Software MatLab.

Valorar la aplicación de la técnica de ultrasonido por inmersión para la estimación y representación de las pérdidas de espesor en piezas tubulares.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 ENSAYO DE ULTRASONIDO

La técnica de ultrasonido, es un método dentro de los ensayos no destructivos, en el cual una onda sónica de alta frecuencia es introducida en el interior de un material, para encontrar defectos en el interior o en la superficie.

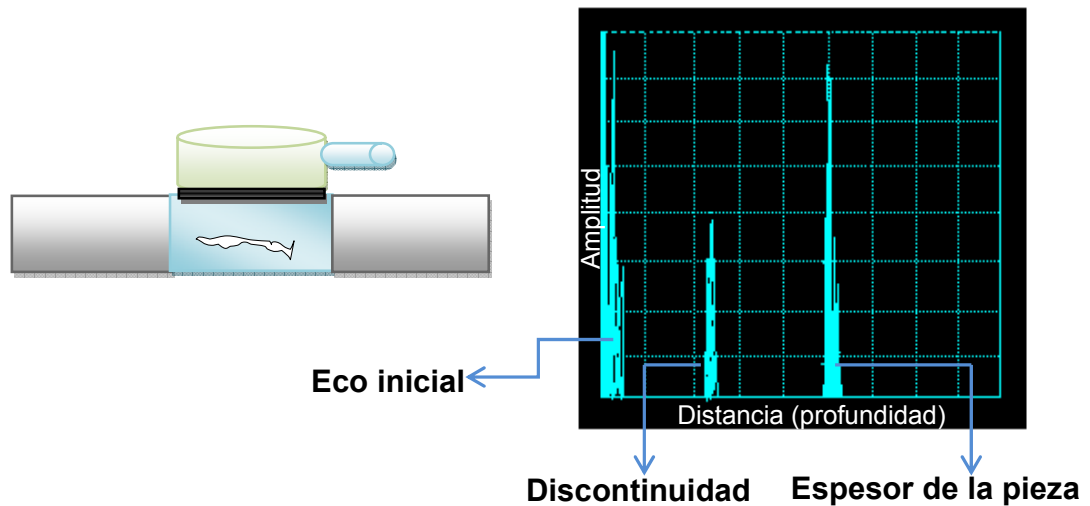
El ultrasonido se usa principalmente en la valoración e integridad de los materiales. Esta aplicación está dada para localizar y caracterizar discontinuidades internas y superficiales. También se usa en la medición de espesores de material y pérdida de espesor debida a la corrosión y en muchos casos para determinar propiedades físicas de los materiales tales: como la estructura, el tamaño de grano y las constantes elásticas.

En muchas de las inspecciones realizadas por ultrasonido se utilizan frecuencias comprendidas entre 1 y 25[MHz], por encima del rango de percepción humana, que se encuentra en un rango de 20[Hz] a 20[KHz].

Cuando un haz ultrasónico incide sobre algún defecto, este se refleja indicando la presencia de una discontinuidad, así defectos tales como grietas, laminaciones, cavidades de contracción, escamas, poros y otras discontinuidades pueden ser detectadas por la técnica de ultrasonido, ya que actúan como una interfase metal-gas, que pueden ser fácilmente detectadas por las ondas ultrasónicas. Las inclusiones y otras heterogeneidades en el metal pueden ser inspeccionadas y detectadas (aunque ellas no actúen como una interfaz metal-gas), causando una reflexión parcial o una dispersión en las ondas ultrasónicas. En la figura 1 se

presenta la aplicación del ensayo de ultrasonido en la detección de defectos internos en una pieza.

Figura 1. Evaluación de una placa por el ensayo de ultrasonido



2.1.1 Ventajas de la técnica de ultrasonido

Las principales ventajas de la técnica de ultrasonido comparada con otras técnicas no destructivas son las siguientes:

- Mayor poder de penetración, la cual permite detectar discontinuidades en el interior de la pieza.
- Alta sensibilidad, permitiendo la detección de discontinuidades extremadamente pequeñas.
- Mayor precisión que otros métodos de ensayos no destructivos en la determinación de las discontinuidades internas, estimando su tamaño, características, su orientación y forma.
- Utiliza un equipo electrónico, el cual provee lecturas de las indicaciones al instante. Esto hace que este método sea interpretado

rápidamente, además permite guardar los resultados de los ensayos que pueden utilizarse más adelante como una futura referencia en una inspección.

- El instrumento ultrasónico es portátil.

2.1.2 Desventajas de la técnica de ultrasonido

Como desventajas de la técnica de ultrasonido se tienen las siguientes:

- Para efectuar los ensayos ultrasónicos se requiere de personal que conozca la técnica a fondo.
- Piezas que se caracterizan por ser: muy rugosas, de geometría compleja, delgadas o no ser homogéneas son muy difícil de evaluar.
- Discontinuidades que se encuentran localizadas cercana a la superficie son difíciles de detectar.
- Esta técnica necesita un medio acoplante, con el fin de evitar la pérdida de energía de las ondas ultrasónicas que viajan a la pieza a ser inspeccionada.
- Se hace necesario la utilización de bloques de referencia, en primer lugar para calibración del equipo de ultrasonido y en segundo lugar para caracterizar las discontinuidades.

2.1.3 Técnicas de ensayo

Dentro del campo del ultrasonido existen diferentes técnicas que permiten evaluar los materiales, la elección de alguna de ellas dependerá de las características geométricas, estructurales de la pieza, su accesibilidad y los defectos más probables a detectar en la misma. Las técnicas de ensayos

ultrasónicos se agrupan en tres tipos básicos. Pulso –Eco o Reflexión, Transmisión y Resonancia; que a su vez pueden adoptar las variantes de Contacto directo e inmersión. A continuación se describirán brevemente de las técnicas más importantes

Resonancia¹: Utiliza un haz continuo de ondas ultrasónicas, enviado desde unas de las superficies de la pieza. Se varía la frecuencia hasta hallar la frecuencia de resonancia propia del espesor del espécimen. Cuando esto sucede, el material vibra en resonancia con el oscilador y esto implica un incremento en la energía recibida por el transductor. Este incremento de energía puede ser medido por instrumento apropiado en un osciloscopio. La resonancia ocurre cuando el espesor del espécimen es un número entero de veces la mitad de la longitud de onda.

Transmisión²: Esta técnica consiste en la utilización de dos palpadores, donde uno actúa como receptor y el otro como transmisor y se ubican en cada lado del objeto que va a revisarse. Entre sus principales ventajas son: mejor capacidad para la detección de defectos cercanos a la superficie, mayor capacidad para inspeccionar piezas de gran espesor (menor grado de atenuación). Entre sus limitaciones están: Los defectos no pueden ser localizados en profundidad, es necesario el acceso a ambos extremos de la pieza.

Reflexión o Pulso-eco³: Esta técnica está basada en la reflexión del haz ultrasónico. La energía de excitación ultrasónica es aplicada al cristal en

¹ MANUAL DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS. Universidad Nacional, Bogotá, Octubre 2002. Pág. 26.

² INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO. Curso Ultrasonido Nivel II. ECOPETROL. 1996. 3p.

³ Ibíd., Pág.28.

forma de pulsos cortos, repetidos con una frecuencia que permite al sistema detectar entre pulso y pulso la energía ultrasónica reflejada en cualquier discontinuidad existente en el interior del material o en superficies límite mismo.

Dependiendo del modo de acoplamiento utilizado para los ensayos, se identifican de dos modos de operación: por contacto directo y por inmersión.

Contacto directo: En este método el palpador está en contacto con la pieza a inspeccionar, utilizando una delgada capa de líquido como medio acoplamiento. En algunos palpadores se utilizan lentes acústicos focalizadores o cuñas plásticas, superficies protectoras o de desgaste y membranas flexibles, montadas sobre la superficie del cristal. En esta técnica, el impulso inicial y la reflexión corresponde a la superficie de entrada se presentan sobrepuestas.

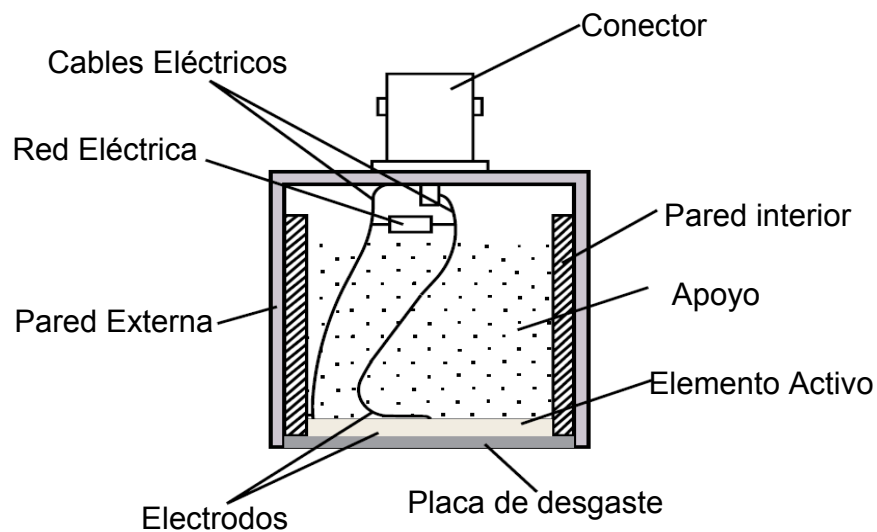
Inmersión: Esta técnica utiliza un transductor hermético a prueba de agua, colocado a cierta distancia de la pieza a inspeccionar y donde las ondas ultrasónicas se transmiten al material a través del agua, permitiendo el uso de cristales mucho más finos, de alta frecuencia. La distancia del agua queda representada en la pantalla del equipo como el espacio entre el pulso inicial y la reflexión proveniente de la superficie de entrada.

2.1.4 Palpadores

El efecto piezoeléctrico constituye la base del ensayo ultrasónico de materiales y se refiere al fenómeno mediante el cual cierto tipos de cristales producen una corriente eléctrica cuando se deforman y viceversa, se deforman o vibran cuando se les aplica una corriente eléctrica. De manera

que los cristales piezoeléctricos constituyen los llamados “palpadores”, transforman la energía eléctrica en mecánica y energía mecánica en eléctrica. Este principio se usa para efectuar los ensayos de ultrasonido. En la figura 2 se muestra la constitución de un palpador.

Figura 2. Componentes de un palpador ultrasónico



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

Características de los palpadores

La calidad de un palpador es determinada por sus características específicas tales como: la frecuencia, campo cercano y campo lejano, divergencia del haz.

La frecuencia: Un cristal convencional de ultrasonido, no vibra a una determinada y única frecuencia al ser activado por un impulso eléctrico, sino por el contrario, vibrará en un espectro de frecuencias. La frecuencia asignada al palpador, es la central o de control y el ancho de banda de la frecuencia de vibración, puede variar el 100% de la frecuencia asignada, es decir para un palpador de 10[MHz], puede estar entre 4[MHz] y 14[MHz]

A continuación se analizan las características del campo ultrasónico, (zona muerta, campo cercano y campo lejano), teniendo en cuenta las características del cristal utilizado (diámetro y frecuencia).

Geometría del haz ultrasónico

La figura 3, muestra esquemáticamente la geometría de un haz ultrasónico, la cual depende fundamentalmente del tamaño y la frecuencia del cristal, donde es posible distinguir que el mismo está compuesto por dos zonas claramente definidas: campo cercano y campo lejano.

El campo cercano o zona de Fresnell, es la región del haz próxima al cristal, dentro del cual ubicamos la “Zona muerta”, recibe 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 profundidad⁴. En el campo cercano, la presión ejercida sobre las partículas varía en forma impredecible de un punto a otro. La longitud del campo cercano se puede calcular mediante la ecuación 2.1.

$$N = D^2/4c \quad \text{ó} \quad N = D^2/4\lambda \quad \text{Ecuación 2.1}$$

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

N = Longitud del campo cercano c = Velocidad del sonido en el material

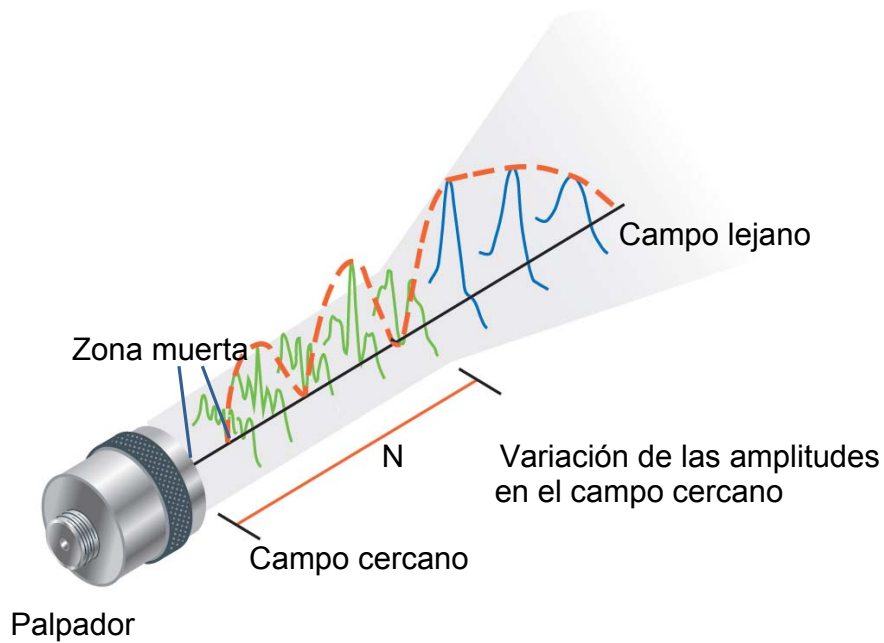
⁴ FORERO, Edwin Francisco. Diseño de un prototipo para la medición de espesores usando ultrasonido. Trabajo de grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2005, 139p.

D = Diámetro del palpador

λ = Longitud de onda f =

Frecuencia

Figura 3. Campo cercano y campo lejano



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

En el punto N se obtiene la máxima presión del haz ultrasónico y constituye el final del campo cercano y comienzo del denominado "campo lejano o zona de Fraunhofer", donde comienza a transmitirse el haz bajo un patrón de presión estabilizado, donde se obtiene la máxima reflexión de una discontinuidad 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.

La divergencia del haz ocasiona la atenuación o disminución de la energía del haz ultrasónico, de una manera inversamente proporcional a la distancia del recorrido y la magnitud viene dado por la siguiente ecuación 2.2.

$$\text{Sen } \alpha = 1,22 (\lambda / D) \text{ Ecuación 2.2}$$

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo. Curso Ultrasonido Nivel II. Ecopetrol. 1996.

α : ángulo de divergencia D: diámetro efectivo del cristal.
 λ : longitud de onda.

2.2 TÉCNICA DE ULTRASONIDO POR INMERSIÓN⁵

La técnica de ultrasonido por inmersión consiste en utilizar agua como medio de acople acústico entre el transductor y la pieza a examinar, que a diferencia de la técnica tradicional de ultrasonido por contacto, el transductor y la pieza son sumergidos recipiente o parcialmente en un tanque con agua de tal manera que no se requiere tener contacto entre ellos, ya que la onda de ultrasonido viaja a través del agua hasta penetrar en la pieza⁶. En la figura 4 se muestra esquemáticamente el ensayo de ultrasonido por inmersión.

Llevar a cabo la inspección por inmersión tiene grandes ventajas, una de la más importante es el continuo acoplamiento entre el palpador y la pieza a inspeccionar, permitiendo así que no exista desgaste del palpador por fricción, pudiéndose emplear cristales más finos de alta frecuencia. Otras ventajas pueden ser; la versatilidad y adaptabilidad del equipo, en cuanto al barrido de la inspección es rápida y el registro de datos es confiable y

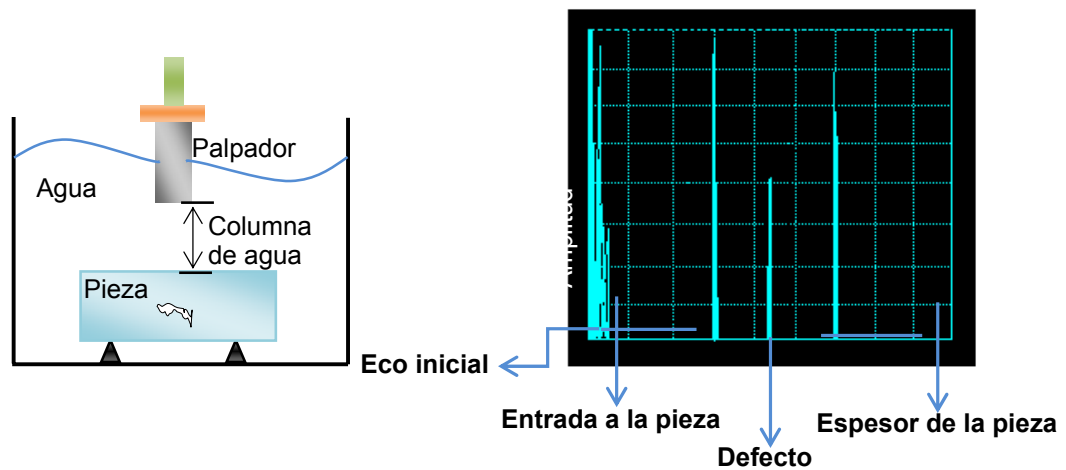
⁵ ECHEVARRÍA, Ricardo. Ultrasonido. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos no Destructivos. 2001. 12p

⁶ KRAUTKRAMER AND KRAUTKRAMER, Ultrasonic testing of materials.

exacto, además se pueden inspeccionar piezas de diferentes tamaños y formas obteniendo una mejor exactitud en los resultados.

Por otra parte esta técnica tiene desventajas de las cuales, la principal es cuando las burbujas de aire se adhieren a la pieza, por lo cual debe adicionarse al agua agentes humectantes. Otras desventajas podría ser el sumergir la pieza en el agua, pues puede ser perjudicial para el material, además los equipos utilizados pueden ser grandes y de alto costo.

Figura 4. Ensayo de ultrasonido por inmersión



El cálculo de la columna de agua: Un aspecto importante de destacar, es que la velocidad del sonido en agua es aproximadamente 1/4 de la velocidad del aluminio o acero, de manera que 1[in] de agua aparecerá en la pantalla del equipo ultrasónico en la misma distancia en tiempo que 4[in] de acero. Por lo que como regla general, para la distancia de agua o entre el palpador y la pieza se utiliza 1[in] de distancia de agua por cada 4[in] de espesor del metal. Esto se expresa mediante la ecuación 2.3.

$$D = (6.35) + (V_A/V_M) E \text{ en [mm]} \quad \text{ó} \quad D = (1/4) + (V_A/V_M) E \text{ [in]} \text{ Ecuación 2.3}$$

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo. Curso Ultrasonido Nivel II. Ecopetrol. 1996.

D = Distancia del agua en [mm]

(6.35) = Constante de la ecuación en [mm]

(V_A/V_M) = Relación de la velocidad del agua y la del metal de prueba

E = Espesor del metal en [mm]

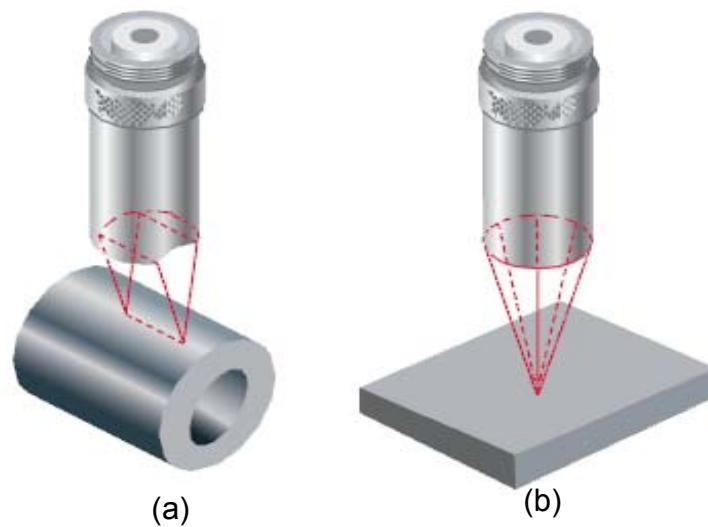
2.2.1 Palpadores de Inmersión

Los palpadores utilizados en el ensayo de inmersión tienen la mayor eficiencia en el agua, son aptos para evaluar partes con geometrías irregulares, son utilizados en pruebas automatizadas.

Estos transductores ofrecen tres ventajas sobre los transductores de contacto, una de ellas es el acoplamiento uniforme el cual permite reducir las variaciones en la sensibilidad, otra es la reducción del tiempo de barrido gracias al barrido automático, y por último el uso de palpadores focalizados que incrementan la resolución y además la sensibilidad para reflectores pequeños.

Esta clase de palpadores están disponibles en tres configuraciones diferentes: no focalizados (planos), focalizados esféricos (puntuales), y focalizados cilíndricos (línea). Los primeros son utilizados en aplicaciones generales o para inspección de materiales de espesor grueso, los segundos son usados para mejorar la sensibilidad para discontinuidades pequeñas, y los últimos son utilizados para la inspección de tubería o barras.

Figura 5. Palpadores de inmersión. a) Enfoque cilíndrico. b) Enfoque esférico o cónico.



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

2.2.2 Uso de altas frecuencias

El uso de altas frecuencias ofrece grandes ventajas en el ensayo de ultrasonido por inmersión.

Emplear bajas frecuencias o grandes longitudes onda, permiten que el haz ultrasónico penetre el material, logrando detectar discontinuidades en el interior, pero esta alta penetración causa una pérdida en la resolución en la superficie dificultando la detección de pequeñas fallas. Para recompensar esta pérdida de resolución en la superficie se recomienda inspeccionar la pieza por sus dos caras. Por ejemplo un palpador en un rango de frecuencia

de 2.25 [MHz], no puede revelar discontinuidades menores a 1[in] que se encuentran sobre la superficie.

Un palpador de 5[MHz] puede revelar discontinuidades de 1/2[in]. Uno de 15[MHz], puede mostrar discontinuidades de 1/8[in]; los de 25[MHz], permiten observar defectos de aproximadamente 1/10[in], que se encuentran localizados en la superficie.

Cuando se usan palpadores de altas frecuencias y pulso de corta duración se pueden identificar claramente pequeñas discontinuidades que se encuentran paralelamente a la superficie.

2.3 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE LOS SISTEMAS DE INSPECCIÓN ULTRASÓNICA PULSO-ECO

Los sistemas de inspección ultrasónica, que comprenden: el instrumento ultrasónicos de pulso-eco, palpadores, cables de conexión, son susceptibles de sufrir averías y/o alteraciones funcionales provocadas por golpes, la humedad del ambiente y el polvo. Estas alteraciones funcionales repercuten directamente en la caracterización y evaluación de las discontinuidades así como en la medición de espesores. Las normas de uso común (ASME⁷, AWS⁸, ASTM⁹) establecen límites de tolerancias máximas de desviación en ciertos parámetros específicos y mencionan la periodicidad con la que se deben verificar.

⁷ CÓDIGO ANSI/ASME BPV, SECCIÓN V, ARTÍCULO 5 EDICCIÓN 2004

⁸ CÓDIGO ANSI/AWS D1.1, EDICIÓN 2000

⁹ ASTM E-317-6a "STANDAR PRACTICE FOR EVALUATING PERFORMACE CHARACTERISTIC OF ULTRASONIC PULSE-ECHO TESTING INSTRUMENTS AND SYSTEMS WITHOUT THE USE OF ELECTRONIC MEASUREMENT INSTRUMENTS"

Con el fin corroborar que el sistema ultrasónico opere en condiciones óptimas se deben realizar ensayos bajo normas tales como: ensayo de linealidad y límite horizontal, linealidad y límite vertical y linealidad de control de ganancia.

Linealidad y Límite Horizontal

La linealidad horizontal, representa una medida de la desviación o diferencia que existe entre la distancia real recorrida por el haz ultrasónico y la indicada en la pantalla del equipo. La falta de linealidad afecta la exactitud de las medidas de espesores de pared, la determinación de la profundidad de una discontinuidad y las distancias de recorrido de la onda ultrasónica. El factor de desviación se expresa generalmente en milímetros.

Tolerancia Máxima de Desviación Permitida para la Linealidad y Límite Horizontal.

La norma ASTM E317-06a establece que la localización de la inflexión de cada trazo debe estar por debajo del 5%; para este caso se asumió un intervalo $\pm 2\%$ del ancho de la pantalla.

El límite horizontal y el rango lineal idealmente deben estar comprendidos en el 100% de la escala horizontal de la pantalla.

Linealidad y Límite Vertical

La linealidad vertical, describe una medida de la proporcionalidad que existe entre la altura de la señal de entrada y la altura de la indicación presentada en la pantalla del equipo ultrasónico. La falta de linealidad afecta la validez del tamaño de las discontinuidades cuando éstos se basan en comparación

de la amplitud de las indicaciones. La desviación se expresa generalmente en porcentaje o directamente en decibeles (dB).

La norma ASTM E-317-06a contempla dos métodos para la evaluación de la linealidad y límite vertical (método A y método B). El método A. describe la técnica de relación entre dos señales, la cual sirve para evaluar la linealidad de los circuitos del instrumento, entre los controles de ganancia usados para amplitudes y la presentación de las señales en la pantalla. El método B. considera otra técnica, llamada atenuador de entrada/salida, la cual sirve para evaluar el sistema completo de receptor /señales en pantalla a una ganancia constante, establecida inicialmente por el panel de controles. Para efectos de esta investigación se usará el método A de la norma ASTM-317, el cual se describe en el anexo C.

Tolerancia Máxima de desviación permitida para la Linealidad y Límite Vertical

El Código ANSI/ASME BVP, sección V, artículo 5, edición 2004, establece que: las lecturas de la indicación H_B deben ser el 50% de la indicación H_A con una tolerancia de $\pm 5\%$ de la altura total de la pantalla. Esta tolerancia es aplicable para datos tomados en forma tabular.

La norma ASTM E317-06a, establece el 6% en los extremos y el 1% cuando la señal cumple la relación 2:1.

Para datos presentados en forma gráfica, será inaceptable un instrumento que proporcione una lectura tabular H_B fuera de las líneas límite.

El límite vertical y el rango lineal, idealmente debe estar comprendido por el 100% de la escala vertical de la pantalla. El código ANSI/ASME, sección V,

artículo 5, edición 2004, establece un rango mínimo de 20 a 80% de altura de la pantalla.

Linealidad de Control de Ganancia

Es una medida de la precisión del control de ganancia con respecto a la pantalla calibrada del equipo ultrasónico. La falta de la linealidad en la ganancia afecta directamente las estimaciones del tamaño de las discontinuidades, cuando estas se basan en comparaciones electrónicas con señales de referencia.

Tolerancia Máxima de desviación permitida para la Linealidad y Control de la Amplitud

El código ANSI/ASME BPV, sección V, artículo 4, edición 2004, y la norma ASTM E317-06a establece que el instrumento ultrasónico debe utilizar un control de amplitud con una exactitud en su rango útil de $\pm 20\%$ de la relación de amplitud nominal para permitir la medición de indicación más allá del rango lineal de la presentación vertical de la pantalla.

2.4 SISTEMAS DE INMERSIÓN

Las instalaciones para realizar la inspección por este método, cubren un margen amplio de modelos desde las instalaciones para operar manualmente a instalaciones semiautomáticas y automáticas. En este tipo de técnica es indispensable el uso de tanques, puentes y manipuladores.

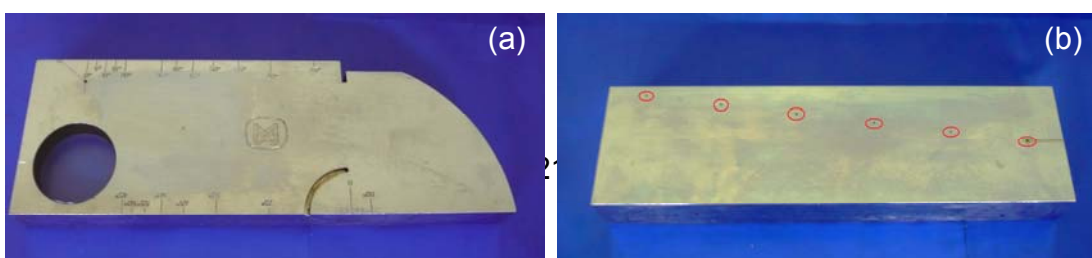
Los tanques utilizados deben ser lo suficientemente amplios para sumergir las piezas a inspeccionar. El acoplante utilizado (agua) debe estar desairada y contener un aditivo que libere las tensiones superficiales y facilite el humedecimiento completo de la superficie de inspección garantizando así un acople uniforme.

2.5 BLOQUES DE CALIBRACIÓN O REFERENCIA

Uno de las grandes inconvenientes del ultrasonido es la interpretación de las indicaciones ultrasónicas provenientes de las discontinuidades internas en el material. Los bloques o patrones de calibración son de gran ayuda en la interpretación de dichas indicaciones y cumplen dos propósitos fundamentales, en primer lugar permiten la calibración, estandarización y chequeo del instrumento periódicamente y en segundo lugar permite evaluar de forma comparativa las indicaciones obtenidas de la pieza de ensayo.

Los patrones de referencia son elaborados en materiales debidamente seleccionados para garantizar su sanidad interna y que satisfagan los requisitos de atenuación, tamaño de grano y tratamiento térmico. Las discontinuidades artificiales son maquinadas muy cuidadosamente para cumplir tolerancias muy estrechas. Entre ellas se encuentran los agujeros de fondo plano, barrenos laterales y muescas. En la figura 6 se muestran imágenes de algunos de estos patrones.

Figura 6. Bloque patrón. (a)Bloque patrón IIW ASTM E164-08 (b) Bloque Distancia amplitud (c) Escalerilla calibrada ASTM E797-05

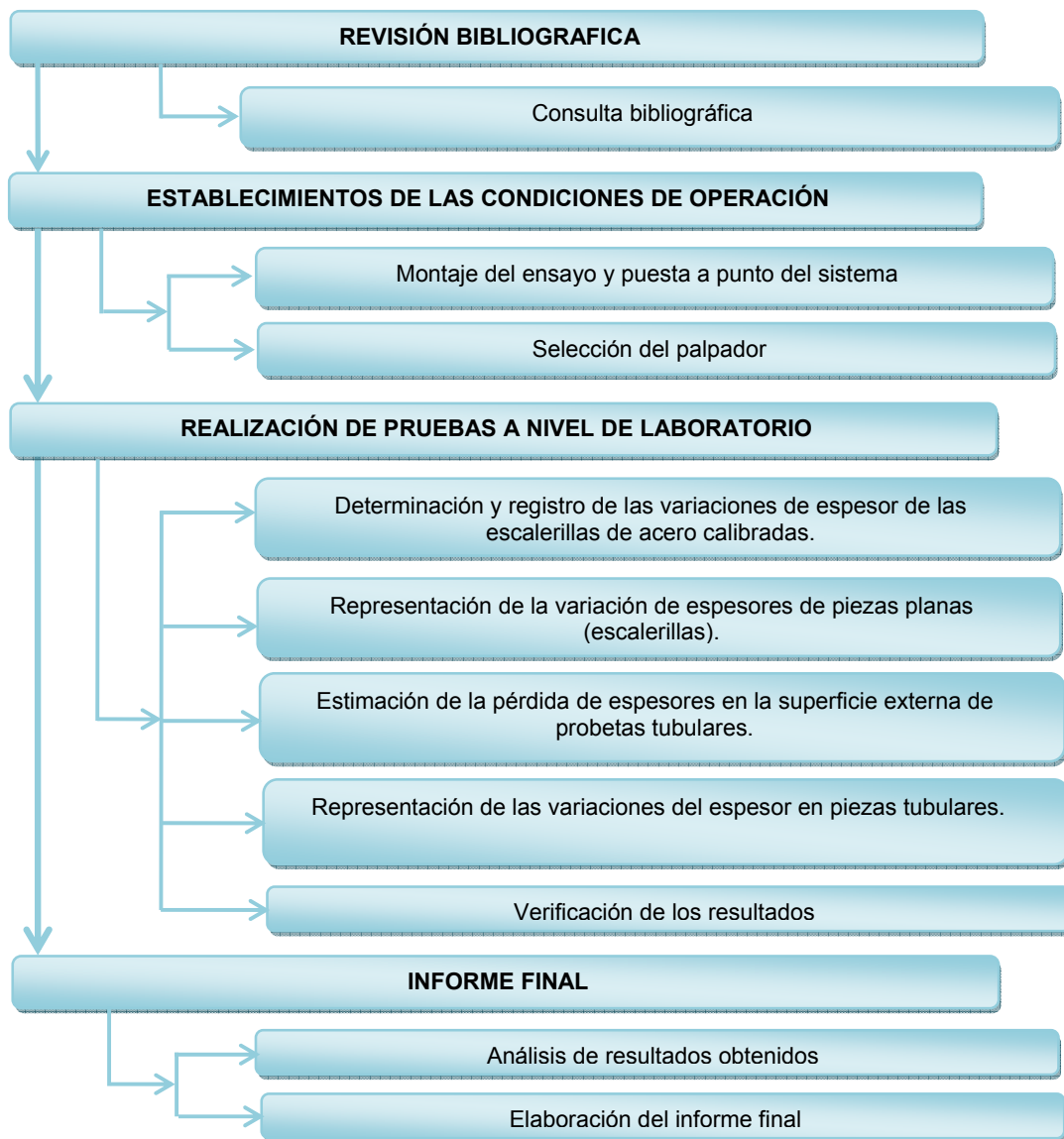




3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 7 se observa un diagrama que reúne las fases y actividades que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del presente trabajo de grado.

Figura 7.Diagrama de la metodología experimental indicando fases y actividades desarrolladas.



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

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En primera instancia se realizó la recopilación y análisis de información acerca de la técnica de ultrasonido, fundamentos básicos del ensayo, generación de las ondas ultrasónicas, el equipo ultrasónico, técnicas y procedimientos del ensayo.

Con el apoyo de la base de datos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander fue posible la adquisición de códigos, normas, trabajos de grado y artículos científicos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de la presente investigación.

3.2 ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

En esta sección se presenta el procedimiento seguido para el diseño y montaje del sistema de inmersión y la puesta a punto del sistema ultrasónico, así como el proceso de selección del palpador más adecuado.

3.2.1 Montaje del ensayo y puesta a punto del sistema ultrasónico para la realización de la prueba por inmersión.

Una vez recopilada y analizada la información bibliográfica se procedió hacer el montaje apropiado para el ensayo, para lo cual fue necesario realizar previamente las siguientes etapas: entrenamiento para el manejo del equipo ultrasónico "Krautkramer USM 35XS", diseño y montaje del sistema de

inmersión, (incluyendo la cuba de inmersión y un el mecanismo de desplazamiento del palpador).

3.2.1.1. Entrenamiento para el manejo del Equipo Ultrasónico

El laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con un equipo ultrasónico “USM 35XS” marca KrautKramer de fabricación Alemana, el cual se empleó para la elaboración de la presente investigación. Este equipo opera en un intervalo de frecuencias de 0.5 a 20 [MHz] y en una escala de calibración en la base del tiempo entre 0.5 a 1400 [mm] en acero y está diseñado tanto para la aplicación de piezas de gran tamaño como para la medición en alta resolución. Además, cuenta con un puerto RS 232, el cual sirve para el intercambio bidireccional de datos con un computador.

Como primera medida se realizó un entrenamiento en el conocimiento y operación del equipo ultrasónico con sus respectivos accesorios. Durante esta primera etapa se conocieron cada una de las funciones con las cuales cuenta el equipo, que fueron fundamentales en el desarrollo de los ensayos.

Los primeros ensayos efectuados con el USM 35XS se realizaron aplicando la técnica de ultrasonido por contacto, estas pruebas se hicieron con el propósito de fortalecer el manejo de cada uno de las funciones del mismo.

Una vez comprendido el funcionamiento se procedió a aplicarlo a la técnica de inmersión. Este proceso se llevó a cabo durante un periodo de tres meses y se tuvo como base el manual técnico e instrucciones de uso del equipo. En la fotografía 1, se muestra el equipo ultrasónico USM 35XS, con sus respectivos accesorios.

Fotografía 1. Equipo ultrasónico USM 35XS y sus accesorios.



3.2.1.2. Diseño y montaje del sistema de inmersión

Simultáneamente con el entrenamiento del equipo se llevó a cabo el diseño y montaje del sistema de inmersión, con el apoyo de un diseñador industrial.

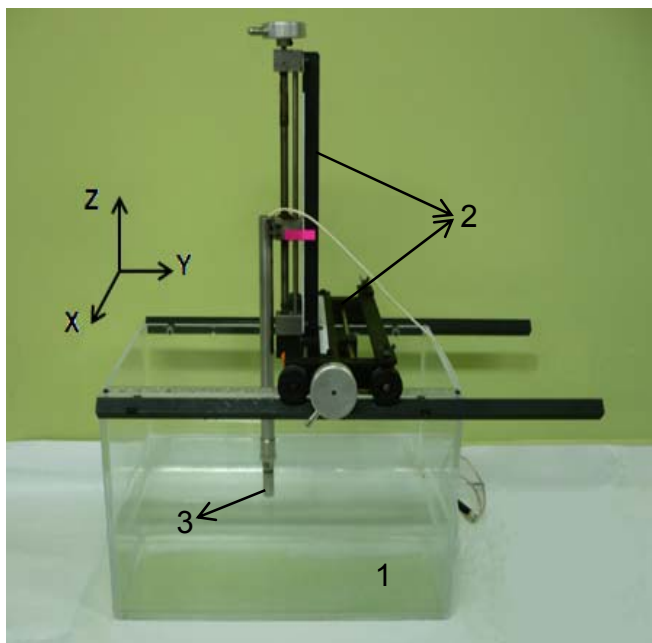
Se diseñó una cuba de inmersión teniendo en cuenta el tamaño de las piezas a ensayar y el sistema de desplazamiento en sus tres ejes (X, Y, Z) del palpador. Para lo anterior se tuvo en cuenta algunas recomendaciones establecidas en la norma ASTM E1001-06y otras referencias bibliográficas.^{10,11}

¹⁰ RODULFO, R., AMEZOLA, R. "Implantación de Técnicas de Ultrasonido por Inmersión en la Inspección de Ensamblajes Automotrices", Simposio de Metrología, Octubre de 2006, Ciudad de México.

¹¹ BARRERA 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.

En la fotografía 2, se presenta el sistema de inmersión, el cual está compuesto por una cuba de dimensiones 50 [cm] de ancho, 30 [cm] de alto y [31] cm de profundidad y el sistema de desplazamiento del palpador, conformado por un brazo mecánico con movimiento manual. Detalles de este sistema se presentan en el capítulo de resultados y análisis, los planos del sistema de inmersión se presentan en el anexo B.

Fotografía 2. Sistema de inmersión.



1 Cuba de Inmersión

2 Sistema de desplazamiento (Brazo mecánico, carro y rieles)

3 Base para el palpador

Es importante aclarar que fue necesario realizar varios ajustes al montaje hasta lograr un desplazamiento uniforme y preciso para llevar a cabo las pruebas.

Para poner a punto el sistema de inmersión fue indispensable tener en cuenta principalmente el desplazamiento en los ejes Y y Z. Con el eje Z se aseguraba la perpendicularidad del brazo mecánico que conducía el palpador, esto garantizaba que no hubiese un cambio del modo de vibración de la onda y así fuese posible la obtención de resultados con un mayor grado de confiabilidad. Con el eje Y se ejercía el control de los movimientos del carruaje. Detalles de la puesta a punto del sistema se presentan en el capítulo 4.

3.2.1.3. Calibración del Equipo

En cuanto a la calibración del equipo, se realizó siguiendo los procedimientos establecidos en el manual de operación del mismo, esta se llevó a cabo por el modo de inmersión con cada uno de los palpadores existentes en el laboratorio, para cada una de las piezas analizadas, teniendo en cuenta las diferencias en las velocidades del sonido tanto en agua como en acero. El medio de acople en todas las pruebas fue agua potable a temperatura ambiente.

3.2.1.4. Evaluación de las Características del Equipo

Se realizaron las siguientes pruebas para la evaluación de las características del equipo de ultrasonido, entre las cuales se encuentran: linealidad y límite vertical, linealidad y límite horizontal y control de ganancia. Para lo anterior se tomó como referencia la norma ASTM E317-06a y procedimientos de la “Japan International Cooperation Agency” (JICA).

Las características del equipo pueden verificarse por el modo de contacto o por inmersión, ya que estas son propias del equipo y son independientes del tipo de acoplamiento. Estas pruebas deben hacerse periódicamente para eliminar posibles fallas en el funcionamiento del equipo. En el anexo C se muestra los procedimientos utilizados en la verificación del equipo USM 35XS.

3.2.2 Selección del Palpador más adecuado

En esta actividad se llevó a cabo la caracterización de los palpadores de inmersión, disponibles en el laboratorio de Ensayo No Destructivos de la Universidad Industrial de Santander, teniendo en cuenta su frecuencia, el diámetro del cristal, y además se determinó el campo cercano en agua y acero, estos valores se presentan en el capítulo de análisis de resultados. La tabla 1 muestra cada uno de los palpadores de inmersión analizados y algunas de sus características básicas.

Teniendo en cuenta la frecuencia, el diámetro y el campo cercano en agua y acero, se realizó la caracterización de los palpadores existentes en el laboratorio. Para esto se utilizó un bloque de calibración distancia- amplitud con dimensiones de 12 [in] de ancho, 3 [in] de alto y 1 [in] de profundidad, con seis orificios pasantes, como se muestra en la figura 8 y fotografía 3.

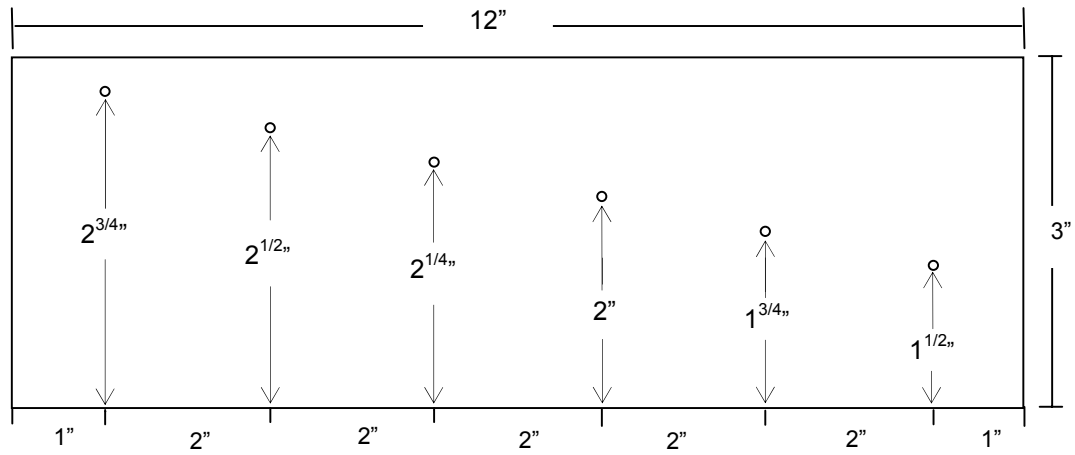
Previa calibración del equipo con cada uno de los palpadores, se determinó la posición de todos los agujeros inicialmente haciendo un barrido sobre la cara superior y posteriormente sobre la cara inferior, de tal manera que se pudiera analizar orificios a profundidades desde 0.25 [in] hasta 2.75 [in]. Los datos obtenidos y las respectivas gráficas se muestran en el capítulo 4.

Tabla 1. Características más importantes de los palpadores no focalizados.

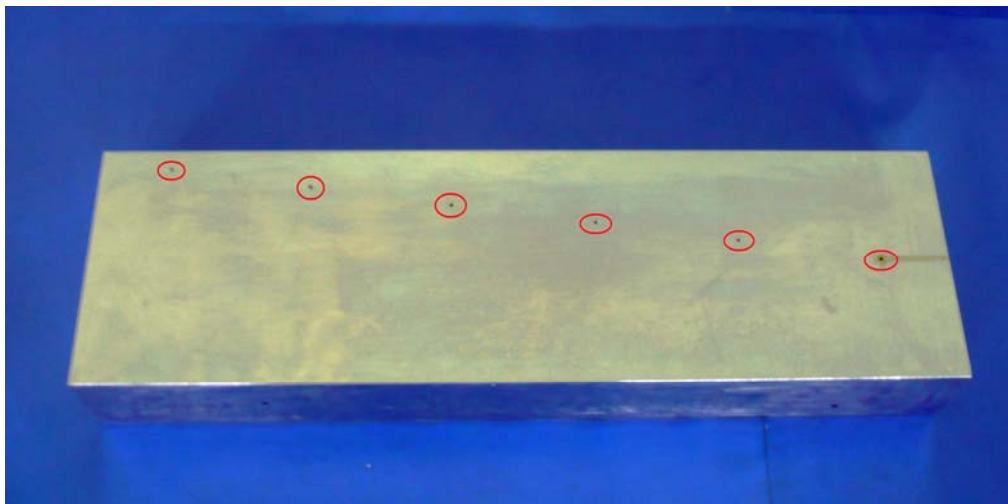
MARCA	FRECUENCIA [MHz]	DIÁMETRO [in]	PALPADOR
Magnaflux	5	0.750	
Magnaflux	10	0.187	
Magnaflux	15	0.750	

A partir de los resultados obtenidos se escogió el palpador más apropiado para el desarrollo de esta investigación.

Figura 8. Plano del Bloque Distancia-Amplitud



Fotografía 3. Bloque Distancia-Amplitud



3.3 REALIZACIÓN DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO.

Las pruebas realizadas en el laboratorio se efectuaron empleando escalerillas calibradas y una probeta de tipo tubular, a continuación se presenta detalles de las muestras analizadas en cada caso.

Características de las Escalerillas Calibradas

El laboratorio de Ensayos No Destructivos de la UIS, tiene dos tipos de escalerillas calibradas ASTM E 797-05 de acero, cada una con cuatro pasos descendentes, la primera con dimensiones en pulgadas que va desde de 0.5 hasta 0.1 [in] y la otra con dimensiones en milímetros que va desde de 10 hasta 2[mm]. En la fotografía 4 se muestran imágenes de las vista frontal y superior de las escalerillas patrón mencionadas.

Fotografía 4. (a). Escalerillas calibradas en milímetros. (b) Escalerillas calibradas en pulgadas



Vista frontal

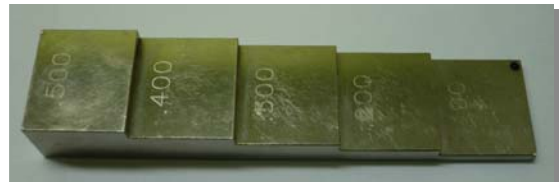


Vista superior

(a)



Vista frontal



Vista superior

(b)

Características de la Probeta Tipo Tubular¹²

Dentro de los objetivos trazados en esta investigación, estaba el medir la pérdida de espesor en la superficie externa de una pieza tubular, para lo cual se utilizó un tramo de tubería de acero ASTM A53, grado A, tipo S, empleado en la industria para el transporte de fluidos y gas. En la tabla 2 se muestra la clasificación del tipo de acero bajo la normas ASTM, junto con sus principales características y su composición química.

Tabla 2. Clase de acero según norma ASTM, junto con su composición química

Tipo de Acero	Schedule	Diámetro exterior [mm]	Espesor de Pared [mm]	Aplicaciones				
ASTM A 53	40	71.12	6	Instalaciones de gas y conducción de fluidos a altas y medias presiones				
Composición Química del Acero								
%C	% Mn	% P	% S	% Cu	% Ni	% Cr	% Mb	% V
0.25	0.95	0.050	0.045	0.40	0.40	0.40	0.15	0.08

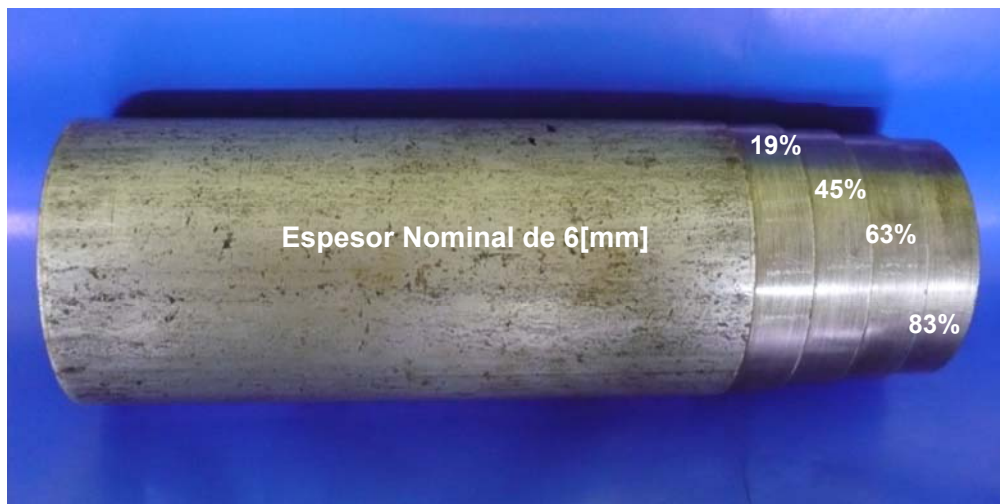
Esta probeta presenta unas dimensiones de 22.5 [cm] de longitud y 6.4 [cm] de diámetro exterior, con variaciones de espesor que van del orden aproximadamente del 19%, 45% 63% y 83% del espesor original (representado en escalones de aproximadamente 1.5 [cm] de ancho).

¹² OLARTE SANCHEZ LEIDY CRISTINA-VANEGAS MORENO DIEGO 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.

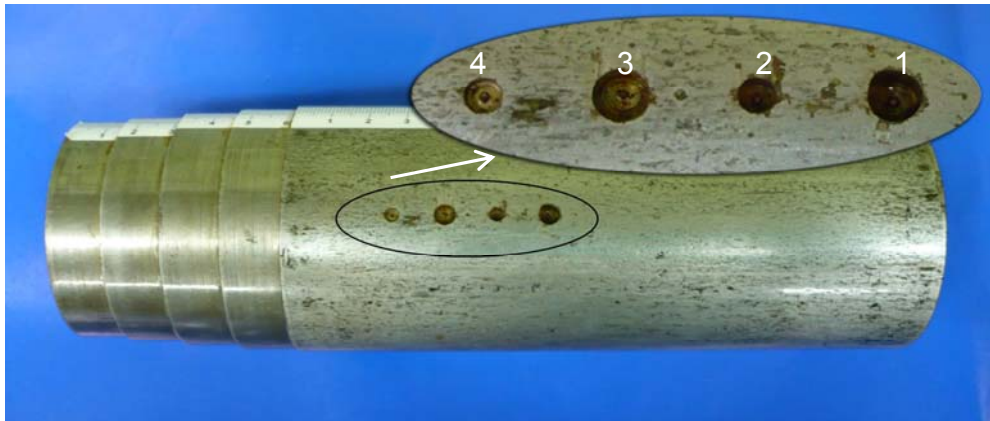
Las pérdidas se ven representadas en cuatro pasos, partiendo desde el espesor inicial de 6[mm] hasta 1.04 [mm], donde el primer y segundo paso presentaron caídas de 1.12 y 2.68 [mm]. Mientras que el tercer y cuarto paso con de caídas de 3.75 y 4.96 [mm] respectivamente. Estas diferencias en las pérdidas de cada escalón se realizaron con el propósito de asemejar perdidas en el espesor del material sometido a corrosión. En la fotografía 5 se observa un tramo de la tubería con sus respectivas caídas de espesor.

Adicionalmente la tubería presenta cuatro agujeros, con diámetro de (3.4, 5.0, 3.4, 5.0 [mm]) y profundidades de (1, 2.55, 3, 4.4 [mm]) estos se ubicaron de forma descendente en cuanto su profundidad a través del eje principal del tubo. En La fotografía 6 se muestra este tipo de agujeros.

Fotografía 5. Probeta tipo tubular.



Fotografía 6. Agujeros en la superficie de la probeta tubular



- 1) D = 5 [mm] P = 4.4 [mm] 2) D = 3.4 [mm] P = 3 [mm] 3) D = 5 [mm] P = 2.55 [mm]
4) D = 3.4 [mm]; P = 1 [mm]

Debido a las condiciones de ensayo, se necesitó proteger la pieza tubular de la corrosión que ocasionaba introducirla en agua, para esto se le aplicó una capa uniforme de esmalte acrílico, lo que evitó que la pieza perdiera sus dimensiones con las cuales fue fabricada. En el anexo D se presenta el plano correspondiente a este patrón.

3.3.1 Determinación y registro de las variaciones del espesor de las escalerillas de acero calibradas, existentes en el laboratorio.

Con el fin de obtener datos más precisos y reales, fue necesario realizar un montaje adicional con una pequeña caja a la cual se le colocó una regla con escala de milímetros donde se ubicó la escalerilla a ensayar.

En la fotografía 7 se muestra la caja con la regla milimetrada, mientras que en la fotografía 8 se presenta el montaje caja más escalerilla. Además fue

indispensable fijar sobre el palpador una pequeña aleta de acetato, la cual permitió conocer la ubicación exacta del haz central del transductor y a su vez ubicar el inicio y el final de cada paso de la escalerilla. En la fotografía 9 se observa el palpador con la aleta para la ubicación del haz central.

Fotografía 7. Caja soporte con regla milimetrada.

(a) vista superior.

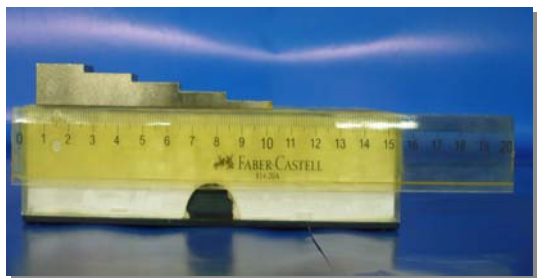
(b) vista frontal



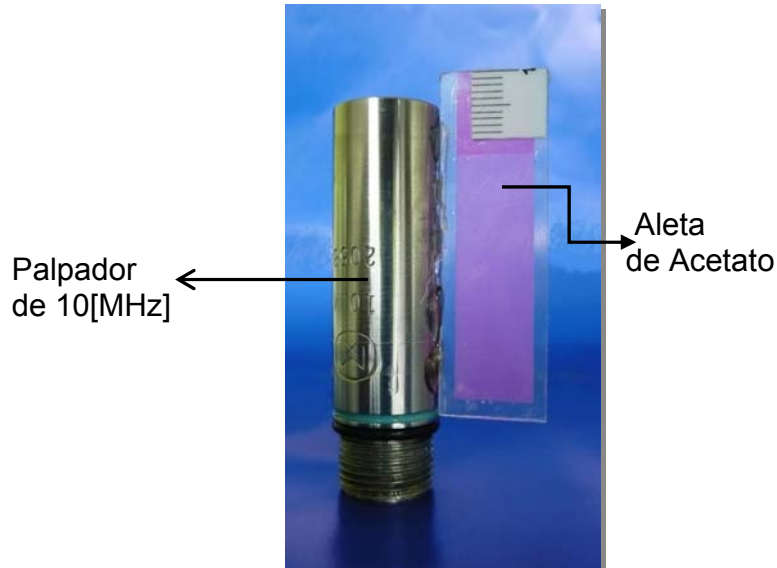
Fotografía 8. Montaje experimental caja más escalerilla

(a) vista superior.

(b) vista frontal



Fotografía 9.Ubicación del haz central por medio de una aleta de acetato.

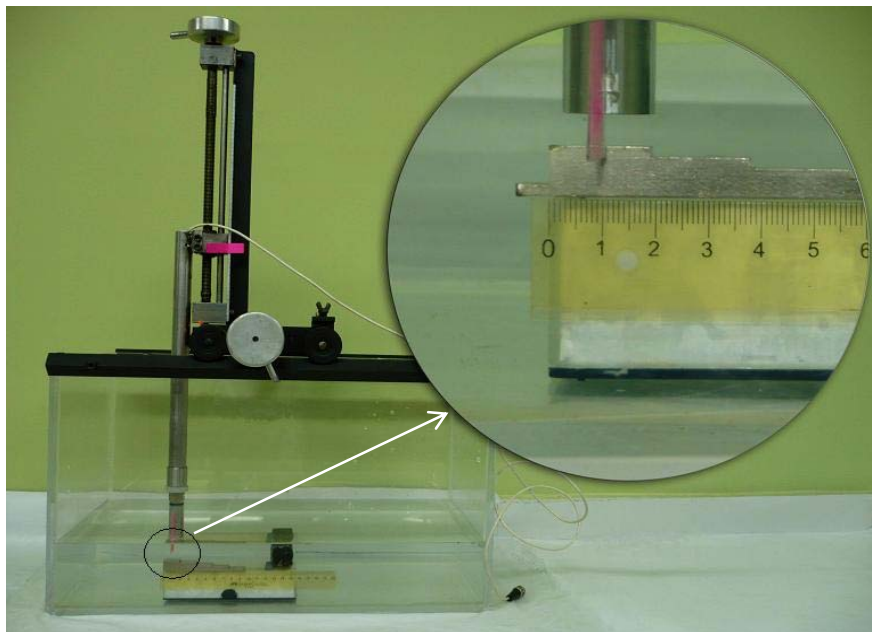


Una vez efectuado el montaje (caja mas escalerilla milimetrada o en pulgadas) se inició la lectura de espesores. El conjunto mencionado se sumergió dentro del sistema de inmersión, en el cual se utilizó agua como medio acoplante, permitiendo así que las ondas ultrasónicas viajen a través de esta hasta penetrar en la pieza. Inmediatamente se ubicó el palpador perpendicularmente sobre la pieza a una distancia de 10 [mm] para la escalerilla calibrada en milímetros y 0,4[in] para la escalerilla calibrada en pulgadas.

En la fotografía 10, se aprecia el montaje del sistema para el ensayo de inmersión con la escalerilla. El palpador se ubica a una distancia de 10 [mm] con el fin de evitar interferencia por señales de agua, enseguida se comenzó a desplazar el transductor desde el escalón de mayor espesor hasta el de menor espesor con pasos de uno o dos milímetros, tomándose en cada punto la posición del eco correspondiente a la columna de agua, a partir de las cual se determina las pérdidas de espesor en la superficie de la

pieza evaluada. Los resultados obtenidos y las graficas correspondientes se muestran en el próximo capítulo.

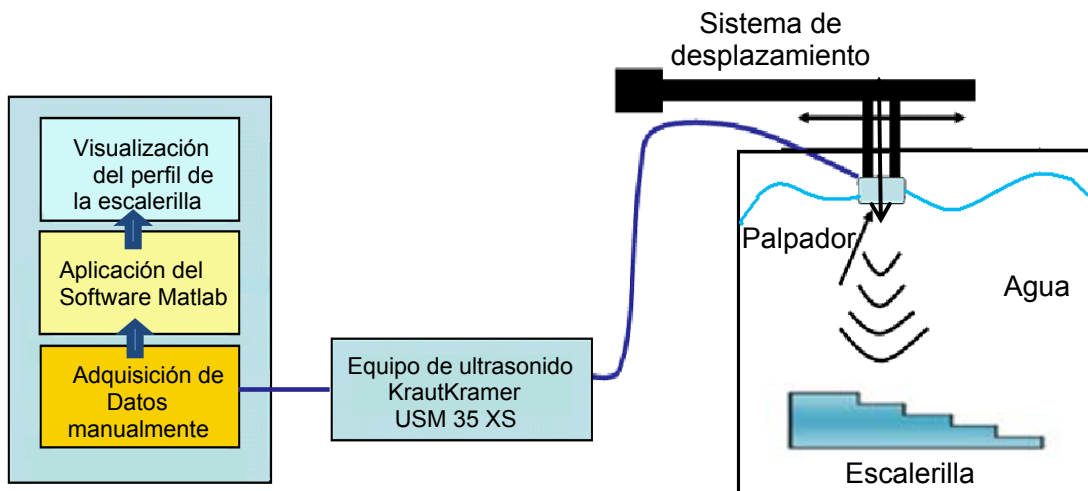
Fotografía 10. Montaje experimental para estimación de la pérdida de espesor en la escalerilla



3.3.2 Representación de la Variación de Espesores de Piezas Planas (Escalarillas).

Con los datos obtenidos de la actividad anterior, se procedió a realizar la representación gráfica de las variaciones de espesores de las escalerillas calibradas utilizando el software MatLab (Matrix Laboratory). En La figura 9 se presenta el diagrama del ensayo junto con la forma de adquisición de los datos. Tanto el desplazamiento del palpador como la adquisición de datos se realizaron de forma manual.

Figura 9. Representación esquemática del ensayo con la adquisición de datos en escalerillas para la visualización del perfil.



3.3.3 Estimación de la Pérdida de Espesores en la Superficie Externa de Probetas Tubulares.

Una vez terminados los ensayos con las escalerillas, se procedió a determinar la pérdida de espesor en la superficie de la tubería. Para esto, fue necesario adherirle a la probeta tubular una cinta con escala en milímetros como se muestra en la fotografía 11, con el fin de obtener datos más exactos y confiables.

Como primera medida se sumergió la probeta tubular dentro del sistema de inmersión y se calculó la columna de agua, la cual fue 7.8 [mm], este valor se determinó sobre el mayor espesor, dado que esta es la mínima distancia requerida para evitar interferencias, se asumió 10[mm] como la distancia de la trayectoria de agua para realizar las pruebas. En la fotografía 12 se muestra el montaje realizado para esta prueba. Luego se movió el transductor en el eje Y, desde el máximo espesor hasta el mínimo, con

desplazamientos de un milímetro y en cada punto se registró la posición de la columna de agua, para posteriormente determinar la pérdida de espesor en la superficie. Los resultados del ensayo se presentan en el siguiente capítulo.

De igual manera se efectuó el mismo montaje con el fin obtener lecturas sobre los agujeros. El palpador se ubico sobre el máximo espesor (nominal), a la misma distancia de 10[mm] y posteriormente se fue desplazando pasando sobre los agujeros. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo de resultados.

Fotografía 11. Tubería con la cinta en escala de centímetros.



3.3.4 Representación de las Variaciones del Espesor en Piezas Tubulares.

Con los datos obtenidos, se procedió a realizar la representación gráfica de las variaciones de espesores de la probeta tubular utilizando el software MatLab (Matrix Laboratory). En la figura 10 se muestra de manera

esquemática el proceso seguido para la adquisición de datos y representación del perfil.

Fotografía 12. Montaje experimental para la tubería

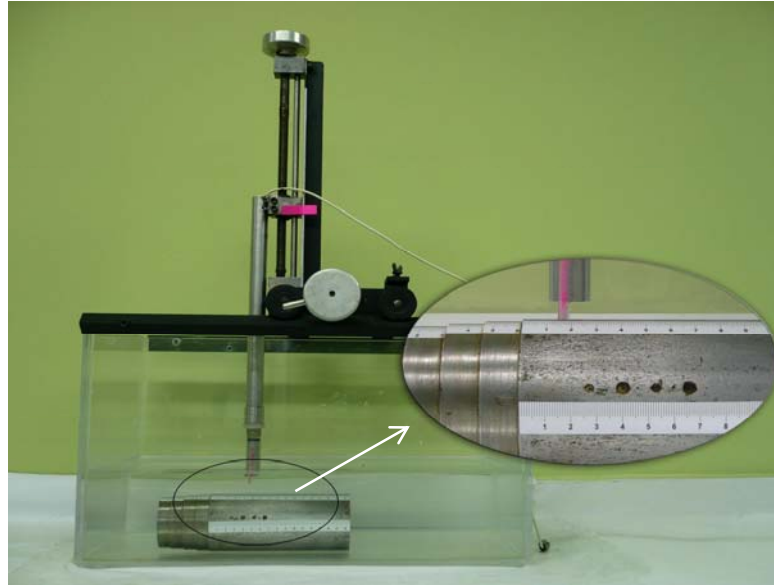
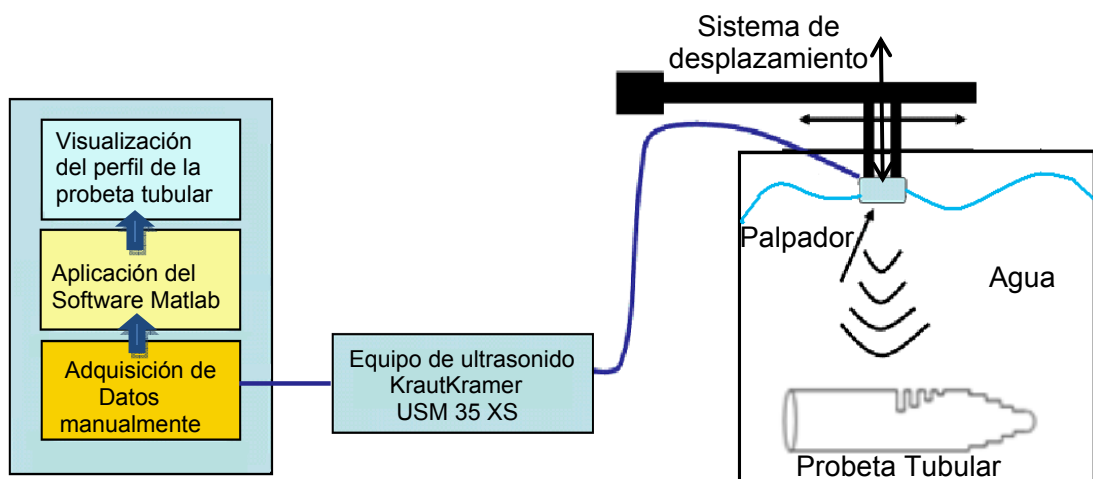


Figura 10. Representación esquemática del ensayo con la adquisición de datos en probeta tubular para la visualización del perfil.



3.3.6 Verificación de los Resultados.

Para llevar a cabo esta etapa, los resultados obtenidos a través de la técnica de ultrasonido por inmersión se compararon con la información disponible de los patrones calibrados en el caso de las escalerillas y con los valores obtenidos a partir de mediciones realizadas sobre el patrón real en el caso de la probeta tubular.

Detalles de esta comparación se da en el capítulo de los análisis de resultados.

3.4 INFORME FINAL

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

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación y se hace su respectivo análisis.

4.1 ESTABLECIMIENTOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el diseño y montaje del sistema de inmersión. Además se indican los criterios básicos para llevar a cabo el proceso de calibración del equipo de ultrasonido y la selección del palpador más adecuado para la realización de los ensayos concernientes al desarrollo del trabajo de grado.

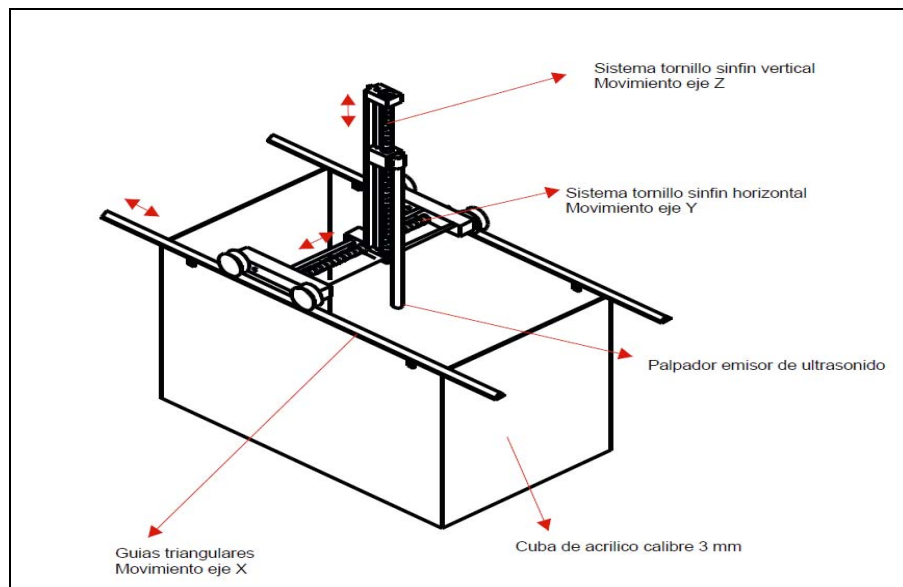
4.1.1 Montaje del ensayo y puesta a punto del sistema ultrasónico para la realización de la prueba por inmersión.

A continuación se presentan los detalles del diseño y montaje del sistema de inmersión.

4.1.1.1 Diseño y montaje del sistema de inmersión.

El sistema de inmersión diseñado consiste de una cuba y un sistema de desplazamiento (conformado por un brazo mecánico de movimiento manual y un dispositivo que contiene el palpador), que permite su efectivo desplazamiento en las tres coordenadas (X, Y, Z). En la figura 11 se presenta un esquema del sistema de inmersión diseñado.

Figura 11. Esquema del Sistema de Inmersión



Cuba de inmersión

Se diseñó una cuba de forma rectangular teniendo en cuenta las características de las piezas a evaluar, como su tamaño y su geometría (escalerilla y tubería), además que permitiera el acceso a la evaluación en los puntos de interés (caídas de espesor) para su evaluación y por último que pudiera soportar el mecanismo de desplazamiento del palpador.

Las piezas que se ensayaron presentaron diferentes tamaños, en el caso de las escalerilla tenían un espesor máximo 1.9 [cm] y de 9.5 [cm] de longitud y para el caso de la pieza tubular tenía unas dimensiones de 23 [cm] de longitud y 7.11 [cm] diámetro externo. Con estas dimensiones, de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente y con el fin de poder aplicar esta técnica para piezas de tamaños mayores de hasta un 50% más de la longitud de la tubería, se determinó el tamaño y el material con la cual se realizó la cuba.

El material seleccionado para la fabricación de la cuba fue acrílico, ya que a diferencia del vidrio es más resistente al impacto, además este tipo de material es transparente, lo cual facilitó la visualización en el desarrollo de cada una de las pruebas. En cuanto al tamaño, está se elaboró con dimensiones de 50 [cm] de ancho, 30 [cm] de alto y 31 [cm] de profundidad, permitiendo una buena ubicación de la pieza y un adecuado desplazamiento del palpador.

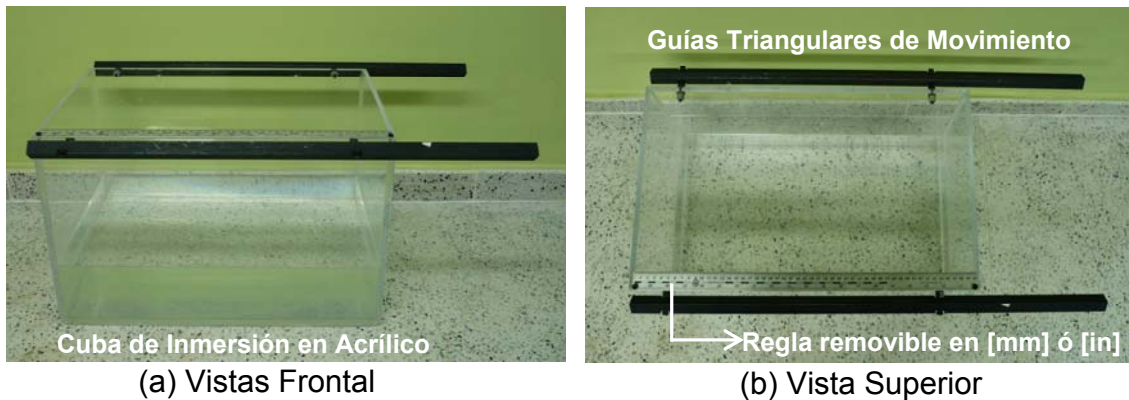
Sobre la parte superior y en las caras de mayor longitud, se ubicaron un par de guías triangulares de movimiento, estas permitieron que sobre ellas fuese puesto el sistema de desplazamiento para así lograr el movimiento en el eje Y.

En la parte superior de la cuba y cercano a las guías de movimiento se instaló una regla metálica removible con escala en milímetros y pulgadas, con el fin controlar los movimientos a lo largo del eje horizontal. En la fotografía 13 se presenta detalles en las vistas frontal y superior de la cuba de inmersión fabricada en acrílico. En el anexo B se muestra los planos de la cuba junto con el sistema de desplazamiento.

Sistema de desplazamiento

El sistema de desplazamiento está conformado por un carro que permite realizar los movimientos del palpador en los tres ejes; este a su vez soporta el brazo mecánico de movimiento manual. El carro utiliza cuatro ruedas de acero para su deslizamiento sobre las guías triangulares ensambladas en la cuba. El movimiento del carro sobre el eje Y se controla por medio de una regla metálica, que se encuentra cercana a la guía triangular.

Fotografía 13. Cuba de inmersión

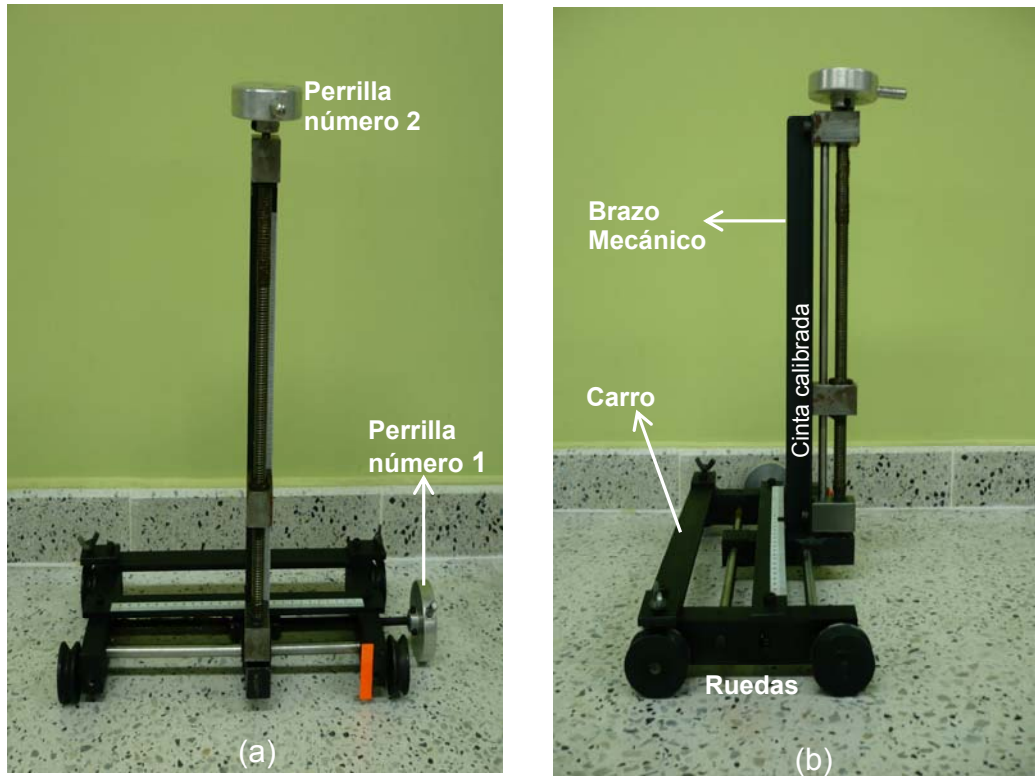


En el cuerpo del carro se encuentra ensamblado el brazo mecánico de movimiento manual, que para su desplazamiento utiliza dos tornillos sin fin, estos dos tornillos permiten el movimiento en los ejes X y Z.

Los movimientos del brazo mecánico se controlaron por medio de dos perillas. Para los desplazamientos en el eje X se utilizó la perilla inferior que se encuentra marcada con el número 1 en la fotografía 14, este desplazamiento se caracterizó de tal manera que cada giro completo de la perilla representara un milímetro sobre una cinta calibrada adherida al cuerpo carro.

Para los movimientos en el eje Z se utilizó la perilla número dos, perilla superior, como se muestra en la misma fotografía, al igual que los movimientos en el eje X, el tornillo empleado para los desplazamientos se calibre de tal manera que al realizar un giro completo a la perilla este se desplazara justo un milímetro sobre la cinta calibrada que se encuentra adherida sobre el eje principal del brazo mecánico

Fotografía 14. Vistas principales del sistema de desplazamiento. (a) vista frontal. (b) Vista lateral



Tubo porta palpador

El tubo se fija al brazo mecánico formando un ángulo de 90° con respecto a la superficie de la pieza a analizar, con el fin de movilizar el palpador en cualquier dirección de los tres ejes. El transductor es asegurado en el extremo inferior del tubo por medio de una rosca universal de conexión BNC. En la fotografía 15 se puede ver el conjunto tubo porta palpador más transductor.

Fotografía 15. Tubo porta palpador



4.1.2 Selección del palpador

Para la selección del palpador se tuvo en cuenta las características básicas de los transductores disponibles en el laboratorio y las curvas obtenidas a partir del patrón distancia- amplitud.

4.1.2.1 Análisis de las características básicas de los transductores

En la tabla 3, se presentan las características básicas: frecuencia, diámetro, campo cercano en agua y en acero, de cada uno de los palpadores de inmersión existentes en el laboratorio. Para la determinación de los campos cercanos en agua y en acero se empleó la ecuación 2.1. A continuación se muestra un ejemplo de este cálculo.

Campo Cercano en Agua para el Palpador de 5[MHz]

$$\lambda = 1480[\text{m/s}] / 5'000.000 [1/\text{s}] = 0.000296 [\text{m}] = 0,0296[\text{cm}]$$

$$N = (1,905 [\text{cm}])^2 / 4(0,0296[\text{cm}]) = 30,65[\text{cm}]$$

Campo Cercano en Acero para el Palpador de 5[MHz]

$$\lambda = 5820[\text{m/s}] / 5'000.000 [1/\text{s}] = 0.001164 [\text{m}] = 0,1164[\text{cm}]$$

$$N = (1,905[\text{cm}])^2/4(0,1164[\text{cm}]) = 7,8[\text{cm}]$$

.Tabla 3. Características de los Palpadores de Inmersión

FRECUENCIA [MHz]	DIÁMETRO [in]	CAMPO CERCANO EN AGUA [cm] *	CAMPO CERCANO EN ACERO [cm] *
5	0.750	30.65	7.8
10	0.187	3.8	0.969
15	0.750	92	23.3

*Las velocidades del sonido en agua y acero fueron tomadas del Instituto Colombiano del Petróleo. Curso ultrasonido nivel II. Ecopetrol. 1996.

De acuerdo con la tabla 3, los palpadores de 10 y 15 [MHz] son los que tienen mayor frecuencia (menor longitud de λ) y por lo tanto mayor sensibilidad, lo cual les permite identificar discontinuidades de menor tamaño ($1/4$ a $1/2 \lambda$). Por el contrario el palpador de 5 [MHz] tiene baja sensibilidad y resolución cercana a la superficie, como se menciona en 2.2.2.

El palpador de 10 [MHz] es el que presenta el menor diámetro y campo cercano tanto en agua como en acero, por lo tanto tiene menor zona de interferencia, alcanzando su mayor punto de presión acústica a poca profundidad de la pieza, teniendo mayor precisión para la identificación de discontinuidades cercanas a la superficie.

4.1.2.2. Análisis de las curvas obtenidas del patrón distancia-amplitud

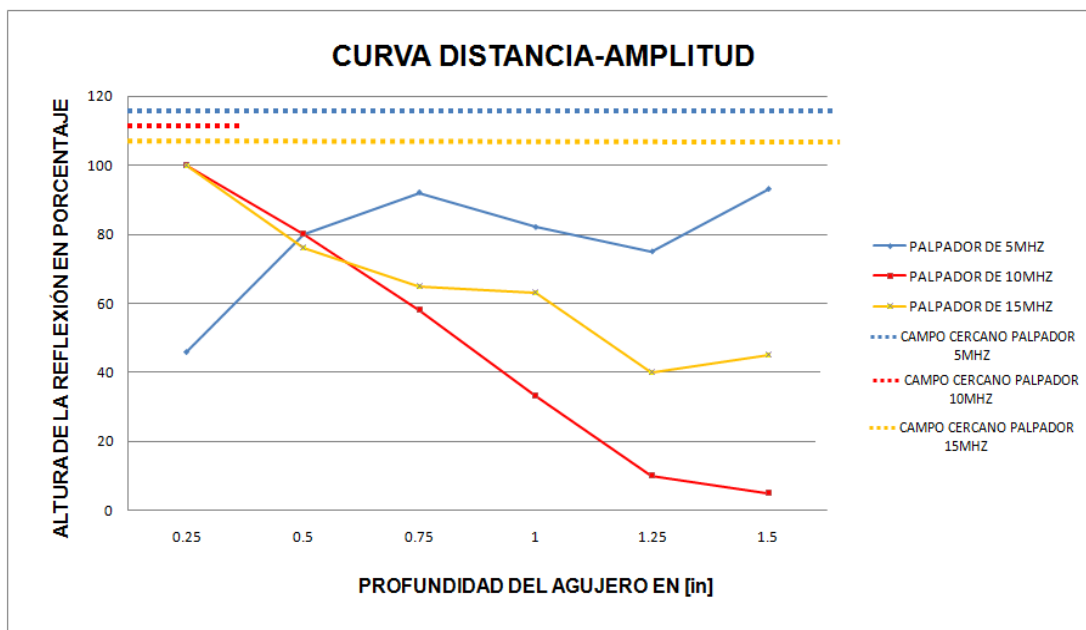
En la gráfica 1, se presentan las curvas obtenidas para cada uno de los palpadores a partir del bloque patrón distancia-amplitud, analizado desde la cara que presenta orificios ubicados a profundidades desde 0,25[in] hasta 1,5[in] (con pasos de 0,25[in]). Se toma este tramo de la curva debido a que

el interés del presente trabajo es detectar discontinuidades en o cercanas a la superficie. La tabla 4 muestra las condiciones de operación del equipo ultrasónico bajo las cuales se elaboraron las curvas

Tabla 4. Condiciones de Operación del Equipo Ultrasónico para de Curvas Distancia-Amplitud.

VARIABLES	VALORES
Frecuencia	2 a 20 [MHz]
Ganancia	90 dB
Rango	5 [in]
Velocidad	232.8 [in/ms]
Retardo del Palpador	Dependiente del palpador
Retardo de la Pantalla	0 [mm]
Amortiguamiento	Alto
Intensidad	Dependiente del palpador
Frecuencia de Repetición impulsos	1
Rechazo	25%
Tipo de Onda	1/2 Onda (+)
Tipo de Medición	Flanco

Gráfica 1. Curva distancia-amplitud para los palpadores analizados



Las curvas en la gráfica 1 muestran para cada palpador, el porcentaje de la altura alcanzado para cada uno de los orificios ubicados a diferentes profundidades, apreciándose diversos comportamientos los cuales se debe a la diferencia en la longitud del campo cercano que presentan los palpadores.

El primer agujero ubicado a una profundidad de 0,25[in], con un diámetro de 1/16[in], se detecta con los tres palpadores alcanzándose tanto para el palpador de 10[MHz] como para el de 15[MHz] el 100% de la escala total de la pantalla, mientras que para el palpador de 5[MHz] solo se alcanzaba el 45% de esta, lo cual indica que con los primeros palpadores se detectan mejor las discontinuidades cercanas a la superficie.

El palpador de 10[MHz] con menor campo cercano, es el que presenta la curva más homogénea con un comportamiento descendente, por el contrario, los otros dos palpadores presentan curvas heterogéneas, es decir, con alta variabilidad en los porcentajes de altura para cada uno de los orificios encontrados, lo cual dificulta la inspección en el interior del material ensayado.

A partir del análisis de las características básicas y las curvas distancia-amplitud se determinó que el palpador más adecuado para llevar a cabo las pruebas es el de 10[MHz].

4.1.3 Evaluación de las Características del Equipo Ultrasónico¹³

Para evaluar el sistema ultrasónico a utilizar se tuvieron en cuenta ensayos establecidos en las normas ASTM E1001-06 Y E317-06a, los cuales permiten evaluar la integridad y sanidad del equipo ultrasónico junto con sus respectivos accesorios.

Los ensayos establecidos por la norma son: La linealidad y límite horizontal, linealidad y límite vertical y el control de ganancia. Estos se realizaron por el modo de contacto y por el modo de inmersión. Los procedimientos realizados se muestran en el anexo C.

En este capítulo se encuentran los resultados obtenidos de los ensayos realizados por el modo de inmersión, en los cuales se utilizó el palpador seleccionado en la actividad anterior (transductor de 10[MHz], diámetro de 0,187[in])

4.1.3.1 Linealidad y Límite Horizontal

En la tabla 5 se presenta los resultados obtenidos para la determinación de la linealidad y límite horizontal del equipo ultrasónico, en ella se muestra la posición de cada una de las 11 reflexiones al igual que el rango de tolerancia del 2% según código ANSI. Para la realización de la prueba se utilizó el bloque patrón ASTM E797-05, calibrado en pulgadas, utilizando el escalón de 0.2 [in]. El comportamiento de los datos obtenidos se presenta en la gráfica 2.

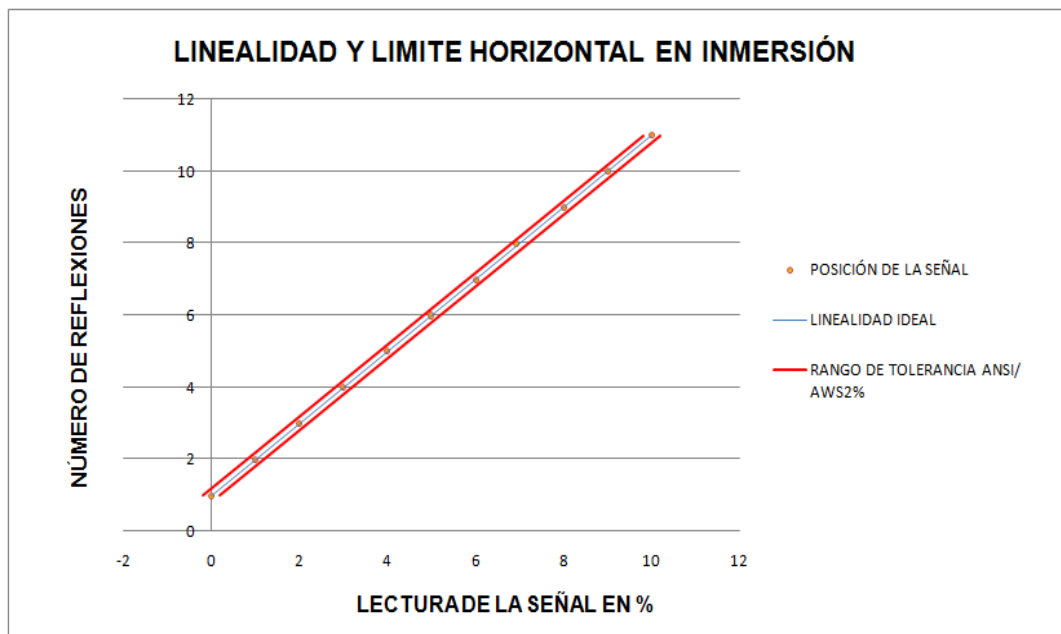
¹³ ASTM E-317-6a "STANDAR PRACTICE FOR EVALUATING PERFORMACE CHARACTERISTIC OF ULTRASONIC PULSE-ECHO TESTING INSTRUMENTS AND SYSTEMS WITHOUT THE USE OF ELECTRONIC MEASUREMENT INSTRUMENTS"

Tabla 5. Resultados de la linealidad horizontal y rangos de tolerancia.

Número de Reflexiones	Posición de la señal*	RANGO TOLERANCIA ANSI/AWS (2%)	
1	0	-0,2	0,2
2	1	0,8	1,2
3	2	1,8	2,2
4	3	2,8	3,2
5	3,99	3,8	4,2
6	4,99	4,8	5,2
7	6	5,8	6,2
8	6,9	6,8	7,2
9	8	7,8	8,2
10	9	8,8	9,2
11	9,99	9,8	10,2

*Cada unidad representa 0.2 [in]

Gráfica 2 Linealidad y Límite Horizontal en Contacto



En la gráfica 2 se presenta la posición en la escala horizontal de cada una de las 11 reflexiones, al igual que los rangos de tolerancia establecidos. De acuerdo con esta gráfica se puede decir que el sistema ultrasónico presenta linealidad horizontal en todo el intervalo ensayado y se encuentra dentro de los límites de tolerancia establecidos del (2%).

4.1.3.2 Linealidad y Límite Vertical

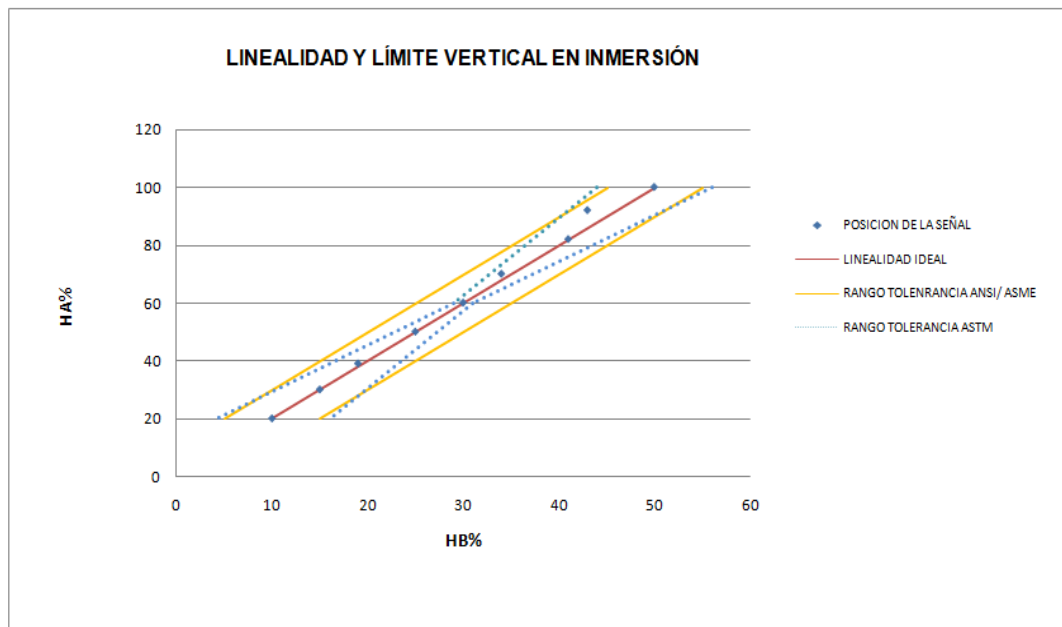
En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en la valoración de la linealidad y límite vertical del sistema, los valores de porcentaje de altura de los ecos Ha y Hb, las desviaciones encontradas y los rangos de tolerancia, según código ANSI/ASME-BVP, SECCIÓN V, artículo 5 Y ASTM E317-06a.

El comportamiento de los resultados obtenidos se presenta en la gráfica 3, se aprecia que el equipo ultrasónico KrautKramer tiene linealidad vertical. Además la gráfica muestra que el sistema ultrasónico se encuentra dentro del rango de tolerancia señalado por la ASTM (más estricto) y ANSI/ASME.

Tabla 6. Resultados de linealidad vertical y los rangos de tolerancia

Hb%	Ha %	DESVIACIÓN	RANGO TOLERANCIA ANSI/ASME		RANGO TOLERANCIA ASTM	
50	100	0	45	55	44	56
43	92	3	41	51		
41	82	0	36	46		
34	70	1	30	40		
30	60	0	25	35	29	31
25	50	0	20	30		
19	39	0,5	14,5	24,5		
15	30	0	10	20		
10	20	0	5	15	4	16

Gráfica 3. Linealidad y Límite Vertical en Inmersión



4.1.3.3 Linealidad de control de Ganancia

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos a partir de este ensayo

Tabla 7. Linealidad y Control de Amplitud

Ajuste inicial de la indicación en % del total de la pantalla	Control de ganancia (dB)	Lectura	Limites de amplitud en % de total de la pantalla
80	-6	43	32 a 48
80	-12	20	16 a 24
40	+6	83	64 a 96
20	+12	80	64 a 96

Los resultados indicados en la tabla 7 muestran que el equipo presenta linealidad de control de ganancia evaluados dentro de los rangos permisibles según el código ANSI/ASME y ASTM E317-06a.

4.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la estimación de la pérdida de espesores tanto en escalerillas calibradas, como en la probeta tubular, además se representa el perfil de la pérdida de espesores.

La estimación de la pérdida de espesor en cada una de las probetas se determinó teniendo en cuenta los siguientes factores: la velocidad del sonido en el agua, la variación de la columna de agua que existía entre el palpador y la pieza de prueba y el desplazamiento del palpador en el eje Y.

4.2.1 Determinación y registro de las variaciones de espesor de las escalerillas de acero calibradas.

Una vez establecidas las condiciones del ensayo, las cuales comprendían la selección del palpador y la evaluación de las características del equipo ultrasónico, se procedió a efectuar la toma de datos.

Así como se mencionó en el desarrollo de la metodología, cada una de las escalerillas se introdujo dentro de la cuba, posicionándola sobre la caja para su respectivo análisis.

4.2.1.1 Escalerilla Calibrada en Milímetros

Una vez colocada la escalerilla dentro de la cuba, se ubico el palpador al inicio del área de mayor espesor de la misma, con la ayuda del brazo mecánico.

Situando el palpador al comienzo del escalón de 10[mm], se estableció el cero o punto de partida. La distancia entre el palpador y la pieza se calculo como lo indica la ecuación 2.3. El siguiente es un ejemplo del cálculo de la columna de agua:

$$D = (6.35) + (10/4) = 8,85[\text{mm}]$$

El valor de la columna de agua obtenido es de 8,85[mm], dado que esta es la mínima distancia requerida para evitar interferencias, se asumió 10[mm] como la distancia de la trayectoria de agua para realizar las pruebas. Establecida la columna de agua se determinaron las condiciones de calibración del equipo ultrasónico, las cuales se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Características principales de calibración

VARIABLES	VALORES
Frecuencia	10 [MHz]
Ganancia	60 [dB]
Rango	100 [mm]
Velocidad	5940 [m/s]
Retardo del Palpador	0,221 [μs]
Retardo de la Pantalla	0[mm]
Amortiguamiento	Bajo
Intensidad	Alto
Frecuencia de Repetición impulsos	2
Rechazo	5%
Tipo de Onda	1/2 Onda (+)
Tipo de Medición	Flanco

Con las condiciones del equipo establecidas y determinado el valor de la columna de agua, se comenzó a desplazar el palpador desde el escalón de 10[mm] hasta el de 2[mm] con desplazamientos de entre 1[mm] y 2[mm] en el eje Y, de tal manera que se pudiera analizar la variación de la altura de la columna de agua en cada desplazamiento, para determinar las pérdidas de espesor en la superficie externa de la pieza analizada.

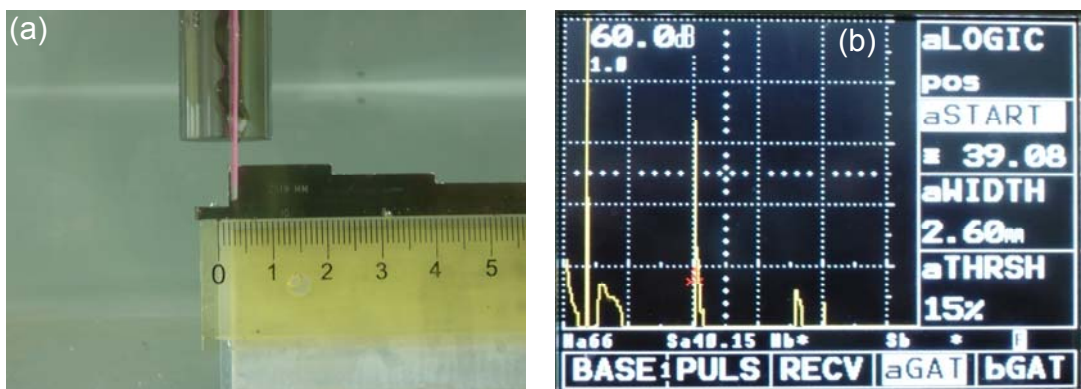
Con el fin de hacer un barrido completo de las piezas, se asumieron los siguientes criterios, (determinados experimentalmente):

- ✓ Se estableció el punto de partida (punto cero) ubicando el centro del palpador sobre el inicio del escalón de 10[mm] (con la ayuda de la aleta descrita en la metodología). Ver fotografía 16
- ✓ El final de cada escalón se determinó cuando aparecen sobre la pantalla dos ecos a la misma altura (los cuales se presentan al final de un paso y el inicio del siguiente paso). La pérdida de espesor en la superficie de la pieza analizada se da por la distancia de separación de los dos ecos. Ver fotografía 17
- ✓ Se tomo como inicio del siguiente escalón el punto en el cual el eco del respectivo paso supero el 50% de la altura de la pantalla. Ver fotografía 18

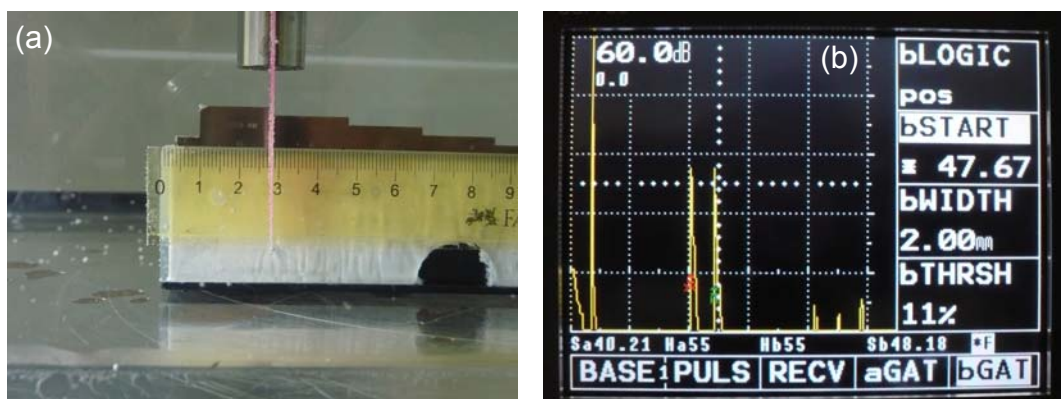
Los resultados obtenidos en cada uno de los escalones se muestran en las tablas 9 a 13. En estas se aprecia la distancia total recorrida en el eje Y del sistema, el paso de desplazamiento, la posición de la columna de agua (S_a), el valor de la columna de agua y la altura en porcentaje del eco de la columna de agua (H_a).

El valor de la columna de agua para cada escalón se determina dividiendo S_a/F , siendo F la relación entre las velocidades del acero y del agua, cuyo valor es 4.

Fotografía 16. Establecimiento del punto de partida para la escalerilla de 10[mm]. (a) Palpador sobre el borde de la escalerilla. (b) Imagen del eco.



Fotografía 17 Determinación del punto final de un escalón. (a) Palpador ubicado sobre el fin del escalón (b) Imagen del eco



Fotografía 18. Visualización del siguiente paso. (a) Palpador justo sobre el siguiente escalón. (b) Altura del eco sobre la pantalla

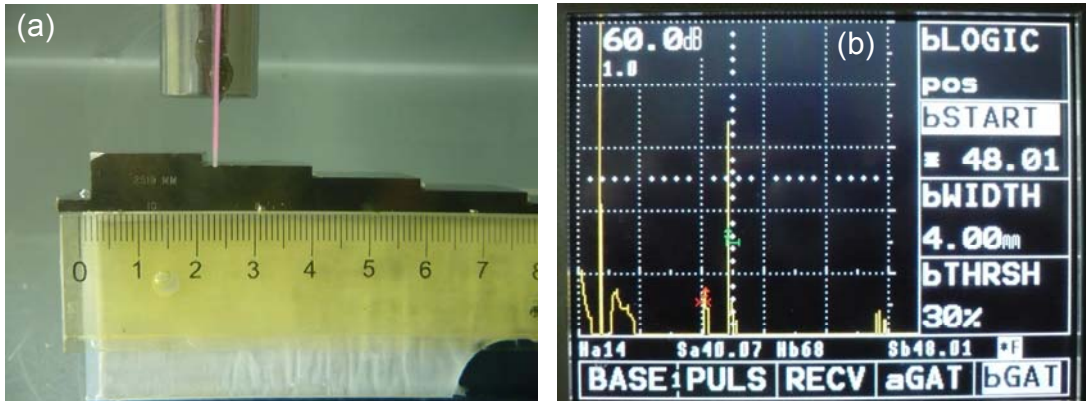


Tabla 9. Datos para el Escalón de 10[mm] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [mm] ASTM E 797-05				
Escalón de 10 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y[mm]	Paso [mm]	Posición de la Columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
0	0	40	10	66 %
2	2	40	10	90 %
4	2	40	10	100 %
6	2	40	10	100 %
8	2	40	10	100 %
10	2	40	10	100 %
12	2	40	10	100 %
14	2	40	10	100%
15	1	40	10	98%
16	1	40	10	84%
17	1	40	10	76%
18	1	40	10	68%
19	1	40	10	55%

*F = 4.

Tabla 10. Datos para el Escalón de 8[mm] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [mm] ASTM E 797-05				
Escalón de 8 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
19.3	0,3	48	12	65%
21	1,7	48	12	90%
23	2	48	12	100 %
25	2	48	12	100 %
27	2	48	12	100 %
29	2	48	12	100 %
31	2	48	12	100 %
32	1	48	12	100%
34	2	48	12	98%
35	1	48	12	85%
36	1	48	12	79%
37	1	48	12	67%
38	1	48	12	52%

*F = 4

Tabla 11. Datos para el Escalón de 6[mm] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [mm] ASTM E 797-05				
Escalón de 6 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso [mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
38.4	0,4	56	14	60%
40	1,6	56	14	93%
42	2	56	14	100%
44	2	56	14	100 %
46	2	56	14	100 %
48	2	56	14	100 %
50	2	56	14	100 %
52	2	56	14	100%
53	1	56	14	94%
54	1	56	14	89%
55	1	56	14	77%
56	1	56	14	63%
57	1	56	14	47%

*F = 4

Tabla 12. Datos para el Escalón de 4[mm] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [mm] ASTM E 797-05				
Escalón de 4 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
57,3	0,3	64	16	65%
59	1,7	64	16	80%
61	2	64	16	100%
63	2	64	16	100 %
65	2	64	16	100 %
67	2	64	16	100 %
69	2	64	16	100 %
71	2	64	16	100%
72	1	64	16	94%
73	1	64	16	85%
74	1	64	16	77%
75	1	64	16	60%
76	1	64	16	44%

*F = 4

Tabla 13. Datos para el Escalón de 2[mm] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [mm] ASTM E 797-05				
Escalón de 2 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
76,6	0,6	72	18	63%
78	1,2	72	18	78%
80	2	72	18	90%
82	2	72	18	100 %
84	2	72	18	100 %
86	2	72	18	100 %
88	2	72	18	100 %
90	2	72	18	100%
91	1	72	18	95%
92	1	72	18	88%
93	1	72	18	78%
94	1	72	18	69%
95	1	72	18	40%

*F = 4

En cada una de las tablas se aprecia que no hay variación del valor de la columna agua, durante el barrido hecho en cada uno de los escalones, el cambio de un escalón a otro muestra el aumento de 2 mm en la columna de agua (pérdida de espesor en la superficie). A medida que el palpador se acerca al final de cada escalón se observa que la altura del eco disminuye; esto se debe al diámetro del palpador, debido a que el haz de incidencia alcanza a cubrir áreas de los dos escalones consecutivos. Esto se podría mejorar utilizando palpadores focalizados.

4.2.1.2 Escalerilla Calibrada en Pulgadas

El montaje realizado con la escalerilla milimetrada se hizo de nuevo para la escalerilla en pulgadas.

Una vez situado el palpador al comienzo del escalón 0,5[in], se estableció el cero o punto de partida. La distancia entre el palpador y la pieza se calculo utilizando la ecuación. 2.3.

$$D = (1/4) + (0.5/4) = 0,375[in]$$

El valor de la columna de agua obtenido es de 3.75 [in], dado que esta es la mínima distancia requerida para evitar interferencias, se asumió como 0.4 [in] la distancia de la trayectoria de agua para realizar las pruebas.

Establecida la columna de agua se determinaron las condiciones de calibración del equipo ultrasónico, las cuales se presentan en la tabla14

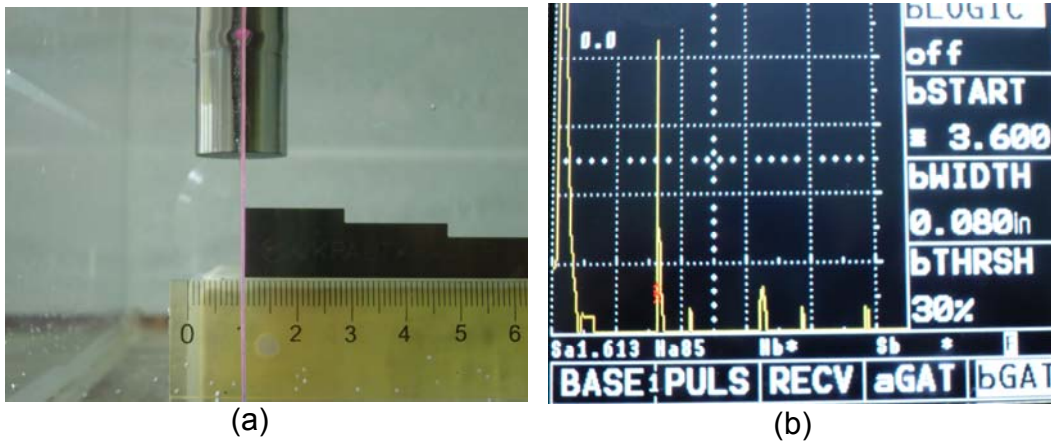
Tabla 14. Características principales de calibración

VARIABLES	VALORES
Frecuencia	10 [MHz]
Ganancia	62 [dB]
Rango	5 [in]
Velocidad	243.8 [in/m s]
Retardo del Palpador	0,120 [μ s]
Retardo de la Pantalla	0[in]
Amortiguamiento	Alto
Intensidad	Alto
Frecuencia de Repetición impulsos	1
Rechazo	5%
Tipo de Onda	1/2 Onda (+)
Tipo de Medición	Flanco

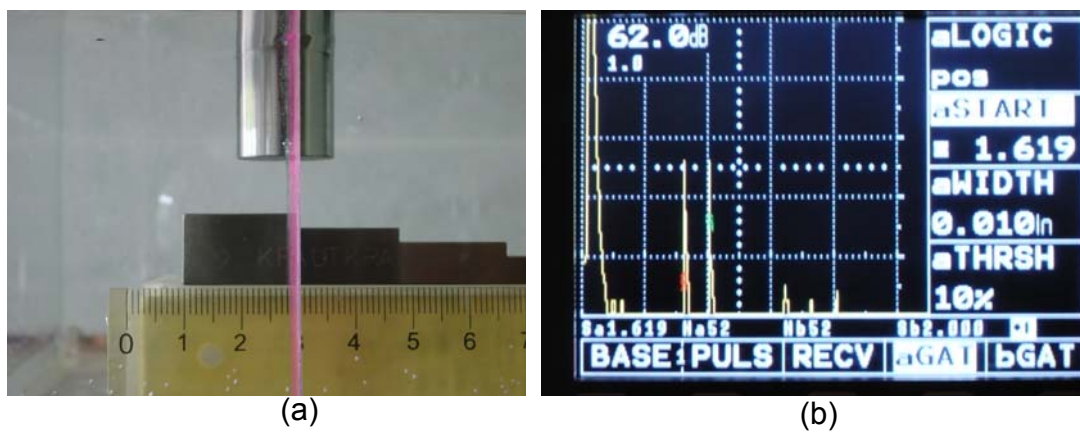
Con las condiciones del equipo establecidas y determinado el valor de la columna de agua, se comenzó a desplazar el palpador desde el escalón de 0.5 [in] hasta el de 0.1 [in] con desplazamientos de $(1/16)$ [in] en el eje Y.

Para la adquisición de los datos se toma el mismo criterio planteado con la escalerilla milimetrada (ver 4.2.1.1). Estos criterios se muestran en las fotografías 19 a 21. Los resultados obtenidos en cada uno de los escalones se muestran en las tablas 15 a 19. En cada una de las tablas se aprecia la distancia total recorrida en el eje Y, el paso de desplazamiento, la posición de la columna de agua (S_a), el valor de la columna de agua y la altura en porcentaje del eco de la columna de agua (H_a). El valor de la columna de agua para cada escalón se determina dividiendo S_a/F , siendo F la relación entre las velocidades del acero y del agua, cuyo valor es 4.

Fotografía 19. Establecimiento del punto de partida para la escalerilla de 0.5 [in]. (a) Palpador sobre el borde de la escalerilla. (b) Imagen del eco.



Fotografía 20. Determinación del punto final de un escalón. (a) Palpador ubicado sobre el fin del escalón (b) Imagen del eco



Fotografía 21. Visualización del siguiente paso. (a) Palpador justo sobre el siguiente escalón. (b) Altura del eco sobre la pantalla

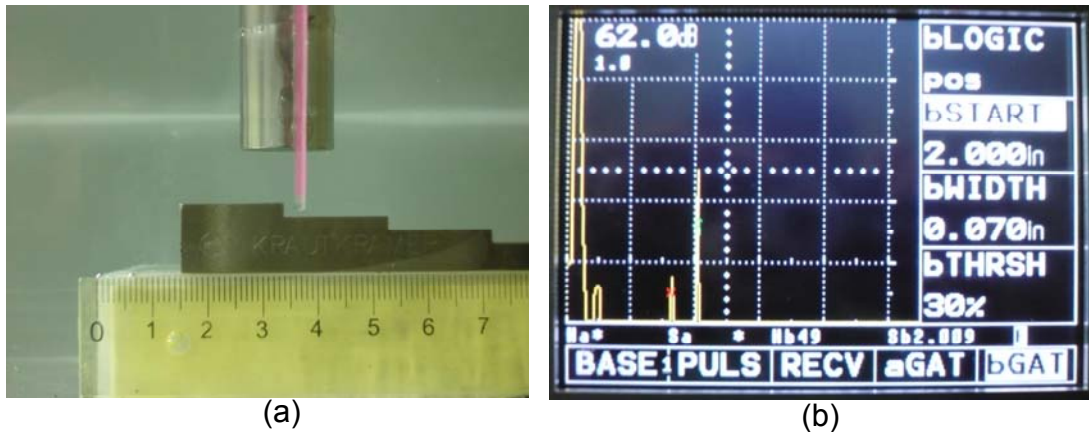


Tabla 15. Datos para el Escalón de 0,5[in] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [in] ASTM E 797-05				
Escalón de 0,5 [in]				
Distancia recorrida en el eje Y[in]	Paso [in]	Posición de la columna de agua (Sa) [in]	Columna de agua (Sa/F)* [in]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
0	0	1,613	0,4	85 %
1/16	1/16	1,613	0,4	95 %
1/8	1/16	1,613	0,4	100 %
3/16	1/16	1,613	0,4	100 %
1/4	1/16	1,613	0,4	100 %
5/16	1/16	1,613	0,4	100 %
3/8	1/16	1,613	0,4	100 %
7/16	1/16	1,613	0,4	100 %
1/2	1/16	1,613	0,4	97%
9/16	1/16	1,613	0,4	89%
5/8	1/16	1,613	0,4	76%
11/16	1/16	1,613	0,4	69%
3/4	1/16	1,613	0,4	52%

*F = 4

Tabla 16. Datos para el Escalón de 0,4[in] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [in] ASTM E 797-05				
Escalón de 0,4 [in]				
Distancia recorrida en el eje Y [in]	Paso [in]	Posición de la columna de agua (Sa) [in]	Columna de agua (Sa/F)* [in]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
0,78	1/16	2	0,5	72%
13/16	1/16	2	0,5	89%
7/8	1/16	2	0,5	100
15/16	1/16	2	0,5	100 %
1	1/16	2	0,5	100 %
17/16	1/16	2	0,5	100 %
9/8	1/16	2	0,5	100 %
19/16	1/16	2	0,5	100%
5/4	1/16	2	0,5	95%
21/16	1/16	2	0,5	88%
11/8	1/16	2	0,5	76%
23/16	1/16	2	0,5	69%
3/2	1/16	2	0,5	48%

*F = 4

Tabla 17. Datos para el Escalón de 0,3[in] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [in] ASTM E 797-05				
Escalón de 0,3 [in]				
Distancia recorrida en el eje Y [in]	Paso[in]	Posición de la columna de agua (Sa) [in]	Columna de agua (Sa/F)* [in]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua(Ha)
	1/16	2,43	0,6	75%
25/16	1/16	2,43	0,6	93%
13/8	1/16	2,43	0,6	100%
27/16	1/16	2,43	0,6	100 %
7/4	1/16	2,43	0,6	100 %
29/16	1/16	2,43	0,6	100 %
15/8	1/16	2,43	0,6	100 %
31/16	1/16	2,43	0,6	100%
2	1/16	2,43	0,6	95%
33/16	1/16	2,43	0,6	89%
17/8	1/16	2,43	0,6	77%
35/16	1/16	2,43	0,6	63%
9/4	1/16	2,43	0,6	43%

Tabla 18. Datos para el Escalón de 0,2[in] de la Escalerilla Calibrada

Escalerilla Calibrada en [in] ASTM E 797-05				
Escalón de 0,2 [in]				
Distancia recorrida en el eje Y [in]	Paso [in]	Posición de la columna de agua (Sa) [in]	Columna de agua (Sa/F)* [in]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
2,28	1/16	2,8	0,7	73%
37/16	1/16	2,8	0,7	84%
19/8	1/16	2,8	0,7	100%
39/16	1/16	2,8	0,7	100 %
5/2	1/16	2,8	0,7	100 %
41/16	1/16	2,8	0,7	100 %
21/8	1/16	2,8	0,7	100 %
43/16	1/16	2,8	0,7	100%
11/4	1/16	2,8	0,7	97%
45/16	1/16	2,8	0,7	84%
23/8	1/16	2,8	0,7	78%
47/16	1/16	2,8	0,7	65%
3	1/16	2,8	0,7	40%

*F = 4

Tabla 19. Datos para el Escalón de 0,1[in] de la Escalerilla Calibrada

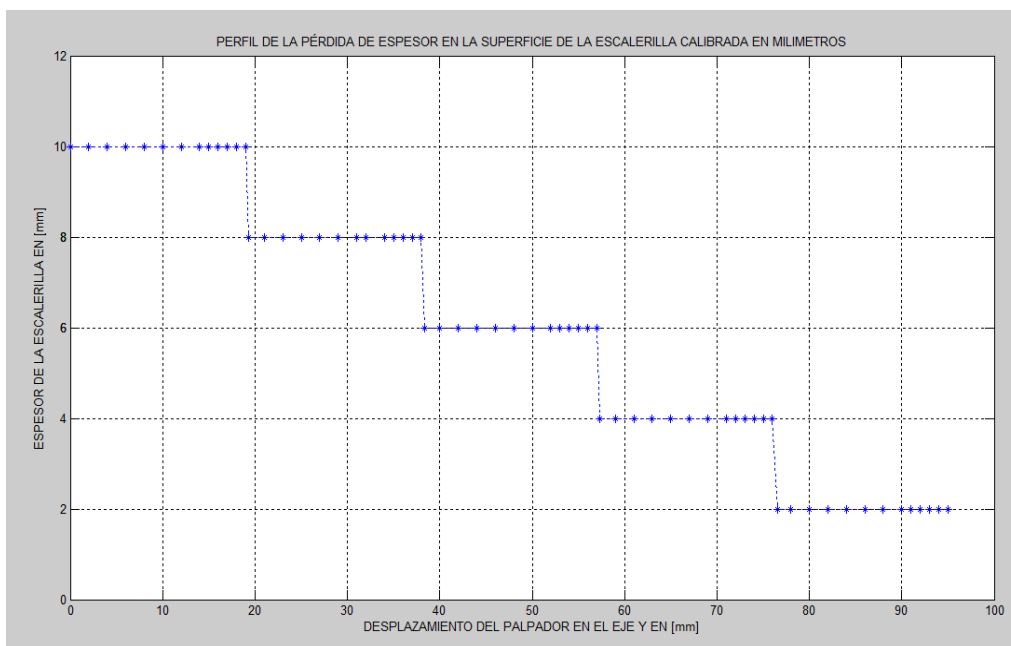
Escalerilla Calibrada en [in] ASTM E 797-05				
Escalón de 0,1 [in]				
Distancia recorrida en el eje Y [in]	Paso[in]	Posición de la columna de agua (Sa) [in]	Columna de agua (Sa/F)* [in]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua(Ha)
3,03	1/16	3,2	0,8	67%
49/16	1/16	3,2	0,8	78%
25/8	1/16	3,2	0,8	95%
51/16	1/16	3,2	0,8	100 %
13/4	1/16	3,2	0,8	100 %
53/16	1/16	3,2	0,8	100 %
27/8	1/16	3,2	0,8	100 %
55/16	1/16	3,2	0,8	100%
7/2	1/16	3,2	0,8	89%
57/16	1/16	3,2	0,8	72%
29/8	1/16	3,2	0,8	69%
59/16	1/16	3,2	0,8	53%
15/4	1/16	3,2	0,8	35%

En cada una de las tablas se aprecia que no hay variación del valor de la columna agua, durante el barrido hecho en cada uno de los escalones, el cambio de un escalón a otro muestra el aumento de 0.1 [in] en la columna de agua (pérdida de espesor en la superficie de la escalerilla entre escalones consecutivos).

4.2.2 Representación de la variación de espesores de piezas planas (escalerillas).

Los datos tabulados para cada una de las escalerillas, se introdujeron manualmente en el software MatLab (ver anexo F), con el fin de representar la variación de espesor de cada una de ellas. En la gráfica 4 se observa la variación de espesor en la superficie de la escalerilla calibrada en milímetros.

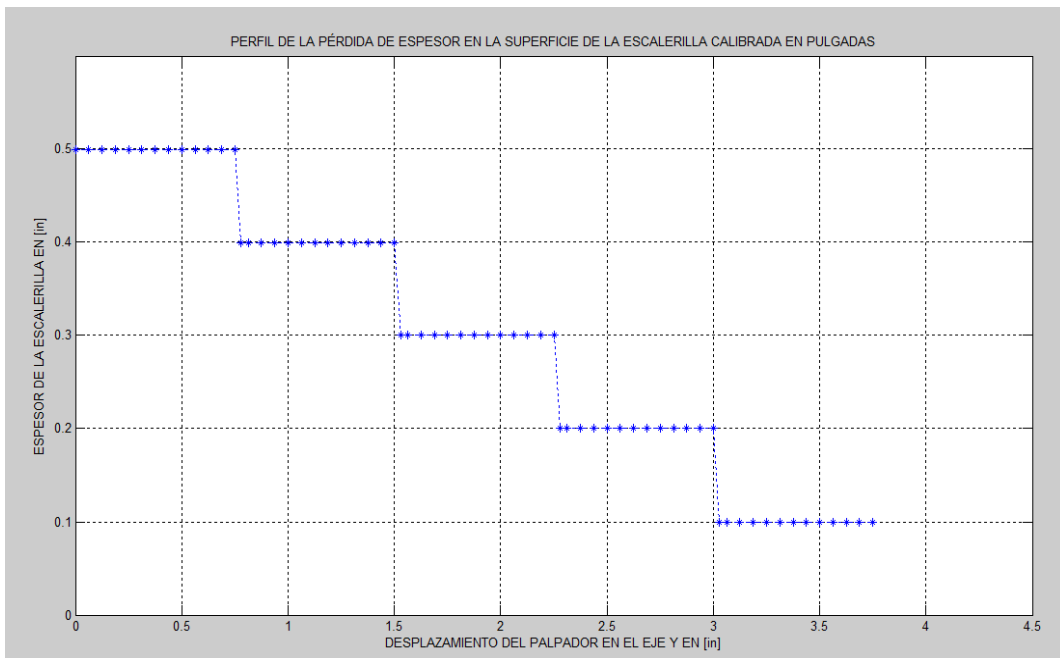
Gráfica 4. Perfil de la pérdida de espesor en la superficie de la escalerilla calibrada en [mm]



En la gráfica 4 se observa que los cinco escalones que conforman la escalerilla son detectados por medio de la técnica de ultrasonido por inmersión. Los puntos azules corresponden a los datos reales tomados del equipo de ultrasonido, permitiendo resolver pérdidas de espesor de 2[mm]. Además se observa que no se puede detectar con precisión el final e inicio de escalones consecutivos, esto se debe a que el diámetro del palpador utilizado es muy grande (0.187[in]). De lo anterior se puede apreciar la dificultad para resolver discontinuidades con ángulos de 90°.

En la gráfica 5 se observa la variación de espesor de la superficie de la escalerilla calibrada en pulgadas. A diferencia de la escalerilla milimetrada la pérdida de espesor entre escalones consecutivos es de 0.1 [in].

Gráfica 5. Perfil de la Pérdida de Espesor en la Superficie de la Escalerilla Calibrada en Pulgadas.



De la gráfica se puede establecer que las pérdidas para la escalerilla calibrada en pulgadas, fueron del orden del 20, 40, 60 y 80% del mayor espesor de la escalerilla.

4.2.3 Estimación de la pérdida de espesores en la superficie externa de una probeta tubular.

Una vez comprobada la detección de pérdidas de espesores en escalerillas calibradas, se procedió a la aplicación de la técnica de ultrasonido por inmersión para la estimación de la pérdida de espesor en la superficie de la probeta tubular y profundidad de los agujeros en la misma.

Así como se mencionó en el desarrollo de la metodología, la probeta tubular se sumergió dentro del sistema de inmersión y se procedió hacer la lectura de espesores.

Al igual que con las escalerillas, se determinó la distancia entre el palpador y la tubería (columna de agua) utilizando la ecuación 2.3.

$$D = (6.35) + (6/4) = 7,85[\text{mm}]$$

El espesor de la probeta tubular es de 6 [mm] por lo tanto, el valor obtenido de la columna de agua es de 7,85 [mm], dado que esta es la mínima distancia requerida para evitar interferencias, se asumió 10[mm] como la distancia de la trayectoria de agua para realizar las pruebas.

Una vez establecida la columna de agua se determinaron las condiciones de calibración del equipo ultrasónico, las cuales se presenta en la tabla 20.

Tabla 20. Características Principales de Calibración

VARIABLES	VALORES
Frecuencia	10 [MHz]
Ganancia	76.5 [dB]
Ganancia Fina	9[dB]
Rango	90 [mm]
Velocidad	5877 [m/s]
Retardo del Palpador	0,233 [μ s]
Retardo de la Pantalla	0[mm]
Amortiguamiento	Alto
Intensidad	Alto
Frecuencia de Repetición impulsos	1
Rechazo	11%
Tipo de Onda	1/2 Onda (+)
Tipo de Medición	Flanco

Al observar la tabla 20 se aprecia un incremento importante en la ganancia, comparado con los ensayos realizados con las escalerillas. Este aumento de la ganancia se realizó con el fin de compensar la atenuación de la señal debida especialmente a la rugosidad de la superficie y la curvatura de la probeta tubular. Al realizar estos incrementos de la ganancia se debió aumentar el rechazo para mejorar la visualización de señal en pantalla.

Para la adquisición de los datos de la probeta tubular, se tomaron los mismos criterios planteados con las escalerillas. Los resultados obtenidos en cada uno de los escalones se muestran en las tablas 21 a 25. En cada una de las tablas se aprecia la distancia total recorrida en el eje Y, el paso de desplazamiento, la posición de la columna de agua (S_a), el valor de la columna de agua y la altura en porcentaje del eco de la columna de agua (H_a). El valor de la columna de agua para cada escalón se determina dividiendo S_a/F , siendo F la relación entre las velocidades del acero y del agua, cuyo valor es 4.

Tabla 21. Datos para el Escalón de 6[mm] de la Probeta Tubular

Probeta Tubular				
Escalón de 6 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso [mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua [mm] (Sa/F)*	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
0	0	40,17	10.04	100 %
1	1	40,22	10.05	100 %
2	1	40,17	10.04	100 %
3	1	40,12	10.03	100 %
4	1	40,11	10.02	100 %
5	1	40,22	10.05	100 %
6	1	40,14	10.03	100 %
7	1	40,13	10.03	100 %
8	1	40,18	10.03	100%
9	1	40,12	10.03	94%
10	1	40,16	10.4	90%
11	1	40,21	10.05	88%
12	1	40,15	10.03	80%
13	1	40,14	10.03	78%
14	1	40,22	10.05	64%
15	1	40,11	10.02	56%

*F = 4

Tabla 22. Datos para el Escalón de 4,75[mm] de la Probeta Tubular

Probeta Tubular				
Escalón de 4,75 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso [mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua(Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
15,3	0,3	45	11,25	65%
16	1	44,88	11,22	78%
17	1	44,75	11,18	83%
18	1	44,82	11,20	93%
19	1	45,35	11,33	100%
20	1	44,94	11,23	100 %
21	1	45	11,25	100 %
22	1	45,42	11,35	100 %
23	1	44,94	11,23	100 %
24	1	45	11,25	100 %
25	1	44,96	11,24	100%
26	1	45,27	11,31	95%
27	1	44,85	11,21	84%
28	1	44,75	11,18	77%
29	1	44,73	11,18	62%
30	1	44,81	11,20	53%

*F = 4

Tabla 23. Datos para el Escalón de 3,5[mm] de la Probeta Tubular

Probeta Tubular				
Escalón de 3,5[mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
30.4	0,4	50,15	12,53	60%
31	1	49,77	12,44	73%
32	1	49,93	12,48	85%
33	1	50,27	12,56	92 %
34	1	50,16	12,54	97 %
35	1	48,96	12,24	99 %
36	1	50,32	12,58	100 %
37	1	50,34	12,58	100%
38	1	49,96	12,49	100%
39	1	49,87	12,46	98%
40	1	49, 95	12,48	87%
41	1	50,25	12,56	80%
42	1	49,83	12,45	75%
43	1	50,25	12,56	67%
44	1	48,98	12,24	53%
45	1	50,28	12,57	47%

*F = 4

Tabla 24. Datos para el Escalón de 2,5[mm] de la Probeta Tubular

Probeta Tubular				
Escalón de 2,5 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y[mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua (Sa/F)*	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
45,5	0,3	53,76	13,44	56%
46	1	53,89	13,47	64%
47	1	53,95	13,48	75%
48	1	54,13	13,53	88%
49	1	53,96	13,49	93%
50	1	54,11	13,52	98%
51	1	54,17	13,54	100%
52	1	54,13	13,53	100%
53	1	54,08	13,52	100%
54	1	53,73	13,43	97%
55	1	53,92	13,48	95%
56	1	54,13	13,53	88%
57	1	54,15	13,54	78%
58	1	53,78	13,44	67%
59	1	54,12	13,53	55%
60	1	54,13	13,53	44%

*F = 4

Tabla 25. Datos para el Escalón de 1,0[mm] de la Probeta Tubular

Probeta Tubular				
Escalón de 1,0 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua (Sa/F)*	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
60,3	0,6	59,98	15,99	58%
61	1	59,75	14,93	64%
62	1	59,77	14,94	71%
63	1	59,82	14,95	85%
64	1	59,84	14,96	92%
65	1	60,13	15,03	97%
66	2	60,19	15,04	100%
67	2	59,97	14,99	100%
68	1	60,7	15,01	100%
69	1	59,82	14,95	100%
70	1	59,77	14,94	98%
71	1	59,98	14,99	95%
72	1	60,14	14,03	89%
73	1	60,7	15,01	82%
74	1	60,15	15,03	71%
75	1	59,77	14,94	56%
76	1	59,36	14,84	48%
77	1	58,94	14,73	35%

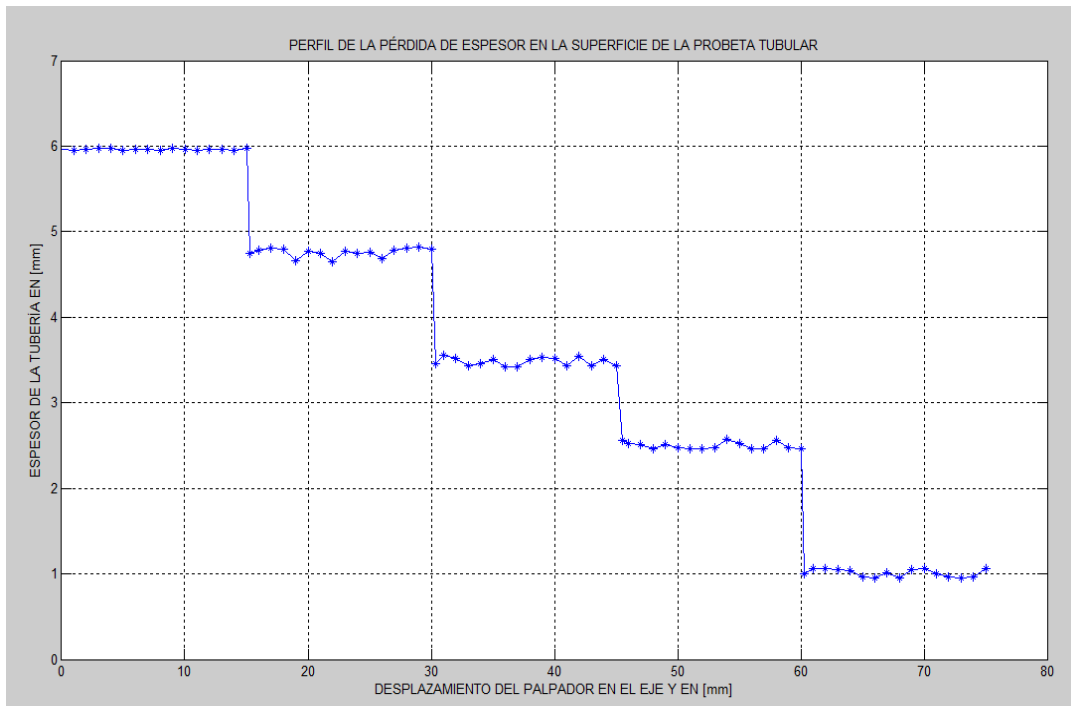
*F = 4

De las tablas se observa que en cada uno de los escalones hay pequeñas variaciones de la columna de agua, esto puede ser debido a defectos en el maquinado, que ocasiona variaciones en el espesor en la misma.

4.2.4 Representación de las variaciones del espesor en piezas tubulares.

Con los datos tabulados para cada uno de las escalones de la probeta tubular y utilizando el software MatLab (ver anexo F), se realizó la representación de la variación de espesor en la superficie de la misma. En la gráfica 6 se observa la variación de espesor de la superficie de la probeta tubular en función del desplazamiento del palpador en el eje Y

Gráfica 6. Perfil de la Pérdida de Espesor en la superficie de la probeta Tubular.



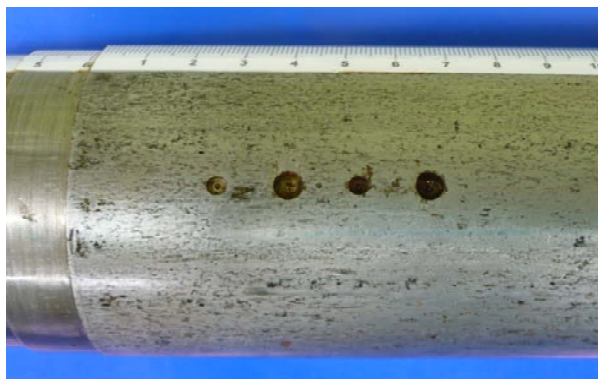
De la gráfica 6 se observa que la lectura de la pérdida de espesor para los escalones maquinados presenta mayores variaciones con respecto al primer escalón (superficie original del tubo). Al igual que en las escalerillas, también se presenta la dificultad al evaluar el final e inicio de cada escalón.

Las pérdidas de espesor obtenidas de la probeta tubular, son del orden del 20.83, 41.66, 58.33 y 83.33% del espesor nominal, respectivamente para cada paso.

4.2.5. Medición de la profundidad de los agujeros en la probeta tubular

Para analizar los agujeros sobre la tubería se tomo el mismo procedimiento anteriormente descrito. Las características de calibración del equipo fueron las mismas a diferencia de la ganancia y del rechazo, 82dB y 15%, respectivamente, con el fin de visualizar mejor las señales en la pantalla del equipo. Este aumento de ganancia se debe a que la señal de respuesta obtenida de los agujeros decae especialmente por la rugosidad, el diámetro de los agujeros y la curvatura de la tubería. En la fotografía 22 se observan los agujeros a evaluar.

Fotografía 22. Agujeros de la probeta tubular a evaluar.



La evaluación de la superficie se hace de forma continua incluyendo las zonas entre agujeros. Los datos correspondientes a las zonas intermedias no fueron tabulados ya que sus valores son similares a la tabla 26 y 31, pero si se tuvieron en cuenta para la representación del perfil. A continuación se presenta los datos obtenidos para cada uno de los agujeros, como se observa en las tablas 27 a 30.

Tabla 26. Datos para la superficie inicial sin agujero

Probeta Tubular Agujeros				
Espesor de 6 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua en (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
0	0	40,12	10.03	100 %
1	1	40,11	10.02	100 %
2	1	40,14	10.03	100 %
3	1	40,1	10.2	100 %
4	1	40,11	10.02	100 %
5	1	40,14	10.03	100 %
6	1	40,11	10.02	97%
7	1	40,12	10.03	90%
8	1	40,13	10.03	88%
9	1	40,12	10.03	78%
10	1	40,1	10.02	55%

*F = 4

Tabla 27 Datos del primer agujero D =.5 [mm]

Probeta Tubular Agujeros				
Primer agujero de un diámetro de 5[mm] y una profundidad de 4,35 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso [mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua en (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
11	1	57,04	14,26	48%
12	1	56,84	14,21	57%
13	1	56,94	14,23	62%
14	1	57,04	14,25	47%

*F = 4

Tabla 28. Datos del segundo agujero D =3.4 [mm].

Probeta Tubular Agujeros				
Segundo agujero de un diámetro de 3,4[mm] y una profundidad de 3,13 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso en [mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua en (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
27	1	52,52	13,13	55%
28	1	52,52	13,13	42%

*F = 4

Tabla 29. Datos del tercer agujero D= 5[mm]

Probeta Tubular Agujeros				
Tercer agujero de un diámetro de 5[mm] y una profundidad de 2,11 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua en (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
40	1	48,14	12,03	42%
41	1	48,04	12,01	57%
42	1	47,84	11,96	64%
43	1	48,14	12,03	40%

*F = 4

Tabla 30. Datos del cuarto agujero D = 3.4[mm]

Probeta Tubular Agujeros				
Cuarto agujero de un diámetro de 3,4[mm] y una profundidad de 1,18 [mm]				
Distancia recorrida en [mm]	Paso[mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua en (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
56	1	44,72	11,18	58%
57	1	44,72	11,18	43%

*F = 4

Tabla 31. Datos para la superficie final sin agujeros

Probeta Tubular				
Espesor de 6 [mm]				
Distancia recorrida en el eje Y [mm]	Paso [mm]	Posición de la columna de agua (Sa) [mm]	Columna de agua en (Sa/F)* [mm]	Altura en porcentaje del eco de la columna de agua (Ha)
58	0,3	40,12	10.03	78%
59	1	40,11	10.02	87%
60	1	40,13	10.03	95%
61	1	40,1	10.2	100%
62	1	40,11	10.02	100%
63	1	40,12	10.03	100%
64	2	40,11	10.02	100 %
65	2	40,12	10.03	100 %
66	1	40,13	10.03	100 %
67	1	40,12	10.03	100 %
67.4	1	40,1	10.2	100 %

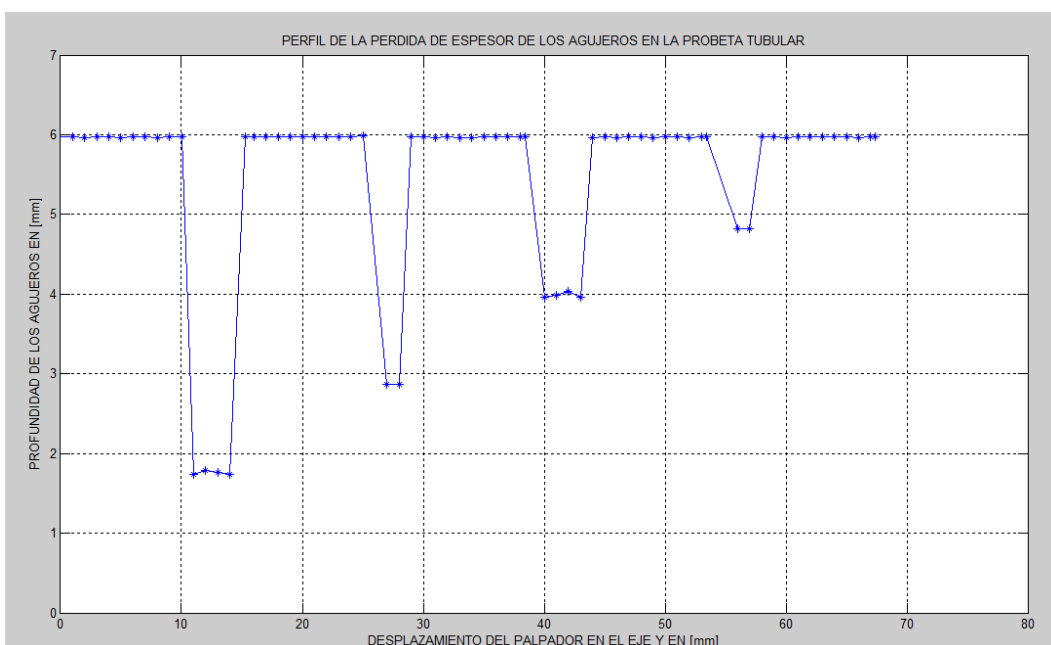
*F = 4

Las tablas 27 a la 30 permiten observar la evaluación de cada uno de los agujeros presentes en la probeta tubular. En los agujeros de 5[mm] de diámetro solamente se pudieron registrar cuatro datos, mientras que para los agujeros de 3.4 [mm] de diámetro solamente dos datos. Esto se debe a que el diámetro del palpador (0.187[in]), comparado con el diámetro de los agujeros, es muy grande y el frente de onda que entra a los agujeros es muy pequeño, ocasionando que el eco recibido sea muy débil.

4.2.6 Perfil para los agujeros de la probeta tubular

Con los datos tabulados para cada uno de los agujeros de la probeta tubular y utilizando el software MatLab (ver anexo F), se realizó la representación de la profundidad con respecto al desplazamiento del palpador como se observa en la gráfica 7.

Gráfica 7. Perfil de la pérdida de espesor debido a agujeros en la probeta tubular



De la gráfica 7 se puede observar la pérdida debida a la presencia de agujeros en la probeta tubular. Las profundidades de los agujeros medidos son del orden del 72.5, 52.16, 35.16 y 19.66 % del espesor nominal respectivamente.

4.3 VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Durante el desarrollo de esta investigación se recopilaron las respectivas lecturas de las pérdidas de espesor de las escalerillas y de la probeta tubular, así como las profundidades de los agujeros presentes en este último.

Las lecturas tomadas de las escalerillas por la técnica de ultrasonido por inmersión, muestran que los valores coinciden exactamente con los valores reales de los patrones estandarizados. Por lo tanto se infiere que la técnica aplicada tiene una alta aceptación en cuanto a la estimación de la pérdida de espesores en piezas planas lográndose detectar variaciones de hasta 2[mm].

En cuanto a la verificación de las lecturas de las pérdidas de espesor y las profundidades de los orificios de la probeta tubular, obtenidas por esta técnica ultrasónica, se realizó con base en las dimensiones tomadas directamente sobre el patrón real, utilizando un calibrador manual con resolución de 1/32[in].

Las diferencias encontradas en las medidas de estas características y el respectivo error calculado se presentan en la tabla 32 y 33.

Tabla 32. Comparación de las pérdidas de espesor obtenidas de la probeta tubular con respecto al plano de diseño

PÉRDIDA DE ESPESOR EN LA PROBETA TUBULAR			
ESCALÓN	MEDICIONES CON CALIBRADOR [mm]	LECTURAS TOMADAS DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO POR INMERSIÓN EN [mm]	PORCENTAJE DE ERROR
1	1.22	1.25	2.45%
2	2.52	2.5	0.79%
3	3.55	3.5	1.4%
4	4.97	5	0.60%

De acuerdo con la tabla 32 el porcentaje de error obtenido en las mediciones es menor o igual al 2.45%. Los menores errores corresponden a las zonas donde las pérdidas de espesor fueron mayores (83.3% del espesor nominal).

Tabla 33. Comparación de las lecturas de la profundidad de los agujeros con las obtenidas por ultrasonido.

PROFUNDIDAD DE LOS AGUJEROS EN LA PROBETA TUBULAR			
AGUJERO	MEDICIONES CON CALIBRADOR [mm]	LECTURAS TOMADAS DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO POR INMERSIÓN EN [mm]	PORCENTAJE DE ERROR
1	1.20	1.18	1.66%
2	2.14	2.11	1.4%
3	3.12	3.13	0.32%
4	4.33	4.35	0.46%

De la tabla 33 se aprecia que los errores en la medición de la profundidad de los agujeros son menores o iguales a 1.66%. Además se puede apreciar que los menores errores corresponden a las mediciones de mayor profundidad.

De lo mencionado anteriormente se puede concluir que la técnica de ultrasonido por inmersión en la detección de pérdidas de espesor en las superficie externa de piezas tanto planares como tubulares, permite resolver con mayor precisión pérdidas de espesor de hasta 2[mm]. Pérdidas menores a este valor aunque pueden ser detectadas el error en la medición son mayores.

5. CONCLUSIONES

- ✓ Mediante el desarrollo de esta investigación se pudo comprobar que la técnica de ultrasonido por inmersión, permite determinar cambios de espesor de hasta 2[mm] con buena precisión en piezas planas (escalerillas).
- ✓ La presente investigación permitió el diseño, construcción y puesta a punto de un sistema, para la realización de los ensayos de ultrasonido por inmersión, con el fin de estimar y cuantificar la pérdida de espesores en la superficie externas de piezas tubulares
- ✓ El sistema de inmersión diseñado, usado con el equipo KrautKramer USM 35 XS y el palpador de 10[MHz], seleccionado (menor diámetro y menor campo cercano), permitió identificar, cuantificar pérdidas de espesor y profundidad de discontinuidades externas aproximadamente, del orden del 20, 40, 60 y 80% del espesor nominal de la piezas ensayadas.
- ✓ El procedimiento implementado en el desarrollo de este trabajo de grado pudo establecer que las pérdidas de espesor en un material metálico, pueden ser estimadas a través de la medición de las variaciones en las columnas de aguas.
- ✓ Se pudo comprobar que la técnica de ultrasonido por inmersión es una herramienta adecuada en la determinación de las pérdidas de espesor en la superficie de las probetas tubulares, presentando menor error en la determinación de pérdida de espesores mayores al 20%.

- ✓ En la evaluación de la probeta tubular se pudo apreciar la influencia que presenta la condición superficial de la pieza, su geometría (cilíndrica en este caso), así como el tamaño de las discontinuidades (diámetro del agujero), en la determinación de las mediciones, debida a la atenuación sufrida por la señal ultrasónica.

- ✓ Empleando la técnica de ultrasonido por inmersión y con la ayuda del software MatLab, se pudo obtener el perfil de la superficie de las escalerillas y de la probeta tubular, pudiéndose estimar a partir de ella las pérdidas de espesor. Además de lo anterior se pudo evidenciar la dificultad para resolver con precisión los límites en los cambios de espesor. .

6. RECOMENDACIONES

- ✓ Diseñar una interfaz que permita establecer una comunicación directa con el equipo ultrasónico con el fin extraer la información de los ensayos realizados, para así almacenarla en el computador de forma ordenada, permitiendo visualizar el perfil de la pieza analizada directamente.
- ✓ Automatizar el dispositivo de desplazamiento del sistema de inmersión, con el fin de darle mayor continuidad y precisión a la toma de datos.
- ✓ Para determinar con un mayor grado de exactitud y precisión la profundidad de los agujero presentes en la probeta tubular, se recomienda la utilización de un palpador focalizado, esta clase de transductores concentran el haz ultrasónico en una pequeña región (punto o línea), obteniéndose así resultados más precisos.
- ✓ Para realizar las pruebas de inmersión en agua se recomienda: Recubrir la pieza con una capa delgada de esmalte acrílico, para evitar los daño por corrosión ocasionados por el agua ó agregarle al medio un inhibidor adecuado para que cumpla con la misma función.
- ✓ Continuar con este tipo de investigaciones analizando tuberías con diámetros y espesores, diferentes a los analizados y piezas con otras geometrías, para establecer los límites de evaluación confiable por medio de esta técnica.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Detection and Evaluation of Discontinuities by the Immersed Pulse-Echo Ultrasonic Method Using Longitudinal Waves. ASTM; 2006. 10p. ASTM E 1001-06.

_____. Standard Practice for Evaluating Performance Characteristics of Ultrasonic Pulse-Echo Testing Instruments and Systems without the Use of Electronic Measurements Instruments. ASTM; 2006. 13p. ASTM E 317-06a.

_____. Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials. ASTM; 2005. 13p. ASTM E 496-05.

_____. Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method. ASTM; 2005. 7p. ASTM E 797-05.

_____. Standard Guide for Measuring Some Electronic Characteristics of Ultrasonic Examinations Instruments. ASTM; 2000. 10p. ASTM E 1324-00 (Reapproved 2005).

_____. Standard Terminology for Nondestructive Examinations. ASTM; 2009. 33p. ASTM E 1316-09a.

_____. Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination by the Contact Method. ASTM; 1995. 5p. ASTM E 114 -95 (Reapproved 2005).

_____. Standard Practice for Ultrasonic Examination of Metal Pipe and Tubing. ASTM; 2004. 11p. ASTM E 213-04.

BARRERA 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.

BLITZ, Jack. Fundamentals of Ultrasonics. Second Edition. Department of Physic, Brunel University, London. 1967.

ECHEVARRÍA, Ricardo. Generalidades. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos no Destructivos. 2001. 12p.

_____. Defectología. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos no Destructivos. 2001. 55p.

_____. Ultrasonido. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos no Destructivos. 2001. 89p.

INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO. Curso Ultrasonido Nivel II. ECOPETROL. 1996. 3p.

FORERO, Edwin Francisco. Diseño de un prototipo para la medición de espesores usando ultrasonido. Trabajo de grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2005, 139p.

KRAUTKRAMER AND KRAUTKRAMER, Ultrasonic testing of materials.

MANUAL DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS. Universidad Nacional, Bogotá, Octubre 2002.

METALS HANDBOOK. Nondestructive Testing. Second Edition, chapter 8.1977

OLARTE, Leidy Cristina y VANEGAS, Diego Armando. Digitalización de Imágenes Radiográficas para la Identificación y Caracterización de Discontinuidades Superficiales Presentes en Tuberías de Acero. Trabajo de Grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2009, 150p.

RODULFO, R., AMEZOLA, R. “Implantación de Técnicas de Ultrasonido por Inmersión en la Inspección de Ensamblajes Automotrices”, Simposio de Metrología, Octubre de 2006, Ciudad de México.

SOCIEDAD DE INGENIEROS METALÚRGICOS DE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUÍA. Curso de Ultrasonido nivel II. Medellín, Marzo de 1995.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. ASME CODE PRESSURE PIPING, B31. ANSI/ASME B31G. 1984.

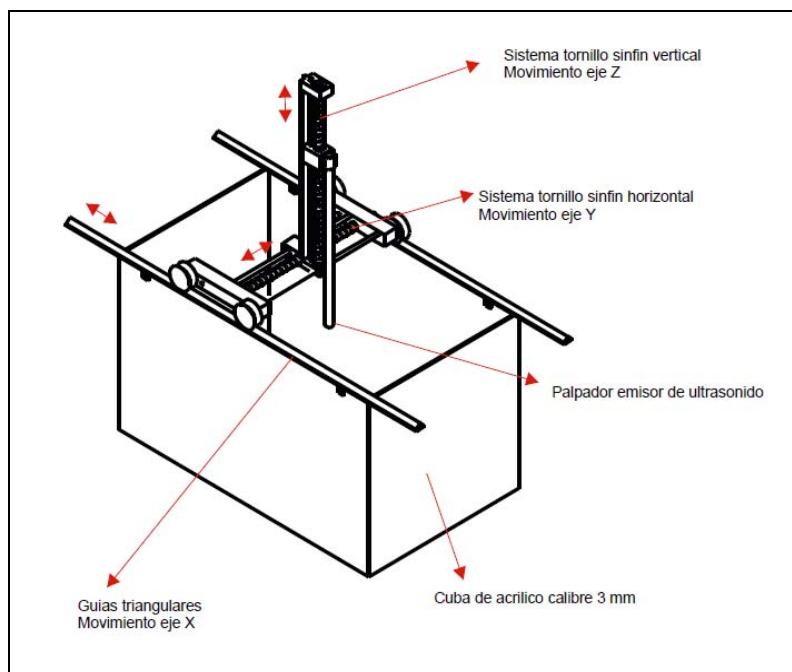
ANEXO A. PROPIEDADES ACUSTICAS DE LOS MATERIALES

PROPIEDADES ACUSTICAS DE LOS MATERIALES				
MATERIAL	VELOCIDAD LONGITUDINAL EN [m/s]	VELOCIDAD LONGITUDINAL EN [m/s]	DENSIDAD EN [g/cm ³]	IMPEDANCIA ACUSTICA EN [g/cm.s]10E5
AIRE A 20°C	343			
ALCOHOL	1180		0.789	0.930
BAKELITA	2590		2.71	17.2
COBRE	4660	2260	8.93	41.6
QUARZO	5570	3520	2.60	14.5
GLICERINA	1920		1.260	2.42
ORO	3240	1200	19.32	62.6
FUNDICIÓN	4800	2400	7.80	37.4
PLOMO	2160	700	11.4	24.6
MAGNESIO	6310		1.74	11.0
MOLIBDENO	6290	3350	10.2	64.2
MONEL	6020	2720	8.83	53.2
NIQUEL	5630	2960	88.8	50
NITROGENO A 20°C	350		1.16E-3	0.000406
OXIGENO A 20°C	328		1.32E-3	0.000433
PLUTONIO	1790			28.2
POTASIO	1860		0.818	1.5
QUARZO NATURAL	5750		2.65	15.2
PLATA	3600	1590	10.5	37.8
SODIO	2530		0.296	2.3
ACERO 302	5660	3120	8.03	45.4
ACERO 347	5740	3090	7.91	45.4
ACERO 410	7390	2990	7.67	56.7
ACERO 1020	5890	3240	7.71	45.4
ACERO 1095	5900	3190	7.80	46
TANTALIO	4100	2900	16.6	54.8
ESTAÑO	3320	1670	7.29	24.2
TITANIO	6070	3110	4.50	27.3
TUNGSTENO	5180	2870	19.25	99.7
URANIO	3380	1960		64
AGUA A 20°C	1483		1	1.483
ZINC	4170	2410	7.10	29.6
ZIRCONIO	4650	2250	6.48	30.1

ANEXO B. PLANOS DEL SISTEMA DE INMERSIÓN CON MOVIMIENTOS EN LOS EJES X, Y, Z.

En este anexo se presentan el esquema general del sistema de Inmersión (1) y las vistas principales: Vista Frontal (2), Vista Lateral derecha (3) y vista superior (4). (Escala 1:10 y la medida en [mm])

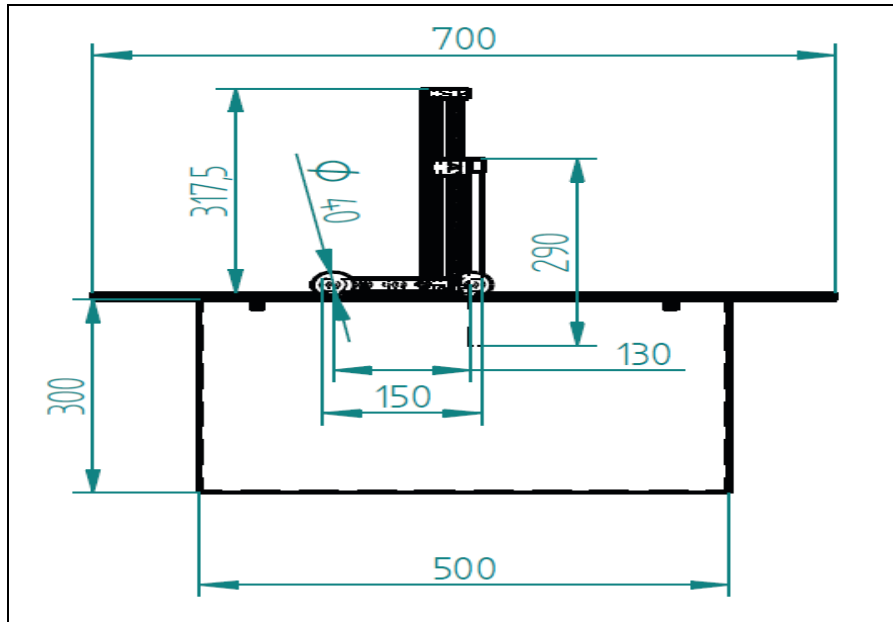
(1) ESQUEMA GENERAL



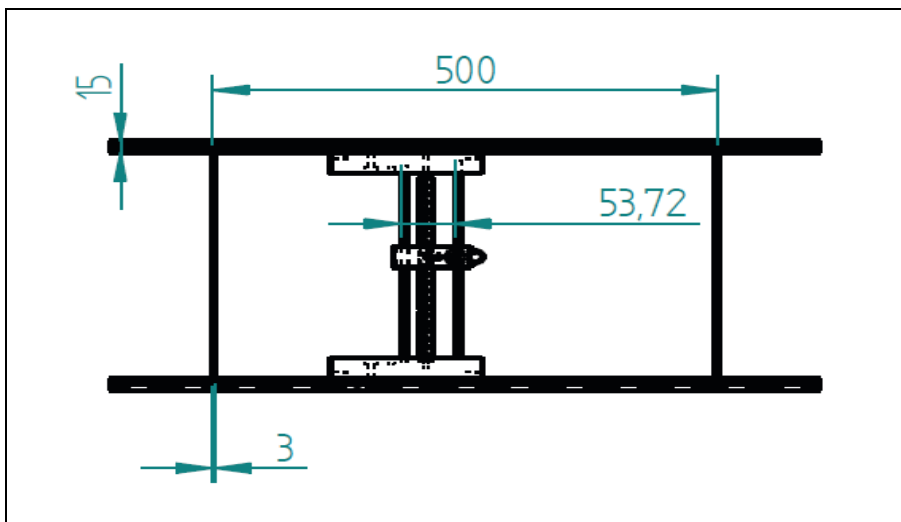
Parte que componen el sistema

- ✓ Cuba de Acrílico de Calibre 6[mm]
- ✓ 2 Tornillos de Acero Inoxidables de $\frac{1}{4}$ [in]
- ✓ 2 Varillas de Acero HR Cuadrados de $\frac{1}{2}$ [in]
- ✓ 2 Varillas de Acero Inoxidables de $\frac{1}{4}$ [in]
- ✓ 1 Tubo de Acero Inoxidable $\frac{3}{8}$ [in]
- ✓ 4 Discos de Acero HR
- ✓ 8 Rodamientos KOYO $\frac{3}{8}$ [in]

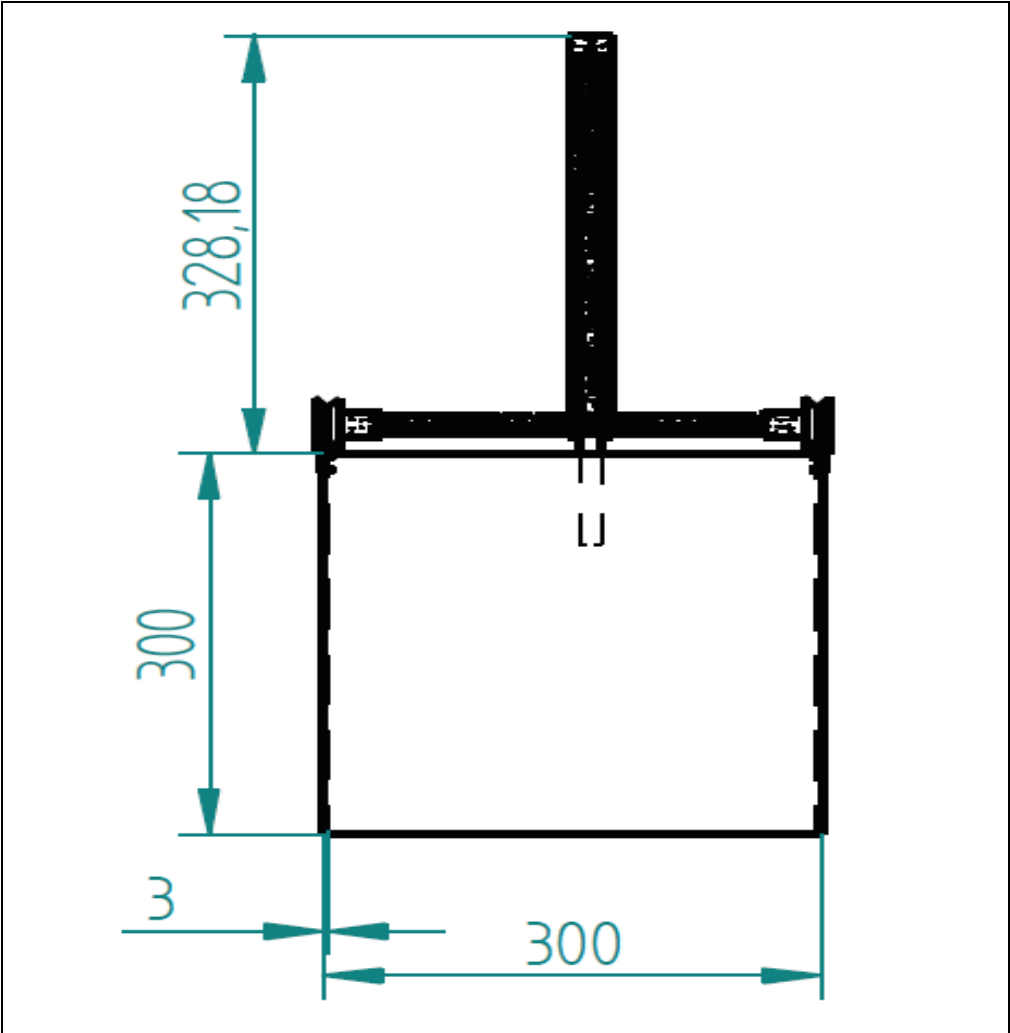
(2) VISTA FRONTAL



(3) VISTA SUPERIOR



(4) VISTA LATERAL



ANEXO C. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE LOS SISTEMAS DE INSPECCIÓN ULTRASÓNICA PULSO-ECO¹⁴.

Linealidad y Límite Horizontal

Procedimiento

1. Asegúrese de que el control de rechazo este completamente apagado.
2. Acople un palpador de haz longitudinal sobre el espesor del bloque IIW y ajustar convenientemente los controles para obtener once reflexiones de pared posterior sin interferencia.
3. Con el control de Retardo de Barrido (Delay) coloque la primera RPP en cero de la RPP, sin importar que el pulso inicial sea desplazado fuera de la pantalla.
4. Con el control de la ganancia, ajuste la tercera RPP al 50% de amplitud y con el control de retardo posicónela en el 20% de la escala horizontal de la pantalla.
5. Enseguida, incremente el control de ganancia hasta que la amplitud de la novena RPP sea igual al 50% y con el control de la longitud de barrido colóquela en el 80% de la escala horizontal de la pantalla.
6. Repita lo indicado en el ítem 4y 5 hasta que la tercera y novena RPP estén posicionadas en el 20% y 80% de la escala horizontal de la pantalla.
7. Lea y registre en por ciento (%) la posición de cada RPP sobre la escala horizontal de la pantalla, iniciando por la indicación que se encuentre en el 10% de la escala horizontal de la pantalla. Antes de leer la posición de cada indicación, primero debe ajustarse su amplitud al 50%.

¹⁴ JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

Interpretación de datos de Linealidad y Límite Horizontal

- 1 El límite horizontal es representado por la longitud máxima del trazo obtenido sobre la pantalla, expresado en unidades lineales (pulgadas o milímetros) o en % de la escala horizontal de la pantalla. Si se presentan fallas para obtener deflexión en la totalidad de la escala, esto podría indicar un mal funcionamiento del equipo.
- 2 La linealidad horizontal representa la relación constante entre incrementos de desplazamiento horizontal de las indicaciones y el incremento del tiempo requerido de las ondas reflejadas al pasar a través de un medio de longitud conocida y con buena permeabilidad sónica.
- 3 Los resultados de la prueba deben ser representados en forma tabular y gráfica (número de RPP vs Lectura de señal en % de escala total sobre la línea de barrido). La desviación es dada por el desplazamiento, en % de escala total, desde la línea recta que representa la linealidad ideal trazada a través de los puntos de ajuste (tercera RPP al 20% de la escala horizontal de la pantalla y novena RPP al 80% de la escala horizontal de la pantalla).
- 4 La desviación máxima de linealidad es la representada por la lectura que mayor desviación tenga.
- 5 El rango lineal es dado en % y está comprendido por el número de lecturas contiguas que caen completamente dentro de la tolerancia específica, ejemplo de 0 a 100% de 20 a 80% etc.

Linealidad y Límite Vertical

Procedimiento

1. Acople un palpador de haz longitudinal sobre el bloque IIW dirigiendo el haz hacia la muesca que representa tres espesores. Ajuste los controles

convenientes para distinguir con claridad al menos dos señales. Mantener una precisión constante en el palpador para evitar variaciones de amplitud.

2. Coloque las señales ligeramente a la izquierda de la división No 5 de la escala horizontal de la pantalla, sin importar que el pulso inicial sea desplazado fuera de la pantalla.
3. Ajuste las amplitudes de las dos primeras señales de tal forma que tengan una relación 2:1. Las dos indicaciones serán referidas como H_A y H_B (H_A es la mayor amplitud). Ajuste H_A al 60% y H_B al 30% de la altura total de la pantalla, como se indica en la figura 12.
4. Sin mover el palpador, con el control de la ganancia ajuste sucesivamente H_A desde 100% al 20% de la altura total de la pantalla, en incrementos de 10% o en pasos de 2 decibeles, si el instrumento no cuenta con un control de ganancia fino.
5. En cada ajuste de la indicación H_A , lea y registre la amplitud correspondiente de la indicación H_B .

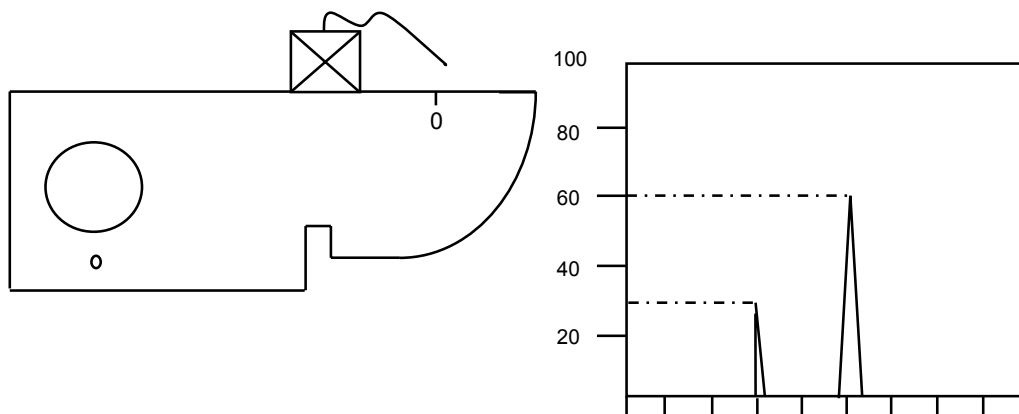
Interpretación de datos de Linealidad y Límite Vertical

1. El límite vertical es el nivel máximo leído de una indicación vertical dentro del rango usado, determinado por el límite físico o eléctrico. Si se presentan fallas para obtener deflexiones en el total de la escala, eso podría indicar un mal funcionamiento del equipo.
2. La linealidad vertical es la relación constante entre la amplitud de las indicaciones y la magnitud correspondiente de las ondas ultrasónicas reflejadas desde reflectores de tamaño conocido.
3. El rango lineal es determinado por la interconexión de puntos de datos adyacentes, observando su localización superior e inferior entre las líneas límite de intercepción. El límite de linealidad superior es dado por el valor

correspondiente de la indicación H_A y el límite inferior por el valor correspondiente de la indicación H_B .

4. Los resultados de la prueba deben ser representados en forma tabular y gráfica (% de la indicación H_A vs % de indicación H_B , del total de la pantalla). Las líneas límites trazadas a los costados de la recta que representa la linealidad ideal, proporciona una tolerancia graduada para H_B de $\pm 1\%$ en el punto de ajuste central, $H_A = 60\%$ y $H_B = 30\%$ en los extremos la tolerancia es del $\pm 6\%$. Estas tolerancias son marcadas por la norma ASTM E-317.

Figura 12. Representación de la relación 2:1 para la linealidad y limite vertical



Linealidad de Control de Ganancia

Procedimiento

1. Para verificar la exactitud del control de amplitud del instrumento ultrasónico, acople el palpador sobre el bloque IIW, como se muestra en la figura 13. Maximice la indicación proveniente del barreno de 0.060" de diámetro.
2. Con los incrementos y decrementos en decibeles mostrados en la tabla 34 para cada uno de los ajustes de amplitud registrados de la indicación

proveniente del barreno de 0.060 de diámetro, la amplitud resultante debe caer dentro de los límites específicos.

3. Los ajustes y lecturas deben ser estimados con una precisión de ± 1 del total de la pantalla.
4. Los resultados de la prueba deben ser registrados y evaluados contra los límites de amplitud indicados en la tabla 34.

Tabla 34 Código ANSI/ASME BPV, sección V, artículo 4, edición 2004

Ajuste inicial de la indicación en % del total de la pantalla	Cambio en el control de la ganancia en dB	Límite de amplitud en % del total de la pantalla
80%	-6	32 a 48% Nominal 40
80%	-12	16 a 24% Nominal 20
40%	6	64 a 96% Nominal 80
20%	-12	64 a 96% Nominal 80

FUENTE: Japan International Cooperation Agency” (JICA).

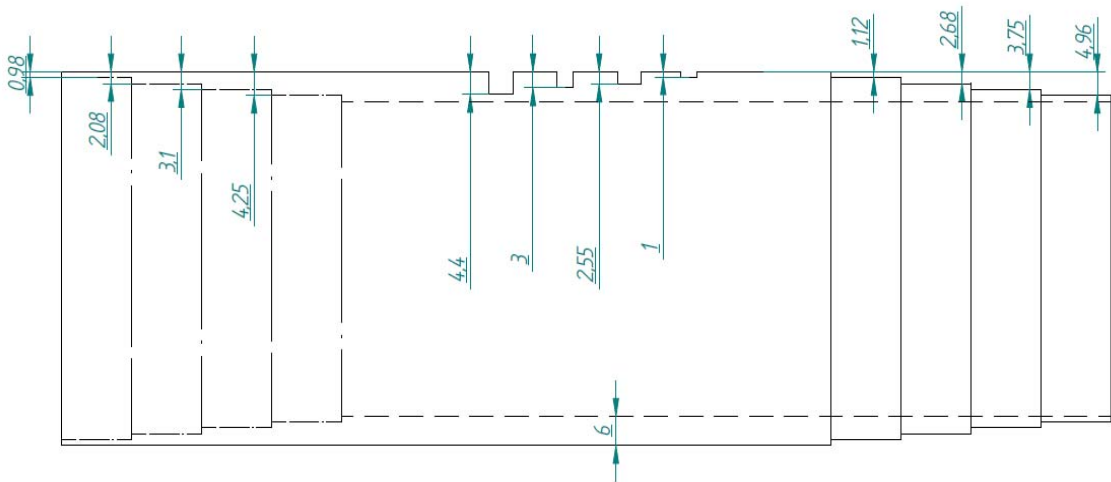
Figura 13. Palpador sobre el bloque IIW justo en el barreno de 0.060”



ANEXO D. PLANOS DE LA PROBETA TUBULAR.

VISTA PRINCIPALES DE LA PROBETA TUBULAR

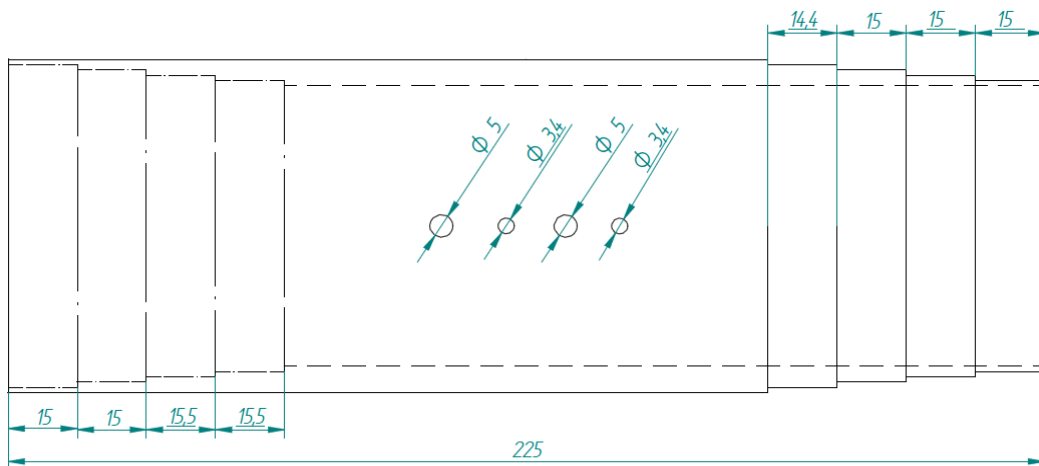
VISTA LATERAL



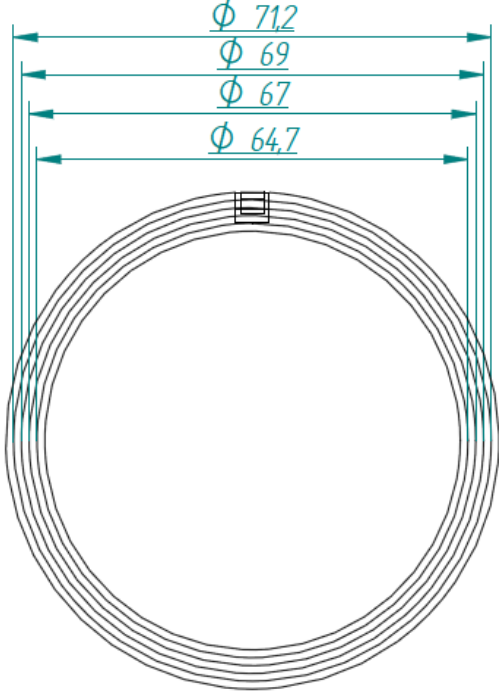
Medidas en [mm]

Tubería fabricada en Acero ASTM A 53.

VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



ANEXO E. PROGRAMACIÓN EN MATLAB (MATRIZ LABORATORY) PARA LA VISUALIZACIÓN DE LOS PERFILES

CODIGO PARA LA ESCALERILLA CALIBRADA EN MILIMETROS

```
%%ESCALERILLA EN MILIMETRADA
%Desplazamientos es x
close all
clear all
clc
CA=40; % Columna de agua. Palpador a superficie de la Escalerilla.
CAmm=CA/4;
EN=10 %Espesor nominal de la Escalerilla en [mm]
%X1a X5 corresponden a los desplazamientos en cada paso en el eje Y[mm]
X1=[0 2 4 6 8 10 12 14 15 16 17 18 19];
X2=[19.3 21 23 25 27 29 31 32 34 35 36 37 38];
X3=[38.4 40 42 44 46 48 50 52 53 54 55 56 57];
X4=[57.3 59 61 63 65 67 69 71 72 73 74 75 76];
X5=[76.6 78 80 82 84 86 88 90 91 92 93 94 95];
%Y1a Y5 corresponden a las profundidades de la columna de agua en cada
paso[mm]
Y1=[40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40 40];
Y2=[48 48 48 48 48 48 48 48 48 48 48 48 48];
Y3=[56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56];
Y4=[64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64];
Y5=[72 72 72 72 72 72 72 72 72 72 72 72 72];

X=[X1,X2,X3,X4,X5];
Y=[Y1,Y2,Y3,Y4,Y5];
Yr=80-Y;
plot(X,Yr,'*'); %Columna de agua
grid on
figure
E= (Yr/4)-(CAmm - EN); %Espesor de la tubería
plot(X,E,'*')
grid on
```

CODIGO PARA LA ESCALERILLA CALIBRADA EN PULGADAS

```
%%ESCALERILLA EN PULGADAS
%Desplazamientos es x
close all
clear all
clc
CA=1.6; % Columna de agua. Palpador a superficie de la Escalerilla.
CAmm=CA/4;
EN=0.5 %Espesor nominal de la Escalerilla en [in]

X1=[0 0.0625 0.125 0.1875 0.25 0.3125 0.375 0.4375 0.5 0.5625 0.625
0.6875 0.75];
X2=[0.78 0.8125 0.875 0.9375 1 1.0625 1.125 1.1875 1.25 1.3125 1.375
1.4375 1.5];
X3=[1.53 1.5625 1.625 1.6875 1.75 1.8125 1.875 1.9375 2 2.0625 2.125
2.1875 2.25];
X4=[2.28 2.3125 2.375 2.4375 2.5 2.5625 2.625 2.6875 2.75 2.8125 2.875
2.9375 3];
X5=[3.03 3.0625 3.125 3.1875 3.25 3.3125 3.375 3.4375 3.5 3.5625 3.625
3.6875 3.75];

Y1=[1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6];
Y2=[2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2];
Y3=[2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4];
Y4=[2.8 2.8 2.8 2.8 2.8 2.8 2.8 2.8 2.8 2.8 2.8 2.8 2.8];
Y5=[3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2];

X=[X1,X2,X3,X4,X5];
Y=[Y1,Y2,Y3,Y4,Y5];
Yr=3.6-Y;
plot(X,Yr,'*'); %Columna de agua
grid on
figure
E= (Yr/4); %Espesor de la tubería
plot(X,E,'*')
grid on
```

CODIGO PARA LA PROBETA TUBULAR

```
%%PROBETA TUBULAR
%Desplazamientos es x
close all
clear all
clc
CA=40; % Columna de agua. Palpador a superficie de la tubería.
CAmm=CA/4;
EN=6 %Espesor nominal de la tubería en mm

X1=[0:1:15];
X2=[15.3 , 16:1:30];
X3=[30.4, 31:1:45];
X4=[45.5, 46:1:60];
X5=[60.3, 61:1:75];

Y1=[40.17 40.22 40.17 40.12 40.11 40.22 40.14 40.13 40.18 40.12 40.16
40.21 40.15 40.14 40.22 40.11];
Y2=[45 44.88 44.75 44.82 45.35 44.94 45 45.42 44.94 45 44.96 45.27 44.85
44.75 44.73 44.81];
Y3=[50.15 49.77 49.93 50.27 50.16 49.96 50.32 50.34 49.96 49.87 49.95
50.25 49.83 50.25 49.98 50.28];
Y4=[53.76 53.89 53.95 54.13 53.96 54.11 54.17 54.13 54.08 53.73 53.92
54.13 54.15 53.78 54.12 54.13];
Y5=[59.98 59.75 59.77 59.82 59.84 60.13 60.19 59.97 60.17 59.82 59.77
59.98 60.14 60.17 60.15 59.77];

X=[X1,X2,X3,X4,X5];
Y=[Y1,Y2,Y3,Y4,Y5];
Yr=80-Y;
plot(X,Yr, '*'); %Columna de agua
grid on
figure
E= (Yr/4)-(CAmm - EN); %Espesor de la tubería
plot(X,E, '*')
grid on
```

CODIGO PARA LOS AGUJEROS EN LA PROBETA TUBULAR

```
%%AGUJEROS EN LA PROBETA TUBULAR
%Desplazamientos es x
close all
clear all
clc
CA=40; % Columna de agua. Palpador a superficie de la tubería.
CAmm=CA/4;
EN=6 %Espesor nominal de la tubería en mm

X1=[0:1:10];
X2=[11:1:14];
X3=[15.3, 16:1:25];
X4=[27:1:28];
X5=[29:1:38, 38.4];
X6=[40:1:43];
X7=[44:1:53, 53.4];
X8=[56:1:57];
X9=[58:1:67, 67.4];

Y1=[40.12 40.11 40.14 40.1 40.11 40.14 40.11 40.12 40.13 40.12 40.1];
Y2=[57.04 56.84 56.94 57.04];
Y3=[40.09 40.11 40.1 40.1 40.11 40.12 40.11 40.1 40.1 40.12 40.07];
Y4=[52.52 52.52];
Y5=[40.1 40.11 40.14 40.1 40.14 40.13 40.11 40.12 40.12 40.11 40.1];
Y6=[48.14 48.04 47.84 48.14];
Y7=[40.15 40.11 40.14 40.1 40.11 40.14 40.11 40.12 40.13 40.12 40.1];
Y8=[44.72 44.72]
Y9=[40.12 40.11 40.13 40.1 40.11 40.12 40.11 40.12 40.13 40.12 40.1];

X=[X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9];
Y=[Y1,Y2,Y3,Y4,Y5,Y6,Y7,Y8,Y9];
Yr=80-Y;
plot(X,Yr,'*'); %Columna de agua
grid on
figure
E=(Yr/4)-(CAmm - EN); %Espesor de la tubería
plot(X,E,'*')
grid on
```