



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación de la capacidad de detección del procedimiento de ultrasonido del código AWS D1.5 para examinar puentes vehiculares mediante reflectores artificiales**

**Paula Andrea Cortés Arias**

Ingeniera Mecánica

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica  
Medellín, Colombia  
2021



**Evaluación de la capacidad de detección del  
procedimiento de ultrasonido del código AWS  
D1.5 para examinar puentes vehiculares  
mediante reflectores artificiales**

**Evaluation of the detection capability of the ultrasound  
procedure in the AWS D1.5 code to examine highway  
bridges using artificial reflectors**

**Paula Andrea Cortés Arias**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ingeniería Mecánica**

Director (a):

Magister en Ingeniería de Materiales y procesos, Jorge Enrique Giraldo Barrada

Línea de Investigación:

Detección de discontinuidades en puentes mediante ultrasonido pulso-eco

Grupo de Investigación:

Grupo de Soldadura

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2021



*“If you´re always trying to be normal you will never know how amazing you can be”.*

*Marguerite Annie Johnson (Maya Angelou)*



## **Agradecimientos**

Le agradezco enormemente al profesor Jorge Enrique Giraldo Barrada de la Universidad Nacional de Colombia, por su entrega y disposición para llevar a cabo esta investigación, la cual surgió como una pregunta de mi labor como ingeniera en Integral S.A. Su gran apoyo y motivación permitieron terminar este estudio con gran satisfacción.

A Integral S.A, mediante la cual obtuve la inspiración para obtener la idea de esta investigación.

También le agradezco a mi madre Claudia Patricia Arias Ospina quien siempre ha estado a mi lado y me ha dado motivos para seguir avanzando sin pausa en mi necesidad por aprender.

Finalmente a Industrias HRV que logró, con mucho esfuerzo, generar los reflectores artificiales requeridos.



## Resumen

El presente estudio se enfocó en determinar de forma cuantitativa la capacidad de detección y evaluación del método de ultrasonido (con un enfoque en amplitud del eco) de la Sociedad Americana de Soldadura para el examen de puentes y edificaciones soldadas. Antes de abordar la parte experimental se llevó a cabo análisis del estado del arte del origen de este procedimiento y de las críticas que se le han realizado a lo largo de casi sesenta años de uso en los Estados Unidos.

Se hicieron tres experimentos (0, 1 y 2) que consistían en el examen de bloques de acero ASTM A709 Gr. 50W, empleado en puentes, a los que se introdujeron dos tipos de reflectores artificiales planares (NTH y FBH) y un tipo de reflector volumétrico (SDH) ubicado en dos posiciones del espesor, de cuatro tamaños (0.5 mm, 1.0 mm, 3.0 mm y 5 mm). Los bloques fueron examinados con un equipo de ultrasonido pulso-eco, de forma manual, siguiendo la técnica prescriptiva del procedimiento de la AWS (Experimento 0) y alterando dos características que podrían influir en la capacidad de detección del procedimiento: el tamaño del cristal (experimento 1) y la frecuencia (Experimento 2). Los datos también se obtuvieron con variaciones en el ángulo de incidencia (45°, 60° y 70°). Se hicieron ocho mediciones (dos distancias del sonido, dos niveles de escaneo y dos ensayos) por cada tipo y tamaño de reflector dando como resultado 1224 datos.

Entre los resultados más importantes se encuentra que, aunque el procedimiento prescriptivo de la AWS tiene una buena capacidad de detección que se mantiene con las modificaciones de frecuencia y tamaño del cristal; el procedimiento presenta una mala capacidad de evaluación de los reflectores (sin importar su tamaño o tipo), que se evidencia en su incapacidad de generar respuestas (*índice de la indicación*) diferenciales por tamaño de reflector y en su tendencia a que todos los tipos de reflectores se clasifiquen como inocuos para la estructura (Clase D).

Esta incapacidad de evaluación del procedimiento lo limita para su uso en análisis de ingeniería tipo *Fitness for service* o *Engineering Critical Assessment* requeridos en evaluaciones cuantitativas del estado de las estructuras en servicio como puentes, y que se están volviendo de vital importancia en la actualidad.

### Palabras clave:

**ultrasonido, puentes, pulso-eco, reflectores artificiales, índice de la indicación, soldadura, altura del eco.**

## Abstract

This study was focused on determining, quantitatively, the capacity of detection and evaluation of the ultrasonic methodology (with an echo amplitude approach) of the American Welding Society for the examination of welded bridges and buildings. Before approaching the experimental part, was carried out an analysis of the state of the art of the origin of this ultrasonic procedure, that includes the criticisms that have been made, over almost sixty years of use in the United States.

Three experiments (0, 1 and 2) were performed, consisting of the examination of ASTM A709 Gr. 50W steel blocks, used in bridges, to which two types of planar artificial reflectors (NTH and FBH) and one type of volumetric reflector (SDH) located at two positions through thickness were fabricated in four sizes (0.5 mm, 1.0 mm, 3.0 mm, and 5 mm). The blocks were manually examined with pulse-echo ultrasound equipment following the prescribed method of the AWS procedure (Experiment 0) and altering two characteristics that could influence the detection capability of the procedure: crystal size (Experiment 1) and frequency (Experiment 2). Data were also obtained with variations in the angle of incidence (45°, 60° and 70°). Eight measurements (two sound distances, two scanning levels and two trials) were made for each type and size of the reflector resulting in 1224 data.

Among the most important results is that, although the prescriptive procedure has a good detection capability and this isn't altered (in a big way) with changes in frequency and crystal size. But nevertheless, the procedure has a poor ability to evaluate the reflectors (regardless of its size or type). This is exposed for example in that it is unable to generate differential responses (indication rating) by size; and also presents a high tendency for reflectors to be classified as harmless to the structure or not severe (Class D) without an increase in the size or a change in the shape of the reflector to avoid it.

This inability of the AWS procedure to evaluate discontinuities, limits its use in engineering analyses such as *Fitness for Service* or *Engineering Critical Assessment* required in quantitative evaluations of the condition of structures in service like bridges, which are becoming very important in the actuality.

### Keywords:

***Ultrasound, bridges, pulse-echo, artificial reflectors, indication rating, weld, echo height.***

# Contenido

	Pág.
<b>1. MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>4</b>
1.1 GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	4
1.1.1 ¿Qué es una discontinuidad? .....	4
1.1.2 ¿Qué son los ensayos no destructivos?.....	4
1.1.3 Técnicas de ENDs.....	5
1.1.4 Métodos de ensayos no destructivos (END).....	6
1.1.5 Aplicaciones de los ensayos no destructivos.....	7
1.1.5.1 Control de calidad de las estructuras.....	7
1.1.5.2 Determinación de propiedades de los materiales .....	8
1.2 LA CIENCIA DEL ULTRASONIDO.....	9
1.2.1 ¿Qué es el ultrasonido? .....	9
1.2.2 Conceptos generales de ondas y sus características .....	9
1.2.3 Reflexión y refracción: Ley de Snell.....	12
1.2.4 Campo ultrasónico de los transductores convencionales .....	14
1.2.5 Atenuación de las ondas.....	15
1.3 TÉCNICAS DE ULTRASONIDO Y PRESENTACIÓN DE DATOS .....	16
1.3.1 Técnicas de reflexión.....	16
1.3.1.1 Conceptos generales.....	16
1.3.1.2 El equipo de ultrasonido.....	16
1.3.1.3 Los palpadores.....	17
1.3.1.4 Características de los transductores.....	18
1.3.1.5 Presentación de los datos.....	19
1.3.2 Técnicas de transmisión.....	19
1.4 MÉTODOS PARA EVALUAR LAS DISCONTINUIDADES SCAN A.....	20
1.4.1 Reflectores artificiales usados en la calibración del sistema ultrasónico .....	20
1.4.2 Algunos bloques de calibración.....	22
1.5 DISCONTINUIDADES EN SOLDADURAS.....	22
1.5.1 Origen de las discontinuidades en soldadura .....	22
1.5.2 Algunos tipos de discontinuidades en soldaduras.....	23
1.5.2.1 Porosidad.....	23
1.5.2.2 Inclusiones de escoria .....	23
1.5.2.3 Faltas de fusión y falta de penetración.....	23
1.5.2.4 Socavaduras .....	24
1.5.2.5 Grietas .....	24
1.5.3 Clasificación de discontinuidades por mecánica de fracturas.....	24
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>25</b>
2.1 EL EXAMEN DE PUENTES CON UT EN ESTADOS UNIDOS.....	25
2.1.1 El primer procedimiento de UT de la AWS .....	25

2.1.1.1	Calificación del sistema y calibración para el examen.....	26
2.1.1.2	Examen de las soldaduras .....	27
2.1.1.3	Evaluación de la indicación .....	29
2.1.2	La Benthel Steel Corporation y el procedimiento de UT de la AWS .....	30
2.1.2.1	La BSC y el ultrasonido en puentes .....	30
2.1.2.2	Técnica operativa .....	30
2.1.2.3	Evaluación de las discontinuidades .....	31
2.1.3	Cambios en el procedimiento de UT de la AWS entre 1972 y 1983.....	32
2.1.4	Procedimiento de UT del AWS D1.5 Bridge Welding Code .....	34
2.2	CUESTIONAMIENTOS AL PROCEDIMIENTO DE LA AWS .....	36
2.2.1	La amplitud del eco como parámetro de detección y evaluación de discontinuidades .....	36
2.2.1.1	La amplitud del eco y la severidad de la discontinuidad .....	37
2.2.1.2	Los reflectores artificiales y las discontinuidades de soldadura .....	41
2.2.1.3	Estimación de la longitud de la discontinuidad con la caída de 6 dB... 44	
2.2.1.4	Atenuación del sonido lineal (2 dB/in) .....	46
2.2.2	Técnica operativa del procedimiento y sus limitaciones .....	48
2.2.2.1	Técnica operativa .....	48
2.2.2.2	Claridad del procedimiento y variabilidad de los resultados .....	49
2.3	INTERPRETACIÓN DE LA FORMA DEL ECO.....	49
2.4	ANÁLISIS FINAL DEL ESTADO DEL ARTE Y SU RELACIÓN CON LA INVESTIGACIÓN .....	51
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>53</b>
3.1	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	53
3.1.1	Experimentos con reflectores artificiales .....	53
3.1.1.1	Experimento inicial (Objetivo 1) .....	53
3.1.1.2	Experimentos “uno” y “dos” (Objetivo 2 y Objetivo 3).....	54
3.1.1.3	Suposiciones experimentales .....	55
3.1.2	Atenuación en el material.....	56
3.1.3	Experimento con discontinuidades reales .....	56
3.2	EQUIPOS Y ACCESORIOS UTILIZADOS.....	57
3.2.1	Equipo de ultrasonido .....	57
3.2.2	Palpadores ultrasónicos .....	57
3.2.3	Bloques empleados en la fase experimental .....	59
3.2.3.1	Bloques estándar de la AWS.....	59
3.2.3.2	Bloques con reflectores artificiales.....	59
3.2.3.3	Bloque para la atenuación del sonido .....	61
3.2.4	Análisis de los datos .....	61
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>62</b>
4.1	EXPERIMENTO 0: palpador de 2.25MHz e incidencia de 70° .....	62
4.1.1	Capacidad de detección de reflectores artificiales .....	62
4.1.2	Capacidad de evaluación de las discontinuidades .....	65
4.1.2.1	Dispersión y variabilidad de los datos .....	65
4.1.2.2	Nivel de referencia/ Nivel de la indicación (b/a) .....	68
4.2	EXPERIMENTO 1: disminución del tamaño del CRISTAL.....	70
4.2.1	Capacidad de detección de reflectores artificiales .....	70
4.2.2	Capacidad de evaluación de las discontinuidades .....	77
4.2.2.1	Dispersión y variabilidad de los datos .....	77

4.2.2.2	Relación Nivel de referencia/ Nivel de la indicación (b/a).....	81
4.2.3	Forma del eco de los reflectores artificiales.....	84
4.3	EXPERIMENTO 2: aumento de la frecuencia del palpador .....	86
4.3.1	Capacidad de detección de reflectores artificiales .....	86
4.3.2	Capacidad de evaluación de las discontinuidades del procedimiento .....	92
4.3.2.1	Dispersión y variabilidad de los datos .....	92
4.3.2.2	Relación Nivel de referencia/ Nivel de la indicación (b/a).....	95
4.3.3	Forma del eco de los reflectores artificiales.....	97
4.4	COMPARACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS 0, 1 Y 2.....	99
4.4.1	Incidencia del palpador en la capacidad de detección y evaluación .....	99
4.4.2	El ángulo y su incidencia en la capacidad de evaluación y detección .....	101
4.4.3	Incidencia de la frecuencia en la capacidad de detección y evaluación .....	106
4.4.4	Incidencia del tipo de reflector y tamaño en el <i>índice de la indicación</i> .....	107
4.5	ANÁLISIS DE ATENUACIÓN CON BLOQUE .....	109
4.6	EXPERIMENTO CON DISCONTINUIDADES NATURALES .....	110
4.6.1	Análisis del espacio disponible .....	110
4.6.2	Resultados de la evaluación.....	111
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>115</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	115
5.1.1	Relacionadas con la capacidad de detección.....	115
5.1.2	Relacionadas con la capacidad de evaluación .....	115
5.1.3	Consideraciones prácticas sobre el procedimiento de UT de la AWS .....	116
5.2	RECOMENDACIONES .....	117
<b>6.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>118</b>
<b>7.</b>	<b>TRABAJOS CITADOS .....</b>	<b>137</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1:</b> Etapas en el proceso de verificación con END. ....	5
<b>Figura 1-2:</b> Espectro acústico y rangos de interés en el ultrasonido (dimensión en Hz). ..	9
<b>Figura 1-3:</b> Tipos de ondas mecánicas.....	10
<b>Figura 1-4:</b> Ley general de Snell (conversión de onda). ....	13
<b>Figura 1-5:</b> Transmisión del eco en la intercara perspex-acero.....	13
<b>Figura 1-6:</b> representación del haz en un palpador con cristal circular. ....	15
<b>Figura 1-7:</b> Variaciones de la técnica de pulso eco. ....	16
<b>Figura 1-8:</b> El reflectoscopio americano Sperry para inspección de materiales. ....	17
<b>Figura 1-9:</b> Características del espectro de la frecuencia en los transductores.....	18
<b>Figura 1-10:</b> visualización Scan-A, Scan-B y Scan-C en los equipos pulso-eco. ....	19
<b>Figura 1-11:</b> Tipos de reflectores artificiales más comunes. ....	21
<b>Figura 2-1:</b> Bloque IIW Tipo 1 (izquierda) y bloque TYPE SC (derecha). ....	27
<b>Figura 2-2:</b> Orientación del defecto relativa al haz ultrasónico supuesta por la AWS en su metodología.....	30
<b>Figura 2-3:</b> Zapatas de la BSC en 1966 y de la AWS en el 2015. ....	31
<b>Figura 2-4:</b> Curvas de atenuación obtenidas para tres tipos de reflectores. ....	32
<b>Figura 2-5:</b> Patrones de escaneo para el examen de discontinuidades. ....	35
<b>Figura 2-6:</b> Criterios para establecer la severidad de las discontinuidad. ....	35
<b>Figura 2-7:</b> Amplitud del eco de ultrasonido versus la altura del defecto de soldadura... 38	38
<b>Figura 2-8:</b> Parámetros que pueden influir en la capacidad de detección de un END. ... 41	41
<b>Figura 2-9:</b> Amplitudes del eco para diferentes tipos de reflectores artificiales. ....	43
<b>Figura 2-10:</b> Características esenciales para la detección y evaluación de grietas. ....	44
<b>Figura 3-1:</b> Experimento “0”, procedimiento AWS D1.5. ....	53
<b>Figura 3-2:</b> Experimento “1” donde se disminuye el tamaño del cristal.....	54
<b>Figura 3-3:</b> Experimento “2” donde se aumenta la frecuencia del palpador. ....	55
<b>Figura 3-4:</b> Equipo de UT empleado para realizar los experimentos de la investigación.57	57
<b>Figura 3-5:</b> Palpadores AWS (70°, 60° y 45°), verificación del ángulo de incidencia. ....	59
<b>Figura 4-1:</b> Índices “d” de los reflectores vs. distancia del sonido del experimento “0”. ..	62
<b>Figura 4-2:</b> Distribución de los datos en detectados (A, B, C o D) y RND.....	63
<b>Figura 4-3:</b> Clasificación de reflectores detectados y no detectados. ....	64
<b>Figura 4-4:</b> Variabilidad del índice de la indicación vs. Tamaño del reflector FBH. ....	65
<b>Figura 4-5:</b> Variabilidad del índice de la indicación vs. Tamaño del reflector FBH_L.....	66
<b>Figura 4-6:</b> Variabilidad del índice de la indicación vs. Tamaño del reflector NTH. ....	67
<b>Figura 4-7:</b> Variabilidad del índice de la indicación vs tamaño del reflector SDH. ....	67

<b>Figura 4-8:</b> Relación b/a versus el índice de la indicación d. ....	69
<b>Figura 4-9:</b> Índices “d” vs. distancia del sonido en palpador ROUND 70°.....	71
<b>Figura 4-10:</b> Índices “d” (corregido +3dB) vs. distancia del sonido (ROUND_60°). ....	71
<b>Figura 4-11:</b> Índices “d” (corregido +5dB) vs. distancia del sonido (ROUND_45°). ....	72
<b>Figura 4-12:</b> Proporción para la clasificación con palpadores ROUND y AWS de 45°. ..	73
<b>Figura 4-13:</b> Proporción para la clasificación con palpadores ROUND y AWS de 60°. ..	73
<b>Figura 4-14:</b> Proporción para la clasificación con palpadores ROUND y AWS de 70°. ..	74
<b>Figura 4-15:</b> Cantidad de reflectores FBH clasificados como A, B, C, D ó RND. ....	75
<b>Figura 4-16:</b> Reflectores NTH clasificados como A, B, C, D ó RND. ....	75
<b>Figura 4-17:</b> Reflectores SDH clasificados como A, B, C, D ó RND.....	76
<b>Figura 4-18:</b> Índice de la indicación vs. tamaño del reflector SDH (45°, 60° y 70°). ....	77
<b>Figura 4-19:</b> Índice de la indicación vs. profundidad del reflector NTH (45°, 60° y 70°)..	79
<b>Figura 4-20:</b> Índice de la indicación vs. diámetro del reflector FBH (45°, 60° y 70°).....	80
<b>Figura 4-21:</b> Relación b/a versus el índice de la indicación d para el Experimento 1. ....	82
<b>Figura 4-22:</b> Índice de la indicación vs distancia del sonido del experimento 2 (45°). ....	87
<b>Figura 4-23:</b> Índice de la indicación vs distancia del sonido del experimento 2 (60°). ....	87
<b>Figura 4-24:</b> Índice de la indicación vs distancia del sonido del experimento 2 (70°). ....	88
<b>Figura 4-25:</b> Clasificación reflectores examinados con el palpador ASE_3.5 MHz.....	89
<b>Figura 4-26:</b> Refletores clasificados como A, B, C o D o no detectados para 45°. ....	89
<b>Figura 4-27:</b> Reflectores clasificados como A, B, C o D o no detectados para 60°. ....	90
<b>Figura 4-28:</b> Reflectores clasificados como A, B, C o D o no detectados para 70°. ....	91
<b>Figura 4-29:</b> Índice de la indicación vs. diámetro del reflector FBH (45°, 60° y 70°).....	92
<b>Figura 4-30:</b> Índice de la indicación vs. profundidad del reflector NTH (45°, 60° y 70°). 93	
<b>Figura 4-31:</b> Índice de la indicación vs. diámetro del reflector SDH (45°, 60° y 70°). ....	95
<b>Figura 4-32:</b> Relación b/a versus el índice de la indicación d para el experimento 1.....	96
<b>Figura 4-33:</b> Matriz de datos para las variables SA, d y b/a y los tres palpadores. ....	100
<b>Figura 4-34:</b> Capacidad de detección tipo de palpador. ....	100
<b>Figura 4-35:</b> Influencia del ángulo de examen en el índice de la indicación.....	101
<b>Figura 4-36:</b> Diagramas de dispersión por el ángulo incidencia y tipo de palpador. ....	102
<b>Figura 4-37:</b> Tendencia de “d” para 45°, 60° y 70° y el palpador AWS.....	103
<b>Figura 4-38:</b> Comparación de las líneas de tendencia de “d” para 45°, 60° y 70° con los palpadores AWS, ASE y ROUND.....	103
<b>Figura 4-39:</b> variación de los niveles de la indicación por tipo de reflector, palpador y ángulo de incidencia. ....	105
<b>Figura 4-40:</b> Histograma de detección para las dos frecuencias empleadas. ....	106
<b>Figura 4-41:</b> Incidencia de la frecuencia el índice la indicación vs. el parámetro b/a para cada tipo de reflector y ángulo de examen. ....	107
<b>Figura 4-42:</b> índice de la indicación versus relación b/a para cada tipo de reflector considerando los tres ángulos y tipos de palpador. ....	108
<b>Figura 4-43:</b> Atenuación obtenida con bloque diseñado para el estudio.....	109
<b>Figura 4-44:</b> Mapa del recorrido del haz ultrasónico para el cupón P3 y un ángulo de 70°. ....	110
<b>Figura 4-45:</b> Mapa del recorrido del haz ultrasónico para el cupón P10 y un ángulo de 70°. ....	110

<b>Figura 4-46:</b> Interferencia tamaño de la zapata AWS en soldaduras con sobremonta (cupón P3).....	111
<b>Figura 4-47:</b> Placa P3 de 9.5 mm evaluada con ángulo de 60° en primera pierna y palpador AWS.....	111
<b>Figura 4-48:</b> Placa P10 de 12,7 mm evaluada con ángulo de 70° en primera pierna y palpador AWS.....	111
<b>Figura 4-49:</b> Placa P10 de 12,7 mm evaluada en segunda pierna con ángulo de 45° y palpador ROUND.....	112
<b>Figura 4-50:</b> Ubicación (transversal) de las discontinuidades de la placa P3.....	112

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Discontinuidad versus tipo de método de END.....	6
<b>Tabla 1-2.</b> Relación frecuencia-longitud de onda en aceros (Krautkrämer, 1990). .....	11
<b>Tabla 1-3.</b> Velocidades transversales y longitudinales para algunos materiales. ....	12
<b>Tabla 1-4.</b> Relación de aspecto “h” para b/a (Krautkrämer, 1990, pág. 76).....	14
<b>Tabla 1-5:</b> Bloques de calibración y chequeos para el ensayo (ASNT, 2007). ....	22
<b>Tabla 2-1:</b> Calificación del sistema ultrasónico según AWS D1.1-72 (AWS D1.1, 1972).26	26
<b>Tabla 2-2:</b> Calibraciones antes del examen según AWS D1.1-72 (AWS D1.1, 1972) ....	27
<b>Tabla 2-3:</b> Parámetros del examen de UT de la versión de 1969 del AWS D1.0. ....	28
<b>Tabla 2-4:</b> Niveles de severidad de reflectores del código AWS D2.0 de 1969. ....	29
<b>Tabla 2-5:</b> Niveles de severidad de reflectores del código AWS D1.0 de 1969. ....	29
<b>Tabla 2-6:</b> Información para determinar la severidad del defecto según la BSC y la AWS (Olsson, 1966). ....	31
<b>Tabla 2-7:</b> Evolución (1972 y 1983) en los criterios de A&R del AWS D1.1 aplicables a puentes (elaboración propia). ....	33
<b>Tabla 2-8:</b> Evolución en los criterios A&R del AWS D1.1 aplicables a edificaciones (compresión) entre la versión de 1972 y 1983 (elaboración propia). ....	33
<b>Tabla 2-9:</b> Aspectos que influyen en la altura del eco.....	40
<b>Tabla 2-10.</b> Forma del eco (SCAN-A) esperada para discontinuidades de soldaduras... 49	49
<b>Tabla 3-1:</b> Cupones con discontinuidades naturales. ....	56
<b>Tabla 3-2:</b> Palpadores usados en la fase experimental y sus características.....	58
<b>Tabla 3-3:</b> Zapatas (45°, 60° y 70°) para los tres tipos de palpadores empleados. ....	58
<b>Tabla 3-4.</b> Bloques empleados para la calibración del sistema ultrasónico.....	59
<b>Tabla 3-5:</b> Verificación del nivel cero de referencia para un ángulo de 45° (AWS). ....	59
<b>Tabla 3-6:</b> Características de los bloques con reflectores artificiales.....	60
<b>Tabla 3-7.</b> Relación de reflectores artificiales con discontinuidades en soldadura.....	60
<b>Tabla 4-1:</b> Reflectores ND en el Experimento “0”. ....	64
<b>Tabla 4-2:</b> Promedio y desviación estándar del índice de la indicación de reflectores FBH. ....	66
<b>Tabla 4-3:</b> promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores SDH. 68	68
<b>Tabla 4-4:</b> Reflectores con relaciones b/a cercanas a 1. ....	69
<b>Tabla 4-5:</b> Reflectores con tendencia a la no detección para el Experimento 1. ....	76
<b>Tabla 4-6:</b> Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores SDH. 78	78
<b>Tabla 4-7:</b> Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores NTH. 80	80

<b>Tabla 4-8:</b> Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores FBH.	81
<b>Tabla 4-9:</b> Reflectores con relaciones $b/a \geq 0.96$ del Experimento 1.	82
<b>Tabla 4-10:</b> Formas del eco para el reflector SDH de $\phi 3$ mm (primera pierna).	84
<b>Tabla 4-11:</b> Formas del eco para el reflector FBH de $\phi 3$ mm (primera pierna).	85
<b>Tabla 4-12:</b> Formas del eco para el reflector NTH de 3 mm (primera pierna).	85
<b>Tabla 4-13:</b> Reflectores RND, discriminados por tipo y tamaño de reflector (Experimento 2).	91
<b>Tabla 4-14:</b> Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores FBH.	93
<b>Tabla 4-15:</b> Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores NTH.	94
<b>Tabla 4-16:</b> Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores SDH con ASE.	94
<b>Tabla 4-17:</b> Reflectores con relaciones $b/a \geq 0.96$ obtenidas con el palpador ASE del Experimento 2.	96
<b>Tabla 4-18:</b> Forma del eco reflector SDH-5 mm.	98
<b>Tabla 4-19:</b> Forma del eco reflector FBH-5 mm.	98
<b>Tabla 4-20:</b> Forma del eco reflector NTH-5 mm.	98

# Lista de abreviaturas

## Abreviaturas

### Abreviatura Término

---

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	Análisis Crítico de Ingeniería
ASME	American Society for Mechanical Engineers
ASNT	American Society for Nondestructive Testing
AUT	Automated Ultrasonic Testing
AVG	Abstand Verstärkung Grosse
AWS	American Welding Society
B&PVC	Boiler and Pressure vessel Code
BPR	Bureau of Public Roads
BSC	Bentheim Steel Corporation
DAC	Distance Amplitude Correction
DGS	Distance Gain Size
EBH	Spherical bottom Hole
ECA	Engineering Critical Assessment
EDM	Electrical discharge Machining
END	Ensayos no destructivos
FBH	Flat Bottom Hole
FHWA	Federal Highway Administration
FSH	Full Screen Height
IIW	Institute International of Welding
JIS	Japanese Industrial Standards
ND	Indicación no detectada
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NTH	Notch hole
PAUT	Phased Array Ultrasonic Testing
SDH	Side Drilled Hole
TOFD	Time of Flight Diffraction

XX Evaluación de la capacidad de detección del procedimiento de ultrasonido del código  
AWS D1.5 para examinar puentes vehiculares mediante reflectores artificiales

---

**Abreviatura Término**

---

USA Estados Unidos de América

UT Ultrasonido

# Introducción y planteamiento del problema

Desde los años setenta, se han realizado importantes avances en las técnicas de detección y caracterización de discontinuidades mediante ultrasonido, muchos de los cuales se han enfocado en el desarrollo de equipos para inspecciones automatizadas (AUT) o semiautomatizadas que recolectan una gran cantidad de datos de forma computarizada; que, con ayuda de algoritmos, evalúan de forma más efectiva la señal y permiten su mejor interpretación. La automatización ha sido posible por el uso de palpadores de arreglo<sup>1</sup> de fases (*"Phased Array"*), los cuales permiten cambiar la extensión del haz, el ángulo de los elementos del arreglo y crear haces de ultrasonido por interferencia constructiva y destructiva, todo de forma electrónica, y sin necesidad de usar más de un palpador.

Sin embargo, a pesar de todos estos desarrollos, que en teoría, permitirían una mejor detección, evaluación del tamaño y caracterización de las discontinuidades en soldaduras, la AWS continúa considerando, en sus códigos para fabricación de puentes (AWS D1.5) y de edificaciones (AWS D1.1), el procedimiento de ultrasonido (UT) con técnica de pulso-eco SCAN- A, desarrollado en el año 1969. El cual es también empleado en Colombia, a través del código de puentes CCP14 y la NSR-10 para edificaciones que adoptaron estos códigos americanos sin ningún tipo de objeción, para la fabricación de esta tipo de estructuras a nivel nacional.

La metodología de examen de UT de la AWS, o por lo menos sus fundamentos han sido controvertidos por diversos autores desde hace décadas, principalmente por el uso de la altura del eco (*índice de la indicación o indication rating*) para la detección y evaluación de la severidad de las discontinuidades (se asume que alturas de eco mayores implican discontinuidades más grandes y dañinas); ya que no se ha encontrado una relación inequívoca entre el tamaño de la discontinuidad y dicho parámetro del método. En esta misma línea, los autores también han criticado la incapacidad del método para caracterizar el tipo de discontinuidad.

Con el desarrollo de la mecánica de fracturas y su uso en la evaluación crítica de estructuras (como los puentes) que albergan discontinuidades preexistentes (de tamaños desconocidos), esta "incapacidad" del método de la AWS se ha vuelto más evidente.

Otras críticas al procedimiento de la AWS se han dado en el hecho de que es un método altamente limitante (prescriptivo) pues no se permite considerar el cambio de algunos

---

<sup>1</sup> Un arreglo es un grupo de transmisores, receptor o transmisores/receptores.

parámetros (en el tipo de palpador, la frecuencia y el ángulo) para mejorar su capacidad de detección frente a determinados tamaños de discontinuidades que quisiera detectar.

En el estado del arte realizado (que se presenta en el capítulo 2 ESTADO DEL ARTE) no se encontraron investigaciones que evaluaran de una forma sistemática, la capacidad de detección y evaluación de esta metodología ante diferentes condiciones o alteraciones: frecuencia, ángulo de examen, tamaño del palpador y distancia discontinuidad-haz de forma simultánea, los cuáles podrían llegar a mejorar el método de forma significativa. Los autores consultados realizaron muchos de sus estudios con discontinuidades naturales y evaluaron, por separado, muchas de estas variables, sin que consideraran un aspecto fundamental que es la capacidad de evaluación del método.

A partir de lo anterior se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Se puede mejorar la capacidad de detección del procedimiento de examen con UT del código AWS D1.5 mediante cambios en el equipo (frecuencia y tamaño del cristal del transductor)?

La cual llevó al siguiente objetivo general: *Evaluar el efecto de la reducción del tamaño del cristal piezoeléctrico y del aumento de su frecuencia en la capacidad de detección del procedimiento de examen con ultrasonido del Código AWS D1.5:2015 y en la aplicabilidad de sus criterios de aceptación y rechazo empleando reflectores artificiales planares y volumétricos*. Y los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la capacidad de detección del procedimiento de UT del Código AWS D1.5:2015 mediante el empleo de reflectores artificiales planares y volumétricos y establecer la incidencia de su orientación (mediante cambios en el ángulo de examen). Que corresponde al Experimento “0” de la investigación.
- Evaluar el efecto del cambio en el ángulo de incidencia del palpador y el tamaño del cristal (19 mm x 19 mm y  $\phi$ 13 mm) en la capacidad de detección de reflectores artificiales del procedimiento de examen con ultrasonido del código AWS D1.5:2015 y en la aplicabilidad de los criterios de aceptación y rechazo. Que corresponde al Experimento “1” de la investigación.
- Evaluar el efecto del incremento en la frecuencia del transductor de UT (2.25 MHz a 3.5 MHz) en la capacidad de detección de reflectores artificiales del procedimiento de examen con ultrasonido del código. Que corresponde al Experimento “2” de la investigación.

El estudio está dividido en siete capítulos: 1 MARCO CONCEPTUAL donde se hace referencia a todos los conceptos generales del ultrasonido pulso-eco y su aplicación en estructuras metálicas soldadas; 2 ESTADO DEL ARTE; 3 METODOLOGÍA; 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS; 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES; 6 ANEXOS y 7 TRABAJOS CITADOS.



# 1. MARCO CONCEPTUAL

## 1.1 GENERALIDADES DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

### 1.1.1 ¿Qué es una discontinuidad?

De acuerdo con la norma ASTM E1316, una discontinuidad (en inglés “**Discontinuity**”) es “*una falta de continuidad o cohesión, o una interrupción... en la estructura física o configuración de un material o componente*”. Dicho significado será adoptado en esta investigación cuando se haga referencia a discontinuidades en soldadura. Ahora, ¿Cuándo una discontinuidad se vuelve un defecto?, cuando su tamaño, forma, orientación y posición o propiedades se desvían (son mayores/menores) del criterio de aceptación (ASTM E1316, 2020) establecido por los códigos de fabricación o por un análisis crítico de ingeniería.

### 1.1.2 ¿Qué son los ensayos no destructivos?

Los ensayos no destructivos (ENDs) se definen como “el desarrollo y *la aplicación de métodos técnicos para examinar materiales y componentes sin deteriorar su utilidad futura, con el fin de: detectar, localizar, medir y evaluar discontinuidades; evaluar la integridad, las propiedades y la composición de la estructura; y medir características geométricas*” (ASTM E1316, 2020, pág. 3). Los ENDs se emplean no sólo para detectar discontinuidades en servicio o (asegurar la disponibilidad operacional de los equipos) sino también para controlar el proceso de manufactura y mantener niveles de calidad uniformes (ASNT, 2007, pág. 3), por lo que se han vuelto algo cotidiano para los ingenieros de todas las áreas (mantenimiento, producción y operación, etc.).

Un END a aplicar en un material, estructura o equipo debe seguir los siguientes pasos: (1) selección del método (y técnica) y su aplicación; (2) obtención de una indicación; (3) interpretación de la indicación; y (4) evaluación de la indicación (INTA, Segunda Edición) (ASME Section V, 2015). En esta investigación no se hace referencia a la selección del método.

Antes de hablar del paso dos (obtención de una indicación), primero definamos que es una indicación, la cual consiste en la: “*evidencia o respuesta de cualquier tipo de examen no destructivo que se lleve a cabo*” (ASTM E1316, 2020). Por lo tanto, la *obtención de la indicación* es básicamente la detección de la discontinuidad mediante el ensayo y su registro para su interpretación. Por ejemplo, cuando se emplea UT en el examen de soldaduras, las indicaciones que se obtienen son ecos con cierta amplitud que se ven en la pantalla del equipo, los cuales deben ser interpretados con el fin de establecer si efectivamente corresponden a una discontinuidad o a indicaciones falsas por ejemplo un

cambio geométrico en la pieza (un borde o una esquina). Esto último se realiza en la etapa de *interpretación de la indicación*.

La etapa final del ensayo es la *evaluación de la indicación*, en donde se busca establecer la correlación de las características de la discontinuidad detectada con su efecto en el desempeño de la estructura o componente ante las condiciones de servicio.

En la **Figura 1-1** se representan los pasos indicados anteriormente aunque de acuerdo con el esquema de la norma ASTM E1316, y se amplían las etapas de interpretación y evaluación de la indicación.

Solo las indicaciones relevantes deberían ser evaluadas, sin embargo, establecer ese estatus de “relevante” en la práctica es más difícil de lo que parece, lo cual también sucede con la decisión de rechazo de un componente o la eliminación de la discontinuidad. Esto ha llevado al desarrollo de otras perspectivas para establecer cuando una discontinuidad debe realmente eliminarse de la estructura, como por ejemplo los análisis críticos de ingeniería que se explican más adelante.

**Figura 1-1:** Etapas en el proceso de verificación con END.



Fuente: adaptado del INTA (INTA, Segunda Edición) y el ASTM E1316 (ASTM E1316, 2020).

### 1.1.3 Técnicas de ENDs

Cada método de END puede estar compuesto por diversas técnicas. Una técnica “es una manera específica de utilizar un método particular de examen no destructivo (END)” (ASME Sección V, 2015). Así, por ejemplo, los líquidos penetrantes fluorescentes o visibles son técnicas distintas del mismo método, y el método de partículas puede tener técnicas como partículas visibles o fluorescentes, yugo magnético, magnetización circular o longitudinal, entre otras.

### 1.1.4 Métodos de ensayos no destructivos (END)

Existe una gran cantidad de métodos de ENDs usados en la industria para la detección de discontinuidades. A continuación se listan los métodos y las siglas de los ENDs usados dentro de los alcances de la Sección V del código ASME B&PVC: RT — Radiografía (Radiography); UT — Ultrasonido (Ultrasonics); MT — Partículas magnéticas (Magnetic Particle); PT — Líquidos Penetrantes (Liquid Penetrants); VT — Visual; ET — Corrientes de Eddy (Eddy Current) y AE — Emisión Acústica (Acoustic Emission).

Los diferentes métodos de ENDs se pueden clasificar en tres grupos (en la **Tabla 1-1** resume algunos ENDs empleados para detectar discontinuidades en soldaduras y otros productos):

- *Ensayos no destructivos superficiales:* métodos capaces de detectar discontinuidades abiertas a la superficie o ligeramente cercanas a la superficie.
- *Ensayos no destructivos subsuperficiales:* métodos capaces de detectar discontinuidades cercanas a la superficie, ubicados a unos cuantos milímetros de profundidad.
- *Ensayos no destructivos volumétricos:* métodos capaces de detectar discontinuidades que se encuentran dentro del volumen de material examinado.

**Tabla 1-1:** Discontinuidad versus tipo de método de END.

	SUPERFICIAL		SUBSUPERFICIALES		VOLUMÉTRICAS			
	VT	PT	MT	ET	RT	UTA	UTS	AE
<b>Discontinuidades en soldaduras</b>								
Sobre penetración	●	...	...	...	●	⊗	...	...
Grietas	⊖	●	●	⊗	⊗	●	⊖	●
Excesivo/inadecuado refuerzo	●	...	...	...	●	⊗	⊖	...
Inclusiones (escoria/tungsteno)	...	...	⊗	⊗	●	⊗	⊖	⊖
Fusión incompleta	⊗	...	⊗	⊗	⊗	●	⊗	⊗
Penetración incompleta	⊗	●	●	⊗	●	●	⊗	⊗
Desalineamiento	●	...	...	...	●	⊗	...	...
Traslape	⊗	●	●	⊖	...	⊖	...	...
Porosidad	●	●	⊖	...	●	⊗	⊖	⊖
Concavidad de raíz	●	...	...	...	●	⊗	⊖	⊖
Socavado	●	⊗	⊗	⊖	●	⊗	⊖	⊖
<b>Discontinuidades en otros productos</b>								
Bursts (Forjas)	⊖	●	●	⊗	⊗	⊗	⊗	●
Cierres fríos (Fundiciones)	⊖	●	●	⊖	●	⊗	⊗	⊖
Grietas (todas las formas de productos)	⊖	●	●	⊗	⊗	⊗	⊖	●
Hot Tear (Fundiciones)	⊖	●	●	⊗	⊗	⊗	⊖	⊖
Inclusiones (todas las formas de productos)	...	...	⊗	⊗	●	⊗	⊖	⊖
Laminación (placas, tuberías)	⊖	⊗	⊗	...	...	⊖	●	⊖

	SUPERFICIAL		SUBSUPERFICIALES		VOLUMÉTRICAS			
	VT	PT	MT	ET	RT	UTA	UTS	AE
<b>Discontinuidades en soldaduras</b>								
<b>Traslapes o Laps (Forjas)</b>	⊖	●	●	⊖	⊗	...	⊖	⊖
<b>Porosidad (fundiciones)</b>	●	●	⊖	...	●	⊖	⊖	⊖
<b>Seams (Barras, tuberías)</b>	⊖	●	●	⊗	⊖	⊗	⊗	⊖

**Notas:**

- — La mayoría de las técnicas detectarán este tipo de discontinuidad bajo la mayoría de las condiciones
- ⊗ — Una o más técnicas detectarán esta discontinuidad bajo cierto tipo de condiciones
- ⊖ — Se requieren técnicas especiales, condiciones y/o calificaciones de personal para detectar esta discontinuidad.

Fuente: traducido y adaptado de (ASME Section V, 2015).

Es importante anotar que los principales ENDs que existen y se usan a nivel industrial utilizan, por lo general, los siguientes principios físicos: capilaridad (líquidos penetrantes), campos magnéticos (partículas magnéticas) y ondas electromagnéticas o mecánicas de varias frecuencias de onda (infrasónica, sónica y ultrasonido).

**1.1.5 Aplicaciones de los ensayos no destructivos**

*1.1.5.1 Control de calidad de las estructuras*

Los ENDs cumplen un papel fundamental que consisten en controlar la calidad de los materiales, componentes y estructuras mediante la detección de discontinuidades durante las diferentes etapas del proceso de fabricación y montaje.

Los ENDs se usan para el control de calidad de grandes estructuras principalmente para “determinar si el nivel de calidad establecido para su fabricación fue o no alcanzado”. Pero ¿qué implica que un nivel no se alcance? Forli et al. consideran que: “Si el nivel de calidad no se alcanza, hay una posibilidad, a la larga, de tener defectos inaceptables que se introducen dentro de los objetos en cuestión” (Olav Forli, 1999), lo cual lleva a una posible corrección o “castigo”, que terminaría en una reparación o en un reemplazo del componente o del equipo. Sin embargo, el hecho de no alcanzar el nivel de calidad no implica, necesariamente, que se producirá una falla en la estructura lo cual es un concepto erróneo y ampliamente difundido (Ginzel E. A., 2014).

El enfoque basado en el nivel de control de calidad ha sido empleado desde hace décadas por los códigos de fabricación en soldadura (como los de entidades como la AWS y la ASME). Este enfoque se fundamenta en consideraciones que corresponden a prácticas de ingeniería (aceptadas por la comunidad o las agremiaciones) que han derivado en un desempeño satisfactorio de las estructuras, en lugar de un análisis de la forma como la estructura funciona ante la existencia de determinado tipo y tamaño de discontinuidad. Este “nivel” se ha reconocido por algunos autores como el “workmanship acceptance criteria” (Ginzel E. A., 2014) o “workmanship” (Visser Consultancy Limited, 2002).

Como alternativa a los criterios basados en el nivel de control de calidad, surgen los Análisis Críticos de Ingeniería (ACI o ECA por sus siglas en inglés) o los “*Fitness for Service*” o “*Fitness for Purpose*”, que pretenden establecer criterios de aceptación desde las preguntas: ¿Fallará la estructura o componente con las discontinuidades que contiene?; ¿Qué tan probable es que el elemento falle? y ¿Cuáles son las consecuencias de su falla?. Estos análisis se apoyan en formulaciones de mecánica de fracturas y métodos estadísticos y requieren que los ENDs aporten una información más precisa del tamaño (principalmente su altura), ubicación y tipo de defecto, lo cual demanda una mayor capacidad de detección (Ginzel E. A., 2014) y confiabilidad del END mediante la disminución de las indicaciones falsas y la cantidad de discontinuidades no detectadas (Visser Consultancy Limited, 2002, pág. 46).

Es indiscutible que los niveles de calidad establecidos en los códigos tradicionales han sido fundamentales para desarrollar estructuras metálicas más seguras. Sin embargo, cuando nos movemos hacia evaluaciones cuantitativas de desempeño en servicio (“serviceability”) o deterioro de equipos y estructuras existentes, dichos niveles no son fácilmente adaptables a estas condiciones particulares (Ginzel E. A., 2014). Para tales casos se plantean los ACI.

Algunos términos asociados con los ACI que serán considerados en esta investigación se definen a continuación (Olav Forli, 1999) (ASME Sección V, 2015):

- ✓ **Severidad del defecto:** “medida del cambio en la probabilidad de falla de un objeto debido a la existencia de una discontinuidad”.
- ✓ **Desempeño del END:** “Descripción subjetiva (no cualitativa) sobre cómo una técnica de END cumple su propósito”.
- ✓ **Capacidad del END:** “información sobre qué circunstancias permiten que una técnica de END cumpla su propósito”.
- ✓ **Confiabilidad del END:** “Descripción cuantitativa de que tan bien una técnica de END cumple su propósito”.
- ✓ **Precisión:** “descripción o medición sobre qué tan bien el END representa los parámetros de la discontinuidad”.
- ✓ **Probabilidad de detección:** fracción de defectos en una población, que puede ser revelada por la técnica END en cuestión.

En esta investigación se adoptará el concepto de *probabilidad de detección* con una ligera modificación para definir la *capacidad de detección* aplicable a la investigación así: “aptitud del ensayo de exponer discontinuidades naturales o artificiales de determinado tamaño”.

#### 1.1.5.2 Determinación de propiedades de los materiales

Los ENDs también se pueden usar para determinar propiedades de los materiales, lo cual básicamente corresponde a lo siguiente (Krautkrämer, 1990, pág. 528):

- Medición de la velocidad del sonido y esfuerzos.
- Mediciones de la atenuación, dispersión y microestructura (tamaño de grano).
- Ensayo de dureza Vickers de baja carga.

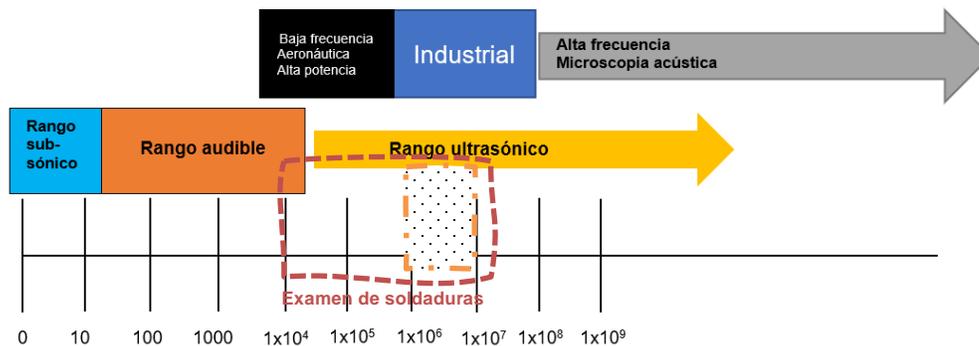
En el campo de esfuerzos, el ultrasonido se ha empleado para medir tanto los esfuerzos aplicados como los residuales que resultan de los procesos de manufactura. Esto se apoya en el efecto acústico-elástico, en donde la velocidad del sonido se ve afectada por la dirección y magnitud de los esfuerzos presentes (VEQTER, 2021).

## 1.2 LA CIENCIA DEL ULTRASONIDO

### 1.2.1 ¿Qué es el ultrasonido?

El ultrasonido es un campo de la acústica que se enfoca en el estudio de ondas mecánicas (sonoras) con frecuencias por encima del rango audible de aproximadamente 20000 Hz. En el examen de uniones soldadas de acero se usan frecuencias entre 0.5-10 MHz y, típicamente, entre 2 y 5 MHz, tal como se ilustra en la **Figura 1-2** (Halmshaw, 1996).

**Figura 1-2:** Espectro acústico y rangos de interés en el ultrasonido (dimensión en Hz).



Fuente: Elaboración propia adaptado de (Olympus, 2020).

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas que transfieren energía mediante la oscilación de partículas discretas de material (Krautkrämer, 1990, pág. 4). El medio (material) define la velocidad de la onda. Algunos “materiales” o medios que pueden inspeccionarse con UT, además de los metales son: los suelos, los órganos del cuerpo humano y los troncos de los árboles.

### 1.2.2 Conceptos generales de ondas y sus características

Las ondas ultrasónicas se pueden clasificar en:

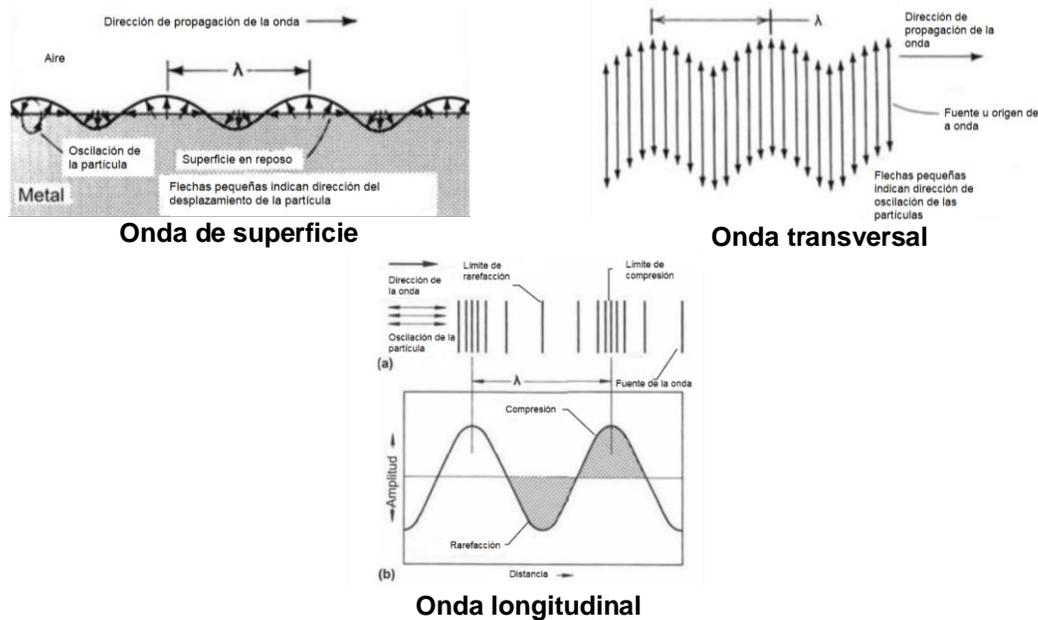
- ✓ **Ondas longitudinales:** es una onda en donde el movimiento de la partícula sigue la misma dirección de la propagación de la onda (INTA, 1975).
- ✓ **Ondas transversales:** es una onda en donde la partícula en movimiento se mueve perpendicular a la dirección de la propagación. Los gases y los líquidos no pueden transmitir efectivamente, este tipo de ondas, debido a que sus moléculas ofrecen

poca resistencia al deslizamiento transversal o cizalladura (INTA, 1975, pág. 223). Estas ondas son las más usadas en la inspección de soldaduras.

- ✓ **Ondas de superficie (Rayleigh):** tienen un movimiento de partícula elíptica y viajan a través de la superficie del material sólido siguiendo las irregularidades de su superficie o contorno. (INTA, 1975).
- ✓ **Ondas de placa (Lamb):** son ondas de superficie similares a las de Rayleigh que ocurren en sólidos semi-infinitos donde el espesor es menor que la longitud de onda (Olympus, 2020).

En la **Figura 1-3** se representan los tres tipos principales de ondas mecánicas.

**Figura 1-3:** Tipos de ondas mecánicas.



Fuente: traducido de (ASM International, 2018).

Las ondas transversales y longitudinales hacen parte de una clasificación más amplia que se conoce como *ondas planas* que, además, se pueden propagar en sólidos isotrópicos y elásticos como el acero (INTA, Segunda Edición). A continuación se mencionan algunos términos relacionados con las ondas (ISO, 2017):

- ❖ **Absorción:** parte del fenómeno de atenuación de una onda que resulta de la transformación de energía ultrasónica en otros tipos de energía.
- ❖ **Dispersión:** reflexiones aleatorias causadas, por ejemplo, por la microestructura de los materiales (tamaño de grano) y/o por pequeños reflectores en el camino del haz.
- ❖ **Ángulo de incidencia:** ángulo que se establece entre la dirección de la onda incidente y la normal a la interfaz entre dos materiales con diferentes propiedades acústicas.

- ❖ **Frecuencia (f):** la frecuencia es el número de oscilaciones de una partícula por segundo (Krautkramer & Krautkramer, 1990). La **Tabla 1-2** presenta el efecto de la frecuencia en la longitud de onda para ondas longitudinales y transversales en acero.

**Tabla 1-2.** Relación frecuencia-longitud de onda en aceros (Krautkrämer, 1990).

Frecuencia MHz	Longitud de onda en el acero (mm)	
	Ondas longitudinales ( $c_l=5.9$ km/s)	Ondas transversales ( $c_t=3.2$ km/s)
0.5	12	6.5
1	6	3
2	3	1.6
4	1,5	0.8

- ❖ **Impedancia acústica (Z):** es la oposición al desplazamiento de las partículas del material por el sonido. Este se calcula con la expresión:

$$Z = \rho * C \quad \text{Ecuación 1}$$

Si se conocen las impedancias acústicas de cada material donde transita la onda es posible establecer qué porcentaje de la energía es reflejada, así:

$$\text{Energía reflejada} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 * 100\%. \quad \text{Ecuación 2}$$

La impedancia acústica del acero es de  $45 \times 10^6 \text{kg/m}^2$ , para el perspex es de  $3.2 \times 10^6 \text{kg/m}^2$ , para la glicerina es de  $2,4 \times 10^6 \text{kg/m}^2$  y para el aire es de  $0.000398 \times 10^6 \text{kg/m}^2$  (INTA, Segunda Edición, págs. 227-229).

- ❖ **Velocidad del sonido:** es la velocidad de propagación de la onda en una determinada dirección y es una característica del material. A continuación se presentan las ecuaciones para estimar la velocidad longitudinal  $C_L$  y transversal  $C_T$  (INTA, Segunda Edición). El término  $E$  corresponde al módulo de Young del material, la variable  $\rho$  es la densidad del material y  $\mu$  es la relación de poisson (para el acero es 0,28).

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad \text{Ecuación 4}$$

En la **Tabla 1-3** se presentan algunas velocidades del sonido para algunos materiales que se usan típicamente en el examen de puentes metálicos.

**Tabla 1-3.** Velocidades transversales y longitudinales para algunos materiales.

MATERIAL	VELOCIDAD TRANSVERSAL (m/s)	VELOCIDAD LONGITUDINAL (m/s)
Perspex (Polimetacrilato de metilo)	1.43x10 <sup>3</sup>	2.73x10 <sup>3</sup>
Acero baja aleación	3.19x10 <sup>3</sup>	5.82x10 <sup>3</sup>
Glicerina	N/A	1.92x10 <sup>3</sup>
Aire	N/A	0.330 x10 <sup>3</sup>

- ❖ **Presión del sonido (P):** es la variación de la presión instantánea con respecto a su componente estático presente (la presión atmosférica) en un punto dado del medio. La presión acústica se puede determinar mediante la siguiente ecuación (INTA, Segunda Edición, pág. 226); donde  $C$  (m/s) es la velocidad del sonido,  $\rho$ (kg/m<sup>3</sup>) es la densidad del material,  $\omega$  (Hertz) es la frecuencia angular y  $A$  es la amplitud máxima de la oscilación (m).

$$P = \rho C \omega A \text{ [N/m}^2\text{]} \quad \text{Ecuación 5}$$

- ❖ **Reflexión:** la ISO la define como el “cambio en la dirección de la propagación del sonido dentro del mismo material chocando sobre una superficie” (ISO, 2017).
- ❖ **Refracción:** la ISO la define como el “cambio en la dirección de la propagación del sonido cuando pasa oblicuamente a través de la interfaz entre dos materiales con diferentes velocidades acústicas” (ISO, 2017).

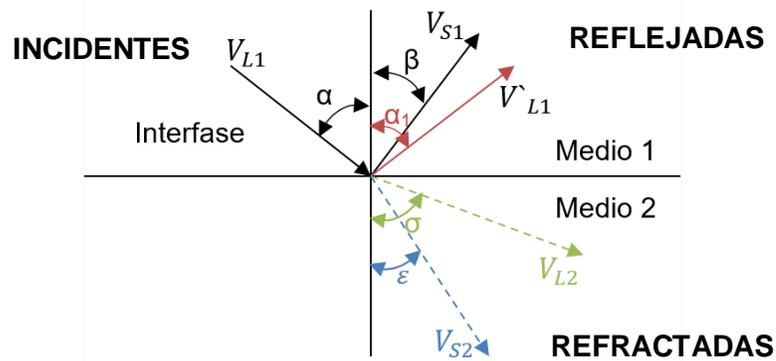
### 1.2.3 Reflexión y refracción: Ley de Snell

La ley general que describe el comportamiento de las ondas que atraviesan dos materiales se conoce como la ley de Snell. De acuerdo con esta ley la relación del seno del ángulo de incidencia con el seno del ángulo de refracción es igual a la correspondiente relación de las velocidades de los materiales (ASM International, 2018). La ecuación más general que considera todos los posibles efectos de conversión para una onda incidente longitudinal es la siguiente (véase también la **Figura 1-4** donde se representa este fenómeno):

$$\frac{\sin \alpha}{V_{L1}} = \frac{\sin \beta}{V_{S1}} = \frac{\sin \sigma}{V_{L2}} = \frac{\sin \varepsilon}{V_{S2}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Las velocidades  $V_{L1}$  y  $V_{L2}$  son longitudinales y corresponde a la velocidad incidente en el material 1 y refractada en el material 2. Las velocidades  $V_{S1}$  y  $V_{S2}$  son transversales y corresponde a la reflejada en el material 1 y refractada en el material 2. La velocidad  $V'_{L1}$ , es longitudinal y surge por la conversión de onda en el mismo material 1.

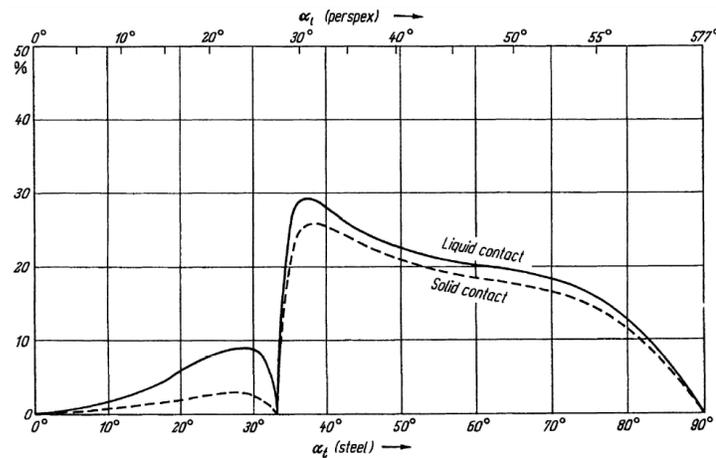
**Figura 1-4:** Ley general de Snell (conversión de onda).



Fuente: Elaboración propia.

Los arreglos típicos de haz angular para examinar soldaduras hacen uso del ángulo crítico (NDT net, 2020), el cual se define como el ángulo de incidencia que genera un ángulo de refracción de  $90^\circ$  en la onda transmitida o refractada, lo cual simplifica el examen de UT. Para la combinación perspex-acero, el primer y segundo ángulos críticos de incidencia para el perspex son:  $27.6^\circ$  (solo se transmite una onda transversal y existe *refracción total*) y  $57.7^\circ$  (existe *reflexión total*), lo cual da como resultado ángulos de refracción en el acero que van entre  $33.2^\circ$  y  $90^\circ$  (véase **Figura 1-5**), los cuales se emplean para examinar soldaduras.

**Figura 1-5:** Transmisión del eco en la intercara perspex-acero.



Fuente: (Krautkrämer, 1990).

Es importante anotar que un ángulo aprox. de  $38^\circ$  genera la mayor energía transmitida al acero. Además, la energía transmitida disminuye a medida que aumenta el ángulo de inspección, siendo el ángulo de  $70^\circ$  el que transmite la menor cantidad de energía, de los tres ángulos estándar.

### 1.2.4 Campo ultrasónico de los transductores convencionales

El campo ultrasónico de un transductor se puede definir como: la región del espacio en la cual existen variaciones en la presión acústica al interior del material, este tiene dos regiones principales (Pietro Burrascano, 2015):

- *El campo cercano o la "Zona de Fresnel"*: es la distancia desde la cara frontal del transductor al primer eco que es identificable en la pantalla, aquí la presión del sonido no es homogénea por lo cual es más difícil individualizar las señales de las discontinuidades de otras señales no relevantes.
- *Campo lejano ("Fraunhofer region")*: es la región más allá del *campo cercano* (N) donde la presión del sonido cae gradualmente hasta cero a medida que el diámetro del haz aumenta (se expande) y su energía se disipa.

La fórmula para determinar la longitud del campo cercano que ha sido propuesta para transductores de sección circular es la siguiente:

$$N = \frac{D^2 f}{4v} \text{ ó } N = \frac{D^2}{4\lambda} \text{ (ASNT, 2007) \quad Ecuación 7}$$

Donde D es el diámetro del transductor (metros),  $f$  es la frecuencia en Hertz y  $v$  es la velocidad del sonido en el material de prueba (m/s). Si se usa la fórmula alternativa con la longitud de onda  $\lambda$ , este valor debe estar en metros o en milímetros al igual que el diámetro.

La fórmula que se ha propuesto para determinar el *Campo Cercano* en elementos o cristales de sección rectangular o cuadrada es la siguiente:

$$N = \frac{hD^2}{4\lambda} \text{ (Krautkrämer, 1990, pág. 78) \quad Ecuación 8}$$

En la **Tabla 1-4** se muestran algunas constantes de relación de aspecto (h) basadas en la relación de la dimensión más corta (b) y larga del elemento (a).

**Tabla 1-4.** Relación de aspecto "h" para b/a (Krautkrämer, 1990, pág. 76).

Relación de los lados "b/a"	H
1	1,37
0.9	1,25
0.8	1,15
0.7	1,09
0.6	1,04
0.5	1,01
0.4	1,00
0.3 y por debajo	0,99

En la zona de transición entre el campo cercano y el lejano, donde se cree existe la zona propicia para detectar discontinuidades, también debe definirse otro aspecto del campo ultrasónico que es el ancho del haz (BD) que se presenta en la siguiente ecuación. El valor de  $k$  en la Ecuación 9 se estima mediante unos valores tabulados que dependen de la zona de apertura en la cual se estima la reducción de la amplitud del sonido:

$$BD = 2b = zk\left(\frac{\lambda}{D}\right) \text{ (Krautkrämer, 1990, pág. 73) \quad Ecuación 9}$$

$$b_1 = z \tan \gamma_1 \approx z \sin \gamma_1 \text{ (Krautkrämer, 1990, pág. 79) \quad Ecuación 10}$$

$$b_2 = z \tan \gamma_2 \approx z \sin \gamma_2 \text{ (Krautkrämer, 1990, pág. 79) \quad Ecuación 11}$$

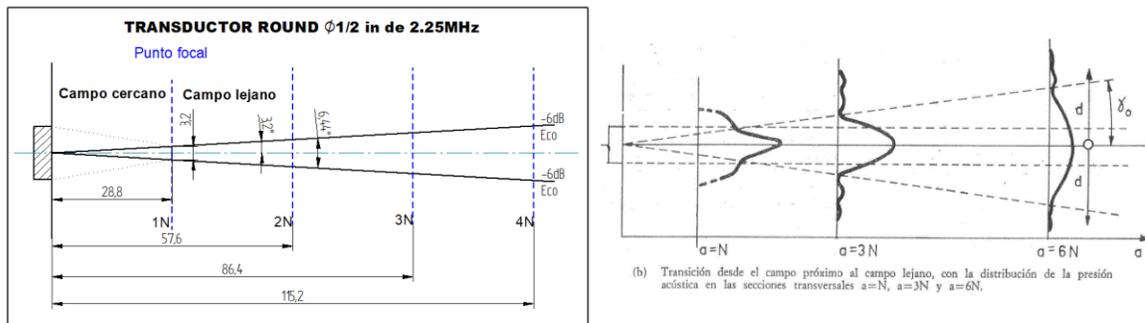
Cuando pasamos al campo lejano, se debe establecer un factor adicional, que es la divergencia del haz definida por el ángulo  $\gamma$  que se calcula mediante la siguiente ecuación válida para ambas formas del cristal del transductor (circular o rectangular):

$$\sin \gamma_{\Delta dB} = k_{\alpha} \left(\frac{\lambda}{D}\right) \text{ (Krautkrämer, 1990, pág. 73) \quad Ecuación 12}$$

El factor  $k_{\alpha}$  depende del tipo de análisis que se reluce al haz: “free field” (campo libre) o “echo field” (campo del eco), este último es el de mayor interés pues tiene relación con el haz reflejado en las superficies (Krautkrämer, 1990). Este valor se determina a partir de dos tablas, una aplicable a elementos circulares y otra a elementos rectangulares.

En la **Figura 1-6** se muestra una representación en dos dimensiones del campo sónico de un transductor de forma circular de 1/2 in de diámetro y 2.25MHz, donde se señala las dos zonas del campo, el ancho del haz en la transición (punto focal) que es de 3.2 mm y la divergencia del haz que es de 3.2°. En el esquema de la derecha se muestra cómo cambia la presión acústica en la parte central del haz con el aumento en la distancia del sonido.

**Figura 1-6:** representación del haz en un palpador con cristal circular.



Fuente: Elaboración propia (izquierda) e INTA (derecha) (INTA, Segunda Edición).

### 1.2.5 Atenuación de las ondas

Cuando una onda se propaga en un material hay diferentes fenómenos que disminuyen su energía. Esta reducción de energía se conoce como atenuación. Una expresión usada para establecer la atenuación es un simple ecuación de absorción del sonido en la que no se consideran los efectos de la atenuación debido a la dispersión del haz y a la divergencia del haz (Holloway, 2017).

$$A(t) = A_0 e^{-\alpha t} \text{ Ecuación 13}$$

Una variación a la fórmula anterior es la que se presenta a continuación (İŞLEYİCİ, 2005, pág. 11) donde  $P$  es el nivel de presión en una segunda posición (final) y  $P_0$  es la presión en la posición inicial,  $L$  es la distancia de viaje del pulso sónico desde la fuente original a la segunda posición de referencia y  $\alpha$  es el factor de atenuación. En esta investigación se indica un valor para  $\alpha$  de “8.8dB/m” (0.0088 dB/mm) para ondas transversales.

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha L} \quad \text{Ecuación 14}$$

### 1.3 TÉCNICAS DE ULTRASONIDO Y PRESENTACIÓN DE DATOS

#### 1.3.1 Técnicas de reflexión

##### 1.3.1.1 Conceptos generales

Las técnicas de reflexión o de pulso-eco consisten en la transmisión de un pulso ultrasónico de corta duración, o excitación de un material piezoeléctrico, que transmite una onda longitudinal o transversal en el material. En esta técnica la distancia de recorrido (en mm o cm) y la amplitud del eco (en dB) se usan para representar el tiempo de llegada de la onda reflejada y su intensidad (K. Manjula, 2014). El eco que proviene de la discontinuidad puede dar información acerca de su existencia (Pietro Burrascano, 2015), posición y tamaño (Halmshaw, 1996). Existen ciertas variaciones en esta técnica que dependen del número de palpadores que se usan, el tipo de contacto del palpador con la superficie de inspección y el tipo onda incidente, como se puede ver en la **Figura 1-7**.

**Figura 1-7:** Variaciones de la técnica de pulso eco.



Fuente: Elaboración propia.

##### 1.3.1.2 El equipo de ultrasonido

Los métodos de examen mediante excitación de ondas ultrasónicas fueron descubiertos por James Prescott Joule en 1847 y por Pierre Curie y su hermano Paul Jacques en 1880 (Workman & Doron, 2007). Los primeros estudios formales de UT fueron realizados por John William Strutt (Lord Rayleigh), quien desarrolló el disco de Rayleigh para medir la presión acústica y el análisis del patrón de onda de un generador tipo pistón de alta frecuencia (ASNT, 2007, pág. 24). Sin embargo, sólo hasta 1929, el físico ruso Sergei Y. Sokolov propuso la técnica de UT para aplicaciones industriales: en la detección de

discontinuidades en fundiciones por la técnica de transparencia (Workman & Doron, 2007). Los instrumentos comerciales para la técnica de pulso-eco aparecieron en USA, y uno de los primeros fue el “*Supersonic Reflectoscope Type A*” lanzado en 1945 por la empresa *Sperry Products Inc* (véase **Figura 1-8**).

**Figura 1-8:** El reflectoscopio americano Sperry para inspección de materiales.



Fuente: (Woo, s.f.).

En la misma época, la empresa *Kelvin and Hughes Limited* del Reino Unido creó el *Sproule Instrument* y en Alemania los hermanos Krautkrämer desarrollaron equipos para métodos de pulso-eco a través de su icónica empresa “Krautkrämer” (Workman & Doron, 2007).

Los equipos de pulso-eco actuales, son digitales y consisten básicamente de una unidad electrónica (PULSE-RECEIVER) con salidas para acoplar palpadores mediante cables. Los pulsos se generan de forma electrónica, con un generador de pulsos, que se amplifican y se rectifican, de forma igualmente electrónica. Los generadores de pulso típicos para excitar los transductores piezoeléctricos son: *spike pulsers* y *square wave pulse*.

El *decibel* (dB) es la unidad para medir la amplitud de una señal acústica que corresponde a una décima parte de un bel (B) y expresa una relación logarítmica entre dos condiciones de la misma dimensión (potencia, presión del sonido, voltaje o intensidad, etc.). El nivel de referencia en este caso se define como  $0\text{dB}_{\text{AE}}$  y corresponde a “una señal de  $1\mu\text{V}$  en el transductor antes de cualquier amplificación” (ASNT, 2007). La fórmula para establecer esta diferencia sería la siguiente (Hoskins, Martin, & Thrush, n.d.):

$$\frac{I_2}{I_1} (\text{dB}) = 10 \log_{10} \left[ \frac{I_2}{I_1} \right] \quad \text{ó} \quad \frac{I_2}{I_1} (\text{dB}) = 10 \log_{10} \left[ \frac{p_2}{p_1} \right]^2 = 20 \log_{10} \left[ \frac{p_2}{p_1} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

### 1.3.1.3 Los palpadores

Los palpadores usados en el ultrasonido pulso-eco se pueden clasificar por la forma en cómo se generan los impulsos así: palpadores piezoeléctricos (los usados en esta investigación), palpadores electromagnético-acústicos (EMAT, EMT o EMUS), palpadores por métodos de magneto restricción y palpadores por métodos ópticos y técnicas láser.

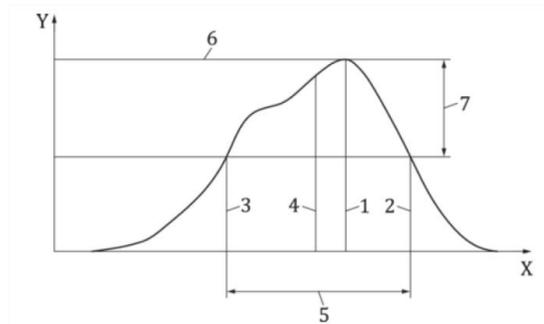
Los palpadores piezoeléctricos son los más usados en el UT convencional y evaluación de soldaduras en las industrias metalmecánicas.

La piezoelectricidad significa “electricidad de presión” y es una propiedad que tienen ciertos cristales como el cuarzo, la turmalina y el titanato de bario. Fue descubierta por los hermanos Curie en 1880; los cuales observaron que estos materiales generan electricidad cuando se induce una deformación y cuando se aplica un campo eléctrico el cristal cambia de forma (ASNT, 2007, pág. 60). El tipo de material piezo-eléctrico determina el grado de deformación resultante cuando se aplica un campo eléctrico, y es del orden de micras.

#### 1.3.1.4 Características de los transductores

En la **Figura 1-9** se presentan los términos relacionados con el espectro de la frecuencia de los transductores.

**Figura 1-9:** Características del espectro de la frecuencia en los transductores.



Fuente: (ISO, 2017).

- **Frecuencia pico (número “1”):** frecuencia en donde se observa la máxima amplitud (ISO, 2017).
- **Frecuencia cut-off (número “2” y “3”):** frecuencia en la cual la amplitud de la señal transmitida ha caído una determinada cantidad desde la amplitud de la frecuencia pico. Existen dos tipos superior e inferior (ISO, 2017).
- **Frecuencia central (número “4”):** Esta es la frecuencia que se indica en los transductores y depende del “*backing material*” (ISO, 2017).
- **Ancho de banda (número “5”):** es el rango de frecuencias asociadas con un transductor a una determinada caída de amplitud (por ejemplo 6dB). Ancho del espectro de frecuencia entre la frecuencia “cut-off” superior e inferior (ISO, 2017).
- **Amplitud pico (número “6”).**
- **Caída de amplitud especificada (número “7”).**
- **Tiempo de vuelo:** tiempo que toma un pulso ultrasónico para viajar del transmisor al palpador receptor a través del objeto de prueba (ISO, 2017).

El ancho de banda está asociado con el amortiguamiento, que corresponde a la forma en como el palpador atenúa internamente la onda. Los transductores altamente *amortiguados* (alto “Q”) responderán a frecuencias por encima y por debajo de la frecuencia central, este amplio rango de frecuencia provee al transductor con una alta *potencia de resolución*; de

manera que serán sensibles a pequeños reflectores; de otro lado transductores menos amortiguados exhibirán un rango de frecuencias más estrecho y serán menos sensibles a reflectores más pequeños.

### 1.3.1.5 Presentación de los datos

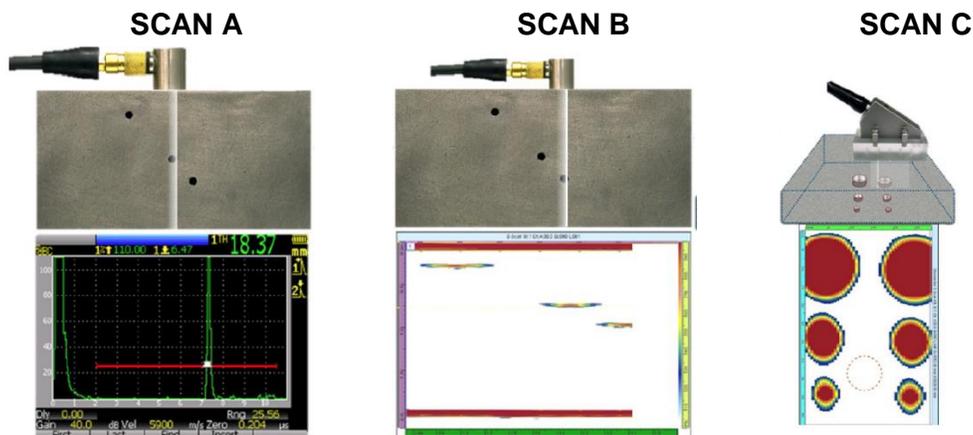
Los sistemas de ultrasonido pueden presentar la información de tres formas: SCAN-A, SCAN-B y SCAN-C. En la **Figura 1-10**, se representa los referidos tipos de escaneos.

**SCAN-A:** En el SCAN-A la información se muestra en una sola dimensión y corresponde al largo del haz en una determinada posición en el material de prueba. La profundidad de las discontinuidades se determina por el tiempo de vuelo medido desde el momento en que se observa en la pantalla (ASNT, 2007).

**SCAN-B:** el objeto es escaneado a lo largo de un eje para producir una presentación de su sección transversal. La ubicación a lo largo del camino de escaneo se muestra en el eje X y los valores del tiempo de vuelo se muestran a lo largo del eje Y.

**SCAN C:** se aplica a los objetos en un patrón tipo trama y presenta una vista del área de la discontinuidad. La información de la ubicación de la discontinuidad y el tamaño son posibles debido al cambio en la amplitud como una función de la posición. Los equipos modernos con este tipo de escaneo usan computadores para controlar la posición del transductor y para adquirir, documentar y almacenar los resultados del ensayo.

**Figura 1-10:** visualización Scan-A, Scan-B y Scan-C en los equipos pulso-eco.



Fuente: (Aditya Akundi, 2018)

### 1.3.2 Técnicas de transmisión

En las técnicas de transmisión, medición de intensidad o método de sombra, “la sombra” de una discontinuidad “iluminada” por una onda ultrasónica reduce, bajo ciertas condiciones, la intensidad de la onda que se recibe con un segundo palpador (Krautkrämer, 1990, pág. 239). La técnica de “Time of flight diffraction”, TOFD, es la más conocida de

las técnicas de transmisión, y, fue desarrollada por el Dr. Maurice Silk para la industria nuclear (H. Wüstenberg, 2020). La limitación principal de la técnica se da en el caso de grietas que son cercanas a la superficie (superior e inferior), además hay limitaciones para adaptar la técnica en situaciones donde la energía difractada del extremo de la grieta es reducida por ciertos fenómenos externos (esfuerzos, corrosión, falta de orientación, etc.).

## 1.4 MÉTODOS PARA EVALUAR LAS DISCONTINUIDADES SCAN A

Antes de entrar en detalle con los métodos para evaluar discontinuidades, es importante definir primero que es la calibración del ultrasonido. La calibración en este ámbito se define como “la práctica de ajustar la ganancia, barrido y rango, además de evaluar el impacto que otros parámetros del instrumento y la configuración del ensayo pueden tener en la interpretación confiable de las señales ultrasónicas del eco” (ASNT, 2007, pág. 194).

La norma europea EN ISO 16811:2014 reconoce que existen tres métodos de calibración para el ultrasonido convencional:

- **Único reflector.** Esta técnica debería usarse cuando se evalúan ecos dentro del mismo rango de distancia del sonido. Este principio es el que usa a metodología de examen por UT de la AWS.
- **Curvas distancia-amplitud (DAC).** Esta técnica usa reflectores ubicados a diferentes distancias del sonido, y la usa el ASME B&PVC Sección VIII División 1 para evaluar discontinuidades en soldaduras con técnicas de UT convencionales.
- **Curvas distancia-ganancia-tamaño (DGS).** Esta técnica usa una serie de curvas teóricas relacionadas con la distancia del sonido, la ganancia del equipo y el tamaño de un reflector tipo disco perpendicular al eje del haz.

### 1.4.1 Reflectores artificiales usados en la calibración del sistema ultrasónico

Desde que se empezaron a usar reflectores artificiales en el UT para realizar la calibración del sistema ultrasónico, hay dos tipos de reflectores que han sido particularmente populares: los agujeros taladrados de lado (SDH) en Estados Unidos (usados en las curvas distancia-amplitud o DAC) y los agujeros de fondo plano (FBH) en Europa (usados en las curvas de distancia-ganancia-tamaño o DGS).

Hasta la fecha, estos dos tipos de agujeros hacen parte de las prácticas actuales usadas en el examen con ultrasonido de soldaduras en estructuras (edificios y puentes) y recipientes a presión. Sin embargo, estos no son los únicos reflectores, también se han empleado otros tipos de reflectores como: entallas, esferas sólidas y agujeros con fondo esférico. A continuación se hace una descripción de los reflectores artificiales que se han mencionado y en la **Figura 1-11** se representa su geometría.

**Agujeros de fondo plano (*Flat-Bottom hole* o *FBH*):** estos agujeros se fabrican de manera que tengan una superficie reflectante plana en el fondo del agujero. Se pueden fabricar con o sin inclinación; y requieren procesos de manufactura especiales para su

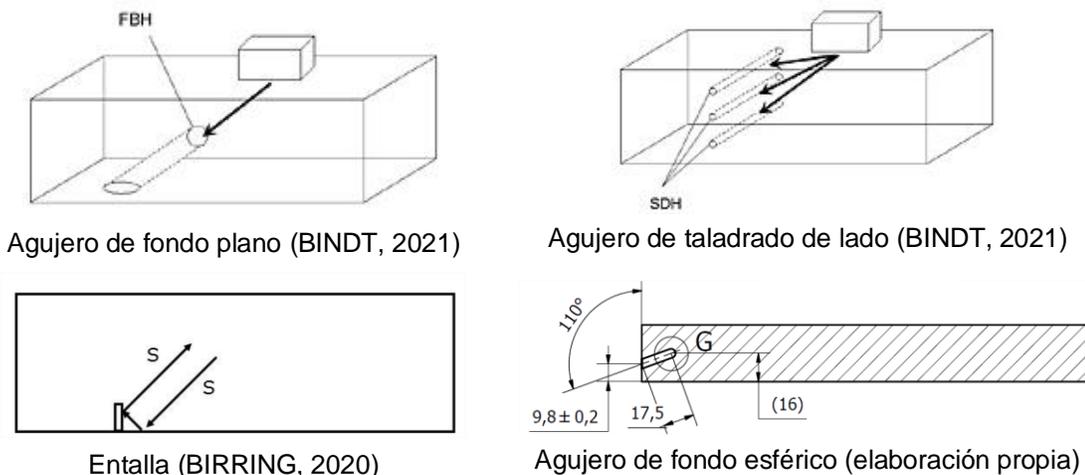
fabricación, por ejemplo mecanizado por electroerosión (EDM) o *Difussion Bonding*. Los reflectores FBH no generan la misma respuesta para todos los ángulos de incidencia (ASTM E164, 2019). Los códigos de la AWS no usan este tipo de agujeros, pero si son usados por otros códigos y estándares americanos para el examen de fundiciones y forjas con palpadores de incidencia normal (ASNT, 2007).

**Agujero taladrado de lado (Side-drilled hole):** El reflector SDH es un agujero taladrado a un lado de la pared del material. La superficie curva del “cilindro” se usa como superficie reflectante del eco. Es relativamente fácil de fabricar mediante procesos de mecanizado convencional. Al contrario que los FBH, los SDH generan respuestas similares para diferentes ángulos de incidencia (ASTM E164, 2019). Los SDH son los más usados por las normas y códigos americanos para la calibración de la corrección en distancia de la amplitud del eco (ASNT, 2007). Para dar un ejemplo, el nivel cero de referencia del procedimiento de UT del código AWS usa un agujero SDH de  $\phi 1.6$  mm.

**Agujero de fondo radial cóncavo (CBH):** El agujero de fondo radial cóncavo o “CBH” (*Concave Bottom Hole*) es una variación del FBH, pero es maquinado con un radio cóncavo en el fondo. Al igual que los FBH, estos demandan procesos de manufactura especiales para su fabricación. Convencionalmente, no se emplean en el examen de soldaduras.

**Entallas (notches):** son ranuras superficiales que pueden ser cuadradas o en V, que se generan mediante técnicas sencillas de mecanizado, y pretenden simular grietas cercanas a la superficie (ASNT, 2007). Este tipo de reflectores son referidos por la Sección V del ASME B&PVC para uno de sus bloques de calibración.

Figura 1-11: Tipos de reflectores artificiales más comunes.



Es importante anotar que los reflectores artificiales no son la única forma en que se puede hacer una calibración de un procedimiento de UT. La calibración también se puede realizar con discontinuidades naturales implantadas en una pieza que tiene características similares a las requeridas en el material que será examinado (M Consonni, 2014). El problema con este enfoque es que su fabricación es difícil y costosa porque no es sencillo obtener discontinuidades naturales con determinado tamaño, forma y orientación.

## 1.4.2 Algunos bloques de calibración

Los bloques de calibración contienen los reflectores artificiales que se usan para poner a punto el sistema ultrasónico, y estandarizar así su respuesta (sensibilidad, resolución, etc.) ante las discontinuidades naturales detectadas en los materiales. Se considera que existe una relación en la respuesta acústica de los reflectores artificiales (su forma o geometría) y las discontinuidades naturales.

En la **Tabla 1-5**, adaptada de la ASNT (ASNT, 2007), se presenta una comparación de las características que son evaluadas normalmente en el sistema ultrasónico, mediante varios bloques de calibración desarrollados por diversas entidades: el IIW, la ASME y la AWS.

**Tabla 1-5:** Bloques de calibración y chequeos para el ensayo (ASNT, 2007).

CARACTERÍSTICA	DESIGNACIÓN DEL BLOQUE						
	IIW	DSC	ASME (SDH)	SC	DAC	AA	AWS (RC)
Distancia (sweep range)	T,L	T,L	T,L		L	L	
Sensibilidad	T,L	T,L	T,L	T	L	L	
Punto de salida del haz	T	T					
Ángulo del haz	T	T		T			
Corrección distancia amplitud			T,L		L	L	
Resolución de profundidad	L				L,n		T
Compensación de curvatura			T,c				

### Notas:

**AA**= bloque amplitud-área (reflectores FBH) usados en forjas y fundiciones de formas cilíndricas, cuadradas o rectangulares y con uno o varios agujeros de varios diámetros (ASTM E127, ASTM E428, ASTM E1158, ASTM E2375 y ASTM A609).

**ASME** = Sociedad Americana de Ingenieros mecánicos (reflectores SDH). Sección V del ASME B&PVC.

**AWS (RC)** = bloque calibración de resolución que contiene tres conjuntos de agujeros SDH de tres diámetros diferentes.

**DAC**= bloque para curva distancia amplitud. Considerado en varias secciones del ASME B&PVC.

**DSC**= calibración de distancia y sensibilidad (ranuras, reflectores SDH, geometrías de referencia). Bloque del ASTM E164.

**IIW**= Bloque Tipo 1 y 2 del Instituto Internacional de Soldadura (ranuras, reflectores SDH, geometrías de referencia).

**SC**= calibración de sensibilidad (SDH), del ASTM E164. Bloque similar al AWS (RC), con sólo dos agujeros de  $\phi 1.6$  mm.

L= onda longitudinal; T= onda transversal; c=conjunto de bloques curvos; n=sólo resolución cercana a la superficie.

## 1.5 DISCONTINUIDADES EN SOLDADURAS

### 1.5.1 Origen de las discontinuidades en soldadura

Las discontinuidades en soldadura pueden clasificarse en tres grupos: asociadas al diseño, al proceso de soldeo y metalúrgicas (ASM, 1997). Las primeras están relacionadas con concepciones inadecuadas del diseño: seleccionar un tipo de junta o ranura en una aplicación inadecuada, establecer un tamaño erróneo en la soldadura o ubicar una junta soldada en una posición que impide su ejecución durante la fabricación.

Las discontinuidades relacionadas con el proceso incluyen: socavados, inclusiones de escoria, porosidad, traslape, inclusiones de tungsteno, dejar el respaldo metálico, cavidades por contracción, inclusiones de óxido, faltas de fusión, faltas de penetración, cráteres, sobre penetración, salpicaduras, golpes de arco y falta de llenado (ASM, 1997). Cada proceso es susceptible a un determinado tipo de discontinuidad, por ejemplo las inclusiones de tungsteno sólo surgen en GTAW.

Dentro de las discontinuidades metalúrgicas se encuentran: las grietas, las fisuras, segregaciones y el desgarre laminar (ASM, 1997). Estas discontinuidades surgen cuando el material tiene determinada composición química que es susceptible a ciertos fenómenos externos.

## **1.5.2 Algunos tipos de discontinuidades en soldaduras**

A continuación se hace un recuento de las principales discontinuidades en soldadura que son de interés para la fabricación de puentes vehiculares de acero según el código AWS D1.5 Bridge Welding.

### *1.5.2.1 Porosidad*

Los poros se pueden definir como “vacíos” en el metal que contienen gases atrapados, y se caracterizan por una forma redondeada o elongada (ASM, 1997). Los poros pueden clasificarse en: porosidad dispersa, uniformemente distribuida, porosidad agrupada, porosidad lineal, porosidad elongada y porosidad “Wormhole”. La radiografía es el método de inspección que se considera más adecuado para detectar este tipo de discontinuidades. Para la porosidad subsuperficial se ha considerado el método de partículas magnéticas (ASM, 1997).

### *1.5.2.2 Inclusiones de escoria*

Son zonas en el interior del metal soldado en donde hay atrapamiento de elementos no metálicos (escoria), que pueden ocurrir cuando se usan procesos de soldeo que emplean un fundente para propósitos de protección como el SMAW y el FCAW. Estas se pueden encontrar en la raíz, cerca de la superficie y entre cordones en soldaduras multipases (ASM, 1997). Este tipo de imperfecciones se asocian con una limpieza inadecuada durante el proceso de soldeo o a una mala técnica de soldeo (ASM, 1997). Su detección se lleva a cabo mediante radiografía y UT (soldaduras multipases).

### *1.5.2.3 Faltas de fusión y falta de penetración*

La falta de fusión (FDF), como su nombre lo indica, corresponde a la falta de coalescencia entre zonas de las soldaduras. La falta de penetración (FDP) por su parte es la zona de la raíz en donde la soldadura no penetró ni generó fusión con el material base. Las FDF se encuentra, normalmente, en las caras de las juntas o entre las intercaras de los pases, y las FDP se encuentran cerca de la raíz (ASM, 1997).

Las causas para la aparición de FDP se asocian con aspectos de control del proceso de soldeo (velocidades de soldeo muy altas, tamaño muy grande de electrodo, corriente insuficiente, inadecuada manipulación del electrodo o excesivo soplo de arco y una mala preparación de la junta) (ASM, 1997). Las causas de las FDF son muy similares a las de la FDP, excepto que la presencia de contaminantes superficiales tales como óxidos, aceite o suciedad influyen mucho en la aparición de estas discontinuidades. La detección de ambos tipos de discontinuidades es posible a través de radiografía o UT.

#### 1.5.2.4 Socavaduras

Se define como una ranura fundida en el metal base adyacente al pie o la raíz de una soldadura, que queda sin llenar con metal de soldadura (AWS A3.0, 2010). También se consideran como una discontinuidad geométrica similar al traslape (ASM, 1997).

#### 1.5.2.5 Grietas

Son discontinuidades planares con bordes agudos y morfologías diversas que pueden presentarse en numerosas ubicaciones que incluyen el metal base, el metal fundido y la zona afectada térmicamente. Las grietas en el metal soldado y en el metal base abiertas a la superficie pueden detectarse mediante líquidos penetrantes y partículas magnéticas. Las grietas que se encuentran al interior de la soldadura se pueden detectar con radiografía (RT) o ultrasonido (ASM, 1997).

### 1.5.3 Clasificación de discontinuidades por mecánica de fracturas

Desde el punto de vista de la mecánica de la fractura, las discontinuidades de soldaduras pueden ser clasificadas como (ASM, 1997):

- i. Discontinuidades planares: son discontinuidades cuya tercera dimensión es menor a las otras dos dimensiones, generando una forma que se asemeja a un plano en lugar de un volumen. Estas actúan como un concentrador de esfuerzos infinitamente grande, por lo que pueden disminuir sustancialmente la resistencia a la fatiga o a la fractura frágil. Algunos ejemplos son: las grietas, las FDF y FDP.
- ii. Discontinuidades volumétricas: son aquellas cuyas tres dimensiones son del mismo orden de magnitud, por lo que genera un volumen en el espacio más o menos homogéneo. No tienen influencia en el comportamiento a fatiga debido a que no tienen bordes agudos, sin embargo, pueden llegar a reducir la resistencia estática de la sección, al disminuir el área de carga de la soldadura. Dentro de esta clasificación se encuentran: la porosidad y las inclusiones de escoria.
- iii. Discontinuidades geométricas: son discontinuidades que tienen un efecto local al incrementar los esfuerzos en la zona debido a su geometría que induce cambios en la forma como se transmiten los esfuerzos. Dentro de esta clasificación se encuentran: el desalineamiento, el sobre llenado, las paradas e inicios de cordones, las socavaduras y las ondulaciones del perfil de las soldaduras.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

El estado del arte de esta investigación (State of Art) se divide en tres partes principales, así: primero un estado del arte seminal que indaga sobre el origen técnico y conceptual del método de ultrasonido de los códigos D1.1 y D1.5 de la sociedad americana de soldadura (AWS); segundo una recopilación de los cuestionamientos que diversos investigadores, a lo largo de aproximadamente 50 años, han realizado de forma directa o indirecta al procedimiento de UT de la AWS (principalmente a sus asunciones o heurísticos) y tercero las consideraciones que algunos autores han realizado sobre aspectos asociados a la interpretación de la forma del eco según el tipo de discontinuidad, la cual no es adoptada por la AWS en su método de examen, pero que se explora para determinar si podría llegar a considerarse como parte del procedimiento de esta entidad. La cuarta parte concluye que no se encontraron investigaciones específicas similares a las realizadas por la autora.

### **2.1 EL EXAMEN DE PUENTES CON UT EN ESTADOS UNIDOS**

#### **2.1.1 El primer procedimiento de UT de la AWS**

En 1934, la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) conformó un comité para preparar las especificaciones relacionadas con las prácticas de soldeo de puentes vehiculares. Del trabajo de este comité surgió, en 1936, la primera especificación para puentes en Estados Unidos denominada AWS D2.0 *Welded Highway and Railway Bridges* que sería adoptada en 1941 por la AASHTO (AWS D1.5, 2015).

Hasta un poco más de la primera mitad del siglo XX, el UT no era un método común para evaluar la calidad de las uniones soldadas en los puentes de EE. UU. En ese entonces (1963) la mayoría de las entidades estatales verificaban la sanidad de las uniones soldadas con radiografía (W.W. Sanders, 1966). Sólo unos años después, en 1969 se publica, el primer procedimiento de UT oficial, emitido por una entidad americana, para evaluar soldaduras en puentes, el cual se incluiría como el Apéndice C tanto en el código de edificaciones (AWS D1.0) como en la Especificación para puentes (AWS D2.0) de EE. UU. (Shenefelt, 1971) . Este procedimiento requería el uso de un equipo pulso-eco SCAN A con un control o atenuador de ganancia (en dB) capaz de operar en un rango de frecuencia entre 1 MHz y 6 MHz. El procedimiento era válido para examinar soldaduras de acero al carbono con espesores entre 5/16" (8 mm) y 8" (203 mm).

Es importante anotar que el reemplazo de la radiografía por el ultrasonido para la detección de discontinuidades en estructuras soldadas, (como por ejemplo puentes), fue cuestionado, debido a la falta de un desarrollo adecuado de criterios de aceptación y rechazo (A&R) específicos para el ultrasonido. Al respecto, M. Coffey et al. afirmaron que la transición de la radiografía al ultrasonido se efectuó sin que, al unísono, se hubiese realizado un cambio en los criterios de A&R, "forzando al ultrasonido a usar los criterios

establecidos para la radiografía”, los cuales eran incompatibles con el UT (J. M. Coffey, 1979). En esta misma línea, y muchos años después, Robert J. indicó que la incompatibilidad se debía principalmente a que las técnicas se basaban en principios físicos diferentes (Robert J. Connor, 2019).

Lo anterior fue particularmente evidente con la metodología de examen de la AWS, cuyos criterios de aceptación y rechazo se formularon, a partir de los criterios existentes para el examen radiográfico; tal y como fue analizado por Jessop et al. en el reporte 242, en donde indicó que: defectos cuyo tamaño eran del orden del 2% del espesor del elemento se esperaba fueran rechazados por el método de la AWS, lo cual fue derivado del requerimiento de que los *criterios para evaluar el ultrasonido deberían ser paralelos a los de la radiografía en los cuales se exigía una sensibilidad del 2%* (T. J. Jessop, 1981).

La evidencia más fuerte que se encontró del origen del procedimiento de la AWS es la aparente influencia que tuvo, en su desarrollo, la Benthel Steel Corporation (BSC), una de las empresas más grandes de EE. UU dedicada a la fabricación y manufactura de estructuras acero.

Muchas de las suposiciones hechas por la AWS en su metodología de examen, como la interacción onda-discontinuidad y la atenuación del sonido en el acero, fueron concebidas originalmente por la BSC y replicadas por la AWS, lo cual se explica más adelante en el numeral **2.1.2 La Benthel Steel Corporation y el procedimiento de UT de la AWS.**

En los siguientes numerales se presenta un recuento de las generalidades del contenido del primer procedimiento de UT de la AWS, esta información se complementa con la obtenida del procedimiento publicado en la edición del año 1972 del AWS D1.1, el cual se tenía disponible para su análisis a profundidad y que corresponde a la segunda versión publicada por dicha entidad.

#### 2.1.1.1 Calificación del sistema y calibración para el examen

El primer paso del procedimiento de la AWS consistía en la “calificación” del sistema y la calibración para el examen de acuerdo con el tipo de palpador, que se resume en la **Tabla 2-1** y la **Tabla 2-2**, y que continúa siendo válido en la actualidad, excepto por algunos cambios en la “frecuencia” de ejecución de las verificaciones y por la inclusión de una verificación adicional para el palpador normal (el control de ganancia), que se introdujo en una de las versiones lanzada en los años ochenta.

**Tabla 2-1:** Calificación del sistema ultrasónico según AWS D1.1-72 (AWS D1.1, 1972).

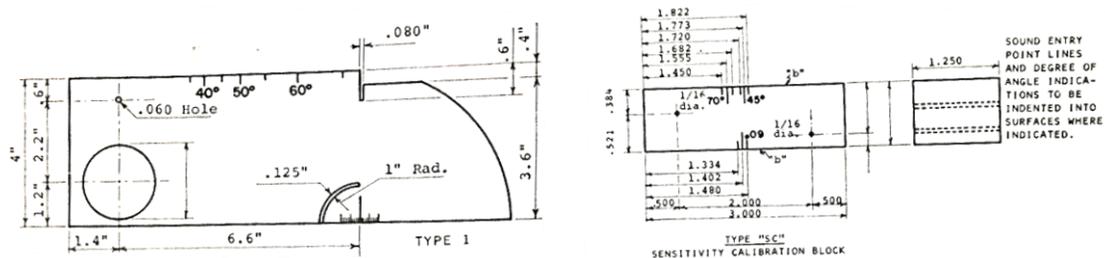
TIPO DE PALPADOR	TIPO DE VERIFICACIÓN	FRECUENCIA	BLOQUE
NORMAL	Linealidad horizontal	Cada 2 meses	Bloque IIW
	Reflexiones internas	Cada 40 horas	Bloque IIW
ANGULAR	Linealidad horizontal	Cada 2 meses	Bloque IIW
	Reflexiones internas	Cada 40 horas	Bloque IIW

**Tabla 2-2:** Calibraciones antes del examen según AWS D1.1-72 (AWS D1.1, 1972) .

TIPO DE PALPADOR	DISTANCIA (HORIZONTAL SWEEP)	TIPOS DE VERIFICACIONES		
		AMPLITUD DEL ECO (SENSIBILIDAD)	RESOLUCIÓN	OTRAS VERIFICACIONES
<b>NORMAL</b>	Con bloque IIW ubicado en el espesor del bloque.	Entre el 50-75% de la altura del eco (ubicado en el espesor del bloque).	Con bloque IIW en la ranura que atraviesa el bloque (resolver tres distancias).	No tiene
<b>ANGULAR</b>	Con bloque IIW.	Con bloque IIW o TYPE SC (agujero SDH de $\phi 1.5$ mm).	Con bloque RC (resolver tres agujeros SDH).	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ángulo de salida (<math>\pm 2^\circ</math>).</li> <li>▪ Salida del haz</li> </ul>

En la **Figura 2-1** se presentan los bloques IIW y TYPE SC. El bloque IIW fue desarrollado por el Instituto Internacional de Soldadura, y ha sido el bloque más usado para la calibración de la distancia en ambos tipos de palpadores (haz recto y angular) y para verificar aspectos de palpadores angulares como: el ángulo de refracción y el índice de salida y la sensibilidad de palpadores normales. También es el bloque que se usa para establecer el nivel cero de referencia, al igual que el bloque SC.

**Figura 2-1:** Bloque IIW Tipo 1 (izquierda) y bloque TYPE SC (derecha).



Fuente: Extraído del Código AWS D1.1, versión de 1972.

El bloque RC, que no se muestra en la figura anterior, mencionado en la **Tabla 2-2**, contiene tres grupos de tres agujeros tipo SDH del mismo diámetro, los cuales deben ser detectados por los tres ángulos de incidencia típicos ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $70^\circ$ ), para establecer el poder de resolución del sistema ultrasónico.

**2.1.1.2 Examen de las soldaduras**

El examen de las soldaduras consta de tres etapas, así (Shenefelt, 1971):

**i. Selección del ángulo de examen**

Para establecer el ángulo de examen era necesario categorizar el área transversal de la soldadura (“cuarto superior”, “medio” y “cuarto inferior”), el tipo de junta (“BUTT”, “TEE”, “CORNER” y “ELECTROGAS & ELECTROSLAG”) y su espesor. Con el espesor y el tipo de junta se ingresaba a la tabla “PROCEDURE CHART” y se establecía el “número” de procedimiento (1 a 15); luego, con este número y con el área transversal de la soldadura se ingresaba a la tabla “PROCEDURE LEGEND” para establecer el ángulo de inspección.

En la **Tabla 2-3** se representa la selección de los parámetros del examen descritos anteriormente.

**Tabla 2-3:**Parámetros del examen de UT de la versión de 1969 del AWS D1.0.

PROCEDURE CHART																		
WELD TYPE	WELD OR MATERIAL THICKNESS																	
	1/16 to 1/8	>1/16 to 1/8	>1/8 to 1/4	>1/4 to 3/8	>3/8 to 1/2	>1/2 to 3/4	>3/4 to 1	>1 to 1 1/4	>1 1/4 to 1 1/2	>1 1/2 to 1 3/4	>1 3/4 to 2	>2 to 2 1/4	>2 1/4 to 2 1/2	>2 1/2 to 2 3/4	>2 3/4 to 3			
BUTT	1	0	1	2	1G or 4	3	1G or 5	2	6 or 7	3	8 or 10	3	9 or 11	0	12 or 13	0	12	2
TEE	1	0	1	3	4	3	5	3	7	X3	10	X3	11	X3	12 or 13	X3	-	-
CORNER	1	0	1	X3	1G or 4	3	1G or 5	X3	6 or 7	X3	8 or 10	X3	9 or 11	X3	13 or 14	X3	-	-
ELECTROGAS & ELECTROSLAG	1	0	1	0	1G or 4	1**	1G or 5	P1 or P3	6 or 7	P3	15	P3	15	P3	15**	P3	15**	P3

PROCEDURE LEGEND			
AREA OF WELD THICKNESS			
No.	Top Quarter	Middle Half	Bottom Quarter
1	70°	70°	70°
2	60°	60°	60°
3	45°	45°	45°
4	60°	70°	70°
5	45°	70°	70°
6	70° C A	70°	60°
7	60° B	70°	60°
8	70° C A	60°	30°
9	70° C A	60°	45°
10	60° B	60°	60°
11	45° B	60°	45°
12	70° C A	45°	70° C B
13	45° B	45°	45°
14	70° C A	45°	45°
15	70° A	70° A B	70° B

Fuente: (Shenefelt, 1971).

**ii. Determinación de la amplitud del nivel cero de referencia**

Antes de iniciar el examen, era necesario determinar la amplitud (en dB) del eco del agujero SDH de  $\phi 1.5$  mm del bloque IIW, considerando una altura del eco que oscilaba entre el 40-60%, el cual se definía como el nivel cero de referencia o "b".

**iii. Obtención de la indicación**

Seleccionado el ángulo, se procedía con el examen de la soldadura empleando algunas formas de barrido preestablecidas y aumentando el nivel de ganancia cierta cantidad de dB (de acuerdo con la distancia del sonido) por encima del *nivel cero de referencia* (George A. Shenefelt, 1971), lo cual implicaba un aumento en la sensibilidad del examen.

Los ecos detectados que provenían de las discontinuidades y que se consideraban evaluables debido a su ubicación, se comparaban con la amplitud del eco (en dB) del *nivel cero de referencia*, de manera que se hallara la cantidad de dB, por encima o por debajo de ese nivel de referencia que se debía aumentar o disminuir para alcanzar nuevamente una altura del eco entre el 40-60%. Así se hallaba el valor de *a* o el *nivel de la indicación* sin corrección. Con este valor *a* y un factor de corrección *c*, se hallaba el *índice del defecto (d)* así:

$$d = a - b - c \quad \text{Ecuación 16}$$

El valor "c" (en dB) se hallaba a partir de la **Ecuación 17** para distancias del sonido (*s*) en pulgadas y la **Ecuación 18** para distancias del sonido en milímetros:

$$c = 2 \times (s - 1) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$c = 0,08 \times (s - 25) \quad \text{Ecuación 18}$$

El *índice del defecto* es la medida que determina que tan severa es la discontinuidad detectada para la estructura, clasificando su valor de acuerdo con unas tablas que se explican en el siguiente párrafo. De acuerdo con la AWS, cuanto más pequeño era el *índice del defecto* más dañina o severa sería la discontinuidad.

2.1.1.3 Evaluación de la indicación

El valor del *índice del defecto* permitía clasificar la discontinuidad de tres formas posibles: como reflectores grandes, pequeños o menores (véase la **Tabla 2-4** aplicable a puentes y la **Tabla 2-5** aplicable a edificaciones).

**Tabla 2-4:** Niveles de severidad de reflectores del código AWS D2.0 de 1969.

**HIGHWAY AND RAILWAY BRIDGES (Reproduced from D2.0-69)**

MINIMUM ACCEPTANCE LEVELS (DECIBELS)																	
REFLECTOR SEVERITY	WELD THICKNESS AND TRANSDUCER ANGLE																
	5/16 to 3/4		>3/4 to 1 1/2			>1 1/2 to 2 1/2			>2 1/2 to 4			>4 to 6			>6 to 8		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°			
Large Reflectors	+14	+ 9	+ 5	+ 8	+10	+2	+5	+ 7	-1	+2	+4	-3	0	+2			
Small Reflectors	+15	+10	+ 7	+10	+12	+4	+7	+ 9	+1	+4	+6	-1	+2	+4			
Minor Reflectors	+16	+11	+ 9	+12	+14	+6	+9	+11	+3	+6	+8	+1	+4	+6			

Fuente: (George A. Shenefelt, 1971).

**Tabla 2-5:** Niveles de severidad de reflectores del código AWS D1.0 de 1969.

**TABLE C2  
BUILDING CONSTRUCTION (Reproduced from AWS D1.0-69)**

MINIMUM ACCEPTANCE LEVELS (DECIBELS)																	
REFLECTOR SEVERITY	WELD THICKNESS AND TRANSDUCER ANGLE																
	5/16 to 3/4		>3/4 to 1 1/2			>1 1/2 to 2 1/2			>2 1/2 to 4			>4 to 6			>6 to 8		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°			
Large Reflectors	+ 8	+3	-1	+2	+4	-4	-1	+1	-7	-4	-2	-9	-6	-4			
Small Reflectors	+ 9	+4	+1	+4	+6	-2	+1	+3	-5	-2	0	-7	-4	-2			
Minor Reflectors	+10	+5	+3	+6	+8	0	+3	+5	-3	0	+2	-5	-2	0			

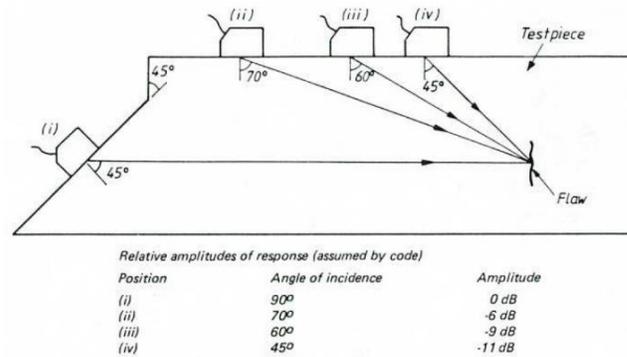
Fuente: (George A. Shenefelt, 1971).

Los reflectores grandes se rechazaban sin importar su longitud, los pequeños se rechazaban si su longitud era más grande que 3/4 in (19 mm) y los menores se rechazaban si la longitud era mayor a 2 in o 51 mm (para estimar la longitud de la imperfección se usaba la aproximación de la *caída de 6 dB*).

En la **Tabla 2-4** y **Tabla 2-5**, la AWS asume que, a medida que el ángulo de incidencia disminuye, la reflexión de la amplitud de la discontinuidad aumenta. Por lo tanto, para un ángulo de incidencia de 70°, la amplitud de la reflexión disminuiría 6dB con respecto a la reflexión de referencia (de una discontinuidad vertical); similarmente con ángulos de

incidencia de  $60^\circ$  y  $45^\circ$  se generarían reducciones en amplitud de 9 dB y 11 dB respectivamente (FHWA, 2005). Estos valores fueron estimados mediante un experimento similar al de la **Figura 2-2**.

**Figura 2-2:** Orientación del defecto relativa al haz ultrasónico supuesta por la AWS en su metodología.



Fuente: (T. J. Jessop, 1981).

Los valores del nivel de severidad para láminas de más de 2-1/2 in de espesor surgen asumiendo lo siguiente: +3dB (-6 dB menos -9 dB) para un cambio en el ángulo de incidencia de  $70^\circ$  a  $60^\circ$ ; 2dB para un cambio en el ángulo de incidencia de  $60^\circ$  a  $45^\circ$  y +5dB (-6 dB menos -11 dB) para el cambio de  $70^\circ$  a  $45^\circ$ . El valor de +3dB y +2dB fueron cuestionados por Looten, quien estimó en su investigación estos valores como 8.4 dB para el primer caso y 2.4 dB para el segundo caso (Looten, 2014, pág. 87).

## 2.1.2 La Benthlem Steel Corporation y el procedimiento de UT de la AWS

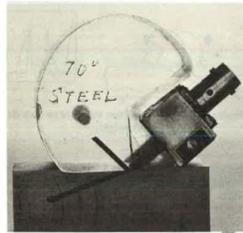
### 2.1.2.1 La BSC y el ultrasonido en puentes

La *Benthlem Steel Corporation* fue uno de los mayores fabricantes de acero y embarcaciones en EE. UU., que aplicó, desde 1964, el método de UT para examinar soldaduras en juntas a tope como una herramienta de producción (Dexter A. Olsson, 1969). La BSC fue uno de los mayores impulsores del uso del UT en el examen de soldaduras de su época e, incluso, es el autor, en conjunto con la *Bureau of Public Road* (BPR), el *U.S. Department of Transportation* y la FHWA, de uno de los primeros textos de entrenamiento para esta técnica titulado *Ultrasonic Testing Inspection for Butt Welds in Highway & Railway* (BSC, U.S. Department of Transportation, BPR, 1968). Varias posturas del texto de entrenamiento sobre la técnica operativa y la evaluación de las discontinuidades son iguales a las del procedimiento de UT de 1969 de la AWS como se describe a continuación.

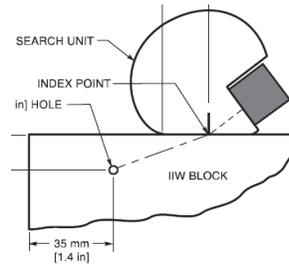
### 2.1.2.2 Técnica operativa

Las características de los equipos de inspección presentadas en los documentos de la BSC y de la AWS son en esencia iguales: el tipo de equipo y la frecuencia, las dimensiones del cristal y el diseño de las zapatas (véase **Figura 2-3**).

**Figura 2-3:** Zapatas de la BSC en 1966 y de la AWS en el 2015.



Zapata usada por la BSC (Olsson, 1966).



Zapata código AWS D1.5 (AWS D1.5, 2015).

Con respecto a la calibración de la sensibilidad del sistema ultrasónico mediante un SDH de  $\phi 1/16''$  (1.5 mm) y el examen con ángulos de incidencia cercanos a  $90^\circ$  (BSC, U.S. Department of Transportation, BPR, 1968, pág. 48) considerados por la AWS, es importante destacar que esto también fue originalmente concebido por la BSC, tal y como se señala en su texto de entrenamiento y en el artículo emitido en 1966 (Olsson, 1966). Por lo que es posible indicar que la metodología para examinar puentes con UT de la AWS fue desarrollada originalmente por la BSC y adoptada por la AWS.

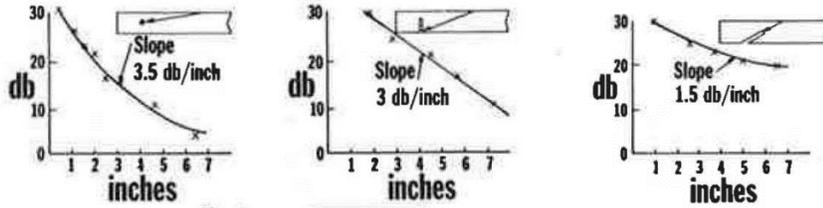
### 2.1.2.3 Evaluación de las discontinuidades

La BSC había propuesto evaluar la “severidad” de la discontinuidad mediante ciertos parámetros que se muestran en la **Tabla 2-6**, la mayoría de los cuales fueron adoptados por la AWS para su procedimiento de examen.

**Tabla 2-6:** Información para determinar la severidad del defecto según la BSC y la AWS (Olsson, 1966).

BENTHELEM STEEL CORPORATION	AMERICAN WELDING SOCIETY (Appendix C)
<b>Amplitud de la señal de retorno: una mayor amplitud implica una mayor área reflejada de la discontinuidad.</b>	Se estima el <i>índice del defecto</i> , el cual corresponde a la amplitud de la señal del eco reflejado de la superficie del defecto, que se cree es proporcional a la “severidad” de la discontinuidad.
<b>La longitud del defecto y el movimiento del transductor.</b>	Se consideran una serie de movimientos a lo largo de la soldadura para determinar la longitud del defecto.
<b>Forma y nitidez del pulso.</b>	No considerado por la AWS.
<b>Comparación de la señal que proviene de ambos lados.</b>	Se indica que todas las juntas a tope serán examinadas desde cada lado de la soldadura.
<b>Altura del defecto.</b>	Se usa la caída de 6 dB (50% amplitud del eco).

La BSC fue el primero en proponer la atenuación del sonido (coeficiente de atenuación) como “2 dB/in después de la primera pulgada” (Dexter A. Olsson, 1969), lo cual fue adoptado por la AWS como el factor “c” (véase **Figura 2-4**).

**Figura 2-4:** Curvas de atenuación obtenidas para tres tipos de reflectores.

Fuente: (Dexter A. Olsson, 1969).

Sobre la correlación discontinuidad-indicación, la BSC afirmaba que “... *por su naturaleza, la prueba de ultrasonido reflejaba directamente la severidad del defecto*”, y que el UT “...*era más sensible a defectos graves debido a que estos se tipificaban por áreas superficiales relativamente grandes*” (BSC, U.S. Department of Transportation, BPR, 1968). Tales suposiciones, concuerdan con las asumidas por la AWS, pues se parte de que la indicación de los defectos más dañinos (como grietas o faltas de fusión) siempre tiene una “amplitud mayor” y por tanto una mayor severidad (AWS D1.5, 2015).

De todo lo anterior, es posible decir que la AWS adoptó para su método de examen la mayoría de los conceptos clave, ideas y suposiciones concebidos originalmente por la BSC para el examen de UT en soldaduras. Es razonable afirmar, entonces, que el principal creador de este procedimiento fue la extinta BSC.

### 2.1.3 Cambios en el procedimiento de UT de la AWS entre 1972 y 1983

El comité de soldadura estructural creado por la AWS estableció los requisitos para edificaciones, puentes y estructuras tubulares, en un solo documento: el primer código AWS D1.1 *Structural Welding Code* publicado en 1972. Esta integración llevó al retiro de las normas AWS D2.0 y AWS D1.0 y a que el procedimiento de UT que se encontraba en el Apéndice C de estas normas, se repartiera entre la Sección 6 “*Inspection*”, la Sección 9 “*Design of New Bridges*” (tabla para estructuras a tracción) y la Sección 8 “*Design of New Buildings*” (tabla para estructuras a compresión) del AWS D1.1. Este código rigió la fabricación de edificaciones, estructuras tubulares y puentes en EE. UU entre 1972 y 1983 (se publicaron alrededor de cinco versiones).

Algunos desacuerdos técnicos entre la AWS y la AASHTO hicieron que en esta época existieran dos documentos aplicables a puentes soldados lo cual llevó a ciertas dificultades en el cumplimiento de los requisitos, a veces contradictorios (FHWA, 2005).

Es importante destacar que la versión del AWS D1.1 de 1983 contiene el procedimiento de UT que conocemos actualmente. Los principales cambios entre la versión original de 1969 y esta versión fueron: la modificación de algunos valores de los criterios A&R y el rediseño de los niveles de clasificación de la severidad de las discontinuidades (que pasaron de ser tres (reflectores “grandes”, “pequeños” y “menores”) a cuatro clases “A”, “B”, “C” y “D” cómo se puede ver en la **Tabla 2-7** y la **Tabla 2-8**. Se anota que en el Anexo A de esta investigación, se presenta una tabla que reorganiza los criterios A&R del AWS.

**Tabla 2-7:** Evolución (1972 y 1983) en los criterios de A&R del AWS D1.1 aplicables a puentes (elaboración propia).

TAMAÑO DE LA SOLDADURA Y ÁNGULO DEL PALPADOR											
Clase de severidad de discontinuidad	5/16 a 3/4	>3/4 a 1-1/2	>1-1/2 a 2-1/2			>2-1/2 a 4			>4 a 8		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
<b>Clase A</b>	+10 & lower	+8 & Lower	+4 & Lower	+7 & lower	+9 & Lower	+1 & Lower	+4 & Lower	+6 & lower	-2 & Lower	+1 & lower	+3 & Lower
<b>Clase B</b>	+11	+9	+5	+8	+10	+2	+5	+7	-1	+2	+4
			+6	+9	+11	+3	+6	+8	0	+3	+5
<b>Clase C</b>	+12	+10	+7	+10	+12	+4	+7	+9	+1	+4	+6
			+8	+11	+13	+5	+8	+10	+2	+5	+7
<b>Clase D</b>	+13 & up	+11 & up	+9 & up	+12 & up	+14 & up	+6 & up	+9 & up	+11 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up

**Notas:**

- Las casillas en amarillo representan los criterios que eran aplicables a los “reflectores grandes”.
- Las casillas en naranja representan los criterios que eran aplicables a los “reflectores pequeños”.
- Las casillas en verde representan los criterios que eran aplicables a los “reflectores menores”.
- Las casillas en blanco corresponden a valores nuevos introducidos.

**Tabla 2-8:** Evolución en los criterios A&R del AWS D1.1 aplicables a edificaciones (compresión) entre la versión de 1972 y 1983 (elaboración propia).

TAMAÑO DE LA SOLDADURA Y ÁNGULO DEL PALPADOR											
Clase de severidad de discontinuidad	5/16 a 3/4	>3/4 a 1-1/2	>1-1/2 a 2-1/2			>2-1/2 a 4			>4 a 8		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
<b>Clase A</b>	+5 & lower	+2 & Lower	-2 & Lower	+1 & Lower	+3 & lower	-5 & lower	-2 & Lower	+1 & Lower	-7 & lower	-4 & Lower	-1 & lower
<b>Clase B</b>	+6	+3	-1	+2	+4	-4	-1	+1	-6	-3	0
			0	+3	+5	-3	0	+2	-5	-2	+1
<b>Clase C</b>	+7	+4	+1	+4	+6	-2	+1	+3	-4	-1	+2
			+2	+5	+7	+2	+2	+4	+2	+2	+3
<b>Clase D</b>	+8 & up	+5 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up	+3 & up	+3 & up	+5 & up	+3 & up	+3 & up	+4 & up

**Notas:**

- Las casillas en amarillo representan los criterios que eran aplicables a los *reflectores grandes*.
- Las casillas en naranja representan los criterios que eran aplicables a los *reflectores pequeños*.
- Las casillas en verde representan los criterios que eran aplicables a los *reflectores menores*.
- Las casillas en blanco corresponden a valores nuevos introducidos.

Además de lo mostrado en las tablas, el *índice del defecto* pasó a llamarse *índice de la indicación* y se introdujo el bloque DS para verificar el control de ganancia en palpadores normales.

De otro lado, los valores del *índice de la indicación*, aplicable a puentes, para espesores entre  $\frac{3}{4}$ " y 8" se redistribuyeron en cuatro niveles y los valores para espesores entre 4"- 6" y 6"- 8" se combinaron en uno solo, algo similar sucedió para la tabla aplicable a edificaciones. Los valores del *índice de la indicación* para espesores  $\leq \frac{3}{4}$ " (aplicables a puentes) se volvieron menos exigentes: la clase más dañina pasó de +14 dB a +10 dB, lo que representa una disminución de +4 dB (teniendo en cuenta que un valor más positivo en el contexto del AWS, significa una discontinuidad menos severa). Al respecto la AWS indica que los niveles de aceptación-rechazo se hicieron 2dB más laxos para espesores entre  $\frac{5}{16}$ " -  $\frac{3}{4}$ " ya que el nivel previo era innecesario (AWS D1.1, 1983, pág. 280).

Todos estos cambios, en lugar de hacer más práctico el procedimiento, lo tornaron más confuso: por ejemplo, la inclusión de un nivel de severidad adicional hizo que la distinción entre dos clasificaciones de discontinuidades fuese más difícil pues el límite (rango) pasó de 3dB a sólo 1 dB para espesores  $\leq 1\text{-}1/2$  in; lo cual redujo enormemente la probabilidad de lograr estos niveles intermedios ya que corresponden a un valor particular.

#### 2.1.4 Procedimiento de UT del AWS D1.5 Bridge Welding Code

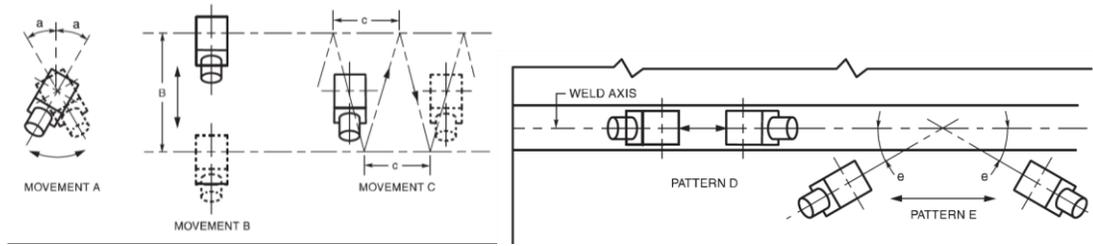
La primera edición del AASHTO/AWS D1.5 *Bridge Welding Code* nace en 1988 cuando la AWS y la AASHTO acuerdan varios aspectos técnicos en los que tenían diferencias unos años antes (FHWA, 2005). En esta edición, los criterios de A&R que estaban tabulados para edificaciones, en el AWS D1.1, pasaron a ser los criterios de A&R *para juntas a compresión*, y los criterios de A&R para puentes pasaron a ser los criterios aplicables a *juntas a tensión*; ambas tablas (para tracción y compresión) se incluyen tanto en el código AWS D1.1 (solo para edificaciones) como en el código AWS D1.5 (solo para puentes).

Luego de esto, son muy pocos los cambios que se generan en la metodología de la AWS, y, más bien, se introduce información complementaria como el Anexo K para el examen de soldaduras mediante PAUT, el cual no es discutido en este trabajo.

En los siguientes párrafos se presentan los lineamientos actuales de la metodología de la AWS, establecidos en la cláusula 6 del código AWS D1.5:2015, que se resumen en los siguientes cuatro pasos: (1) seleccionar los ángulos de incidencia para el examen de las soldaduras; (2) usar los patrones de escaneo del código; (3) evaluar la longitud de la discontinuidad con la caída de 6 dB; y (4) registrar las indicaciones rechazables según el índice de la indicación (**Tabla 2-7** y **Tabla 2-8**).

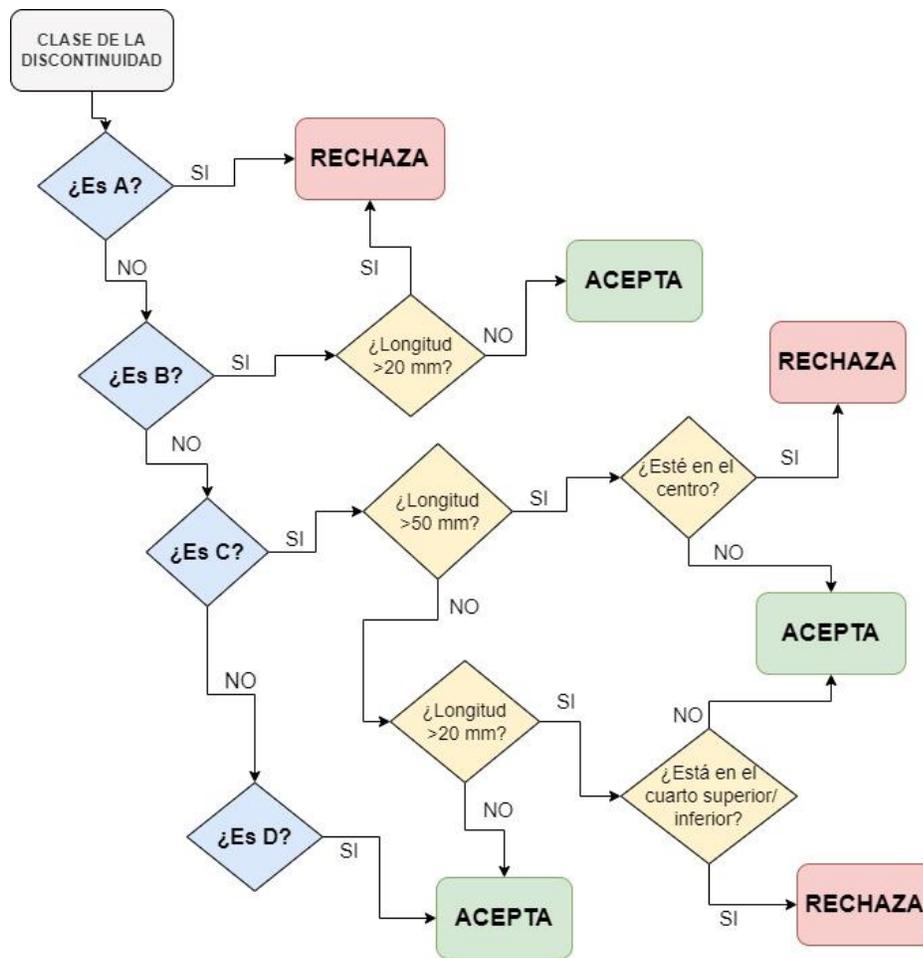
En la **Figura 2-5** se presentan los patrones de escaneo de la metodología AWS. Los patrones A ( $<10^\circ$ ), B y C son aplicables a discontinuidades longitudinales, mientras que los patrones D y E ( $<45^\circ$ ) son aplicables a discontinuidades transversales.

**Figura 2-5:** Patrones de escaneo para el examen de discontinuidades.



Fuente: Tomado del AWS D1.5 (AWS D1.5, 2015).

**Figura 2-6:** Criterios para establecer la severidad de las discontinuidad.



Fuente: Elaboración propia basado en lo indicado en el código AWS D1.5.

En la **Figura 2-6** se presenta un diagrama de flujo de la forma como se establece la severidad de la discontinuidad mediante dos aspectos clave: el *índice de la indicación* (dB) y su longitud. El *índice de la indicación* se define como “la amplitud del sonido reflejado comparado con una cantidad calibrada del sonido inicialmente transmitido, después de que

se han realizado correcciones por pérdida debido a la atenuación (AWS D1.5, 2015, pág. 419). La longitud de una discontinuidad sólo se determina cuando el valor del *índice de la indicación* de una discontinuidad lo lleva a que se clasifique como “B” o “C”. Cuando una discontinuidad se clasifica como “A” o “D” no se requiere determinar su longitud y, bien se rechaza de forma automática en el primer caso (Clase A), o se acepta en el segundo caso (Clase D).

Esto parte del supuesto de que la discontinuidad tiene un área que es lo suficientemente grande o pequeña como para que se defina automáticamente su severidad sin análisis complementarios del tipo o tamaño de la discontinuidad, lo cual se desvía de lo que sucede realmente en la interacción haz ultrasónico-discontinuidad, donde aspectos como la orientación y la rugosidad de la discontinuidad influyen en gran medida en el valor de esa amplitud. La omisión de la caracterización de las discontinuidades hace que el uso del procedimiento como apoyo para análisis críticos de ingeniería no sea posible pues el tamaño de la discontinuidad es indispensable en este tipo de análisis (T. J. Jessop, 1981).

## 2.2 CUESTIONAMIENTOS AL PROCEDIMIENTO DE LA AWS

La metodología de examen desarrollada por la AWS ha sido cuestionada de forma directa o indirecta durante los casi 60 años que lleva empleándose en Estados Unidos (y en otros países latinoamericanos) para la evaluación de puentes metálicos y edificaciones. Con el fin de entender mejor el alcance de estos cuestionamientos, se hizo una agrupación así: (1) cuestionamientos a la amplitud del eco como parámetro de detección y (2) cuestionamientos a la técnica operativa del método de la AWS. Estos dos grupos se discuten en los siguientes numerales.

### 2.2.1 La amplitud del eco como parámetro de detección y evaluación de discontinuidades

Como ya se explicó en el Capítulo 1, el examen de UT consiste en la transmisión de ondas ultrasónicas y en el análisis de las ondas reflejadas por las discontinuidades presentes en el material o componente, y que pueden ser, en el caso de uniones soldadas, poros, inclusiones de escoria, grietas, etc. En la técnica pulso-eco convencional “las señales” que provienen de las discontinuidades, se muestran en la pantalla del equipo como ecos de una determinada amplitud (dB). Estas señales deben interpretarse por el examinador para establecer si corresponden efectivamente a una discontinuidad y para evaluar si su existencia va a ser perjudicial o no para la estructura. Este es el fin último de la técnica en este tipo de aplicación: garantizar la integridad de la estructura o del componente. Para lo anterior, el AWS ha empleado la amplitud del eco como el parámetro fundamental considerando lo siguiente:

- Se supone que amplitudes de eco grandes representan discontinuidades grandes.
- Existe una correlación entre reflectores artificiales y discontinuidades naturales. Se parte del supuesto de que los reflectores artificiales generan amplitudes comparables a las que producen las discontinuidades naturales.

- Se determinan los bordes de la discontinuidad (para establecer su longitud) con la caída en amplitud del eco. Se parte del supuesto de que los bordes del haz de UT están bien definidos y estables en la transmisión de la energía.
- Una atenuación lineal de la onda en el material examinado. Se parte del supuesto de que el coeficiente de atenuación tiene un valor de 2 dB/in y que la expresión para la atenuación es una línea recta.

A continuación se resumirán los cuestionamientos encontrados en el estado del arte que critican la amplitud del eco como parámetro de la AWS para la detección y caracterización de discontinuidades.

### *2.2.1.1 La amplitud del eco y la severidad de la discontinuidad*

Muchos autores cuestionaron el uso de la amplitud (intensidad) del eco como parámetro para determinar la criticidad de las discontinuidades. Por ejemplo, Maddox expresaba sus reservas frente al uso de este parámetro “como una indicación directa del tamaño de la discontinuidad” ya que la energía reflejada también dependía de: las características de la discontinuidad, del palpador, del amplificador y de la rugosidad de la superficie examinada (Maddox, 1963). Características por las que la amplitud no podía asumirse como una función dependiente de una única variable.

En un estudio posterior, P. Bastien aseveró que “la relación entre el eco y el defecto no era absoluta” y reconoció que el ultrasonido “no era tan satisfactorio para determinar dimensiones” en discontinuidades (Bastien, 1977). Para M. Coffey et al. “las inspecciones convencionales no podían distinguir la estructura detallada de los defectos, por lo que no podían diferenciar pequeñas grietas de defectos inocuos como poros e inclusiones de escoria” (J. M. Coffey, 1979), lo cual se empezó a volver relevante a medida que se empezó a desarrollar la mecánica de fracturas.

A casi doce años de la aparición del procedimiento de UT de la AWS, se desarrolló en Estados Unidos una de las primeras investigaciones formales, más destacadas, sobre este procedimiento, cuyo informe fue publicado por la NCHRP y se denominó el Reporte 242. En este estudio, los autores hicieron referencia a tres asunciones teóricas consideradas inválidas que llevaron al planteamiento de los criterios de aceptación y rechazo del procedimiento AWS con base en la amplitud del eco de la discontinuidad (T. J. Jessop, 1981)

- La amplitud del eco es proporcional a la severidad del defecto (existe una relación entre esa amplitud y la altura de la discontinuidad (FHWA, 2005)).
- Existe una relación única entre la orientación del defecto con respecto al haz ultrasónico y su amplitud (a medida que el ángulo de incidencia disminuye se disminuye la amplitud reflejada (FHWA, 2005)).
- Asumir la atenuación del sonido como 2dB/in después de la primera pulgada.

Esta investigación concluyó que, en muchos casos “la severidad de la discontinuidad predicha por el código no se correlaciona bien con la discontinuidad natural; hay una



En la **Figura 2-7** se puede observar además que no existe una amplitud del eco única para un determinado tamaño o altura del defecto o discontinuidad, básicamente un determinado tamaño podría llegar a adoptar una amplitud del eco que podría ir desde casi 0% hasta el 400%, por lo que es imposible establecer una relación única entre estos dos parámetros. Esto además demuestra lo que ya otros autores habían indicado antes sobre la variabilidad de este parámetro (amplitud del eco) y su ineficacia para establecer la severidad de una discontinuidad detectada en una estructura.

Hacia el 2014, Ginzler afirmó que “contrario a las creencias comunes, el ultrasonido pulso-eco no proporciona una relación directa entre la severidad de la discontinuidad y la amplitud” (Ginzler E. A., 2014). Lo anterior se debe a que, en los años sesenta, se creía que la amplitud del eco estaba relacionada con el tamaño de la discontinuidad de forma proporcional, lo cual se fue descartando con el tiempo cuando se encontró que el tamaño de la discontinuidad corresponde a uno de los muchos factores que influyen en la amplitud del eco; otras características de la discontinuidad, como por ejemplo su rugosidad y orientación influyen más en la amplitud del eco (Ogilvy, 1989).

En la investigación de Looten del año 2014 en la que se evaluó el procedimiento de UT de la AWS con algunos reflectores artificiales tipo entallas y SDH y algunos cambios en el ángulo del defecto, la amplitud del haz, la rugosidad superficial y la textura del defecto (Looten, 2014), se encontró que:

- La amplitud del eco de la discontinuidad/reflector está determinada por la orientación de la discontinuidad y el ángulo de incidencia del haz (a menor ángulo menor amplitud).
- Las discontinuidades más grandes que el haz ultrasónico fueron dimensionadas de forma precisa. Las discontinuidades más pequeñas que el haz fueron sobredimensionadas. Este sobredimensionamiento se incrementa con el aumento en la distancia del sonido, debido a la divergencia del haz.

El estudio más reciente de UT en puentes, desarrollado por una entidad americana, es el reporte de investigación 908 (NCHRP), cuyo objetivo fue el desarrollo de criterios de aceptación para soldaduras de penetración completa con técnicas avanzadas de ultrasonido, básicamente el Phased Array (PAUT). Este estudio pretendía modificar el Anexo K aplicable a PAUT del código AWS D1.5:2015 considerando criterios de aceptación basados en mecánica de fracturas (Robert J. Connor, 2019). Sin embargo, incluso con estas técnicas avanzadas de ultrasonido los autores sugieren mantener la concepción tan discutida del uso de la amplitud del eco para establecer la severidad de la discontinuidad natural, sin consideraciones específicas sobre el tamaño de la discontinuidad, lo cual resulta contradictorio con todos los análisis llevados a cabo hasta el momento.

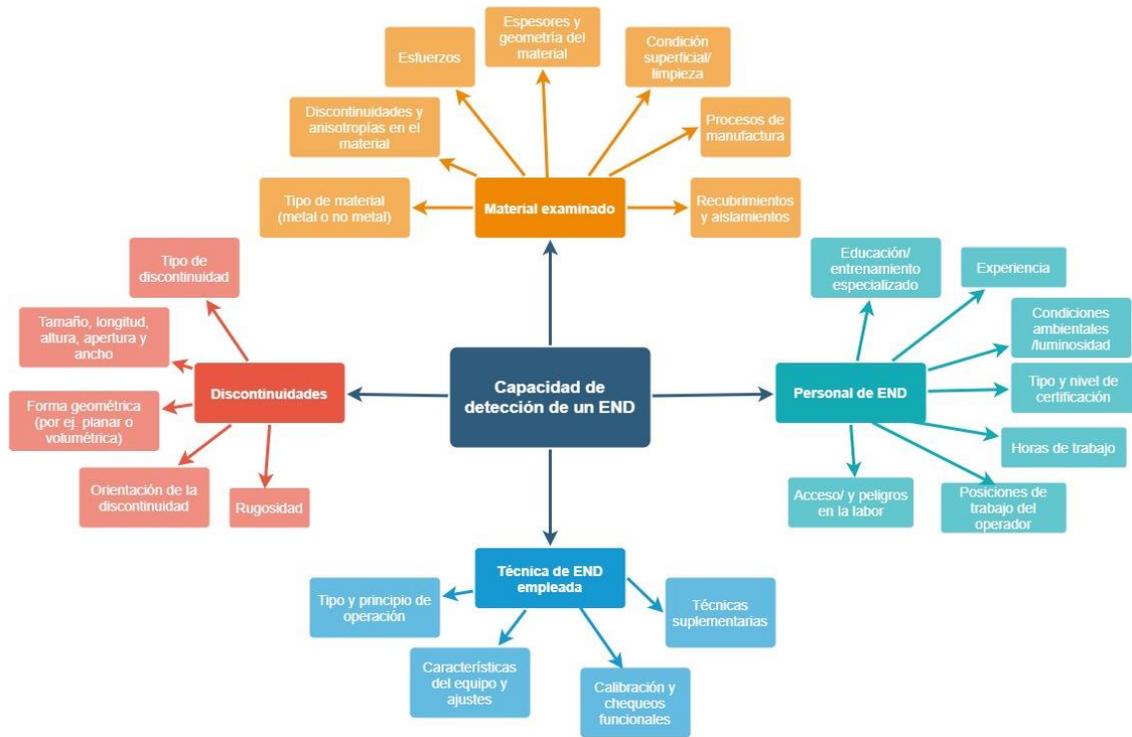
Muchos de estos autores también discutieron algunos de los parámetros que influían en la amplitud del eco, los cuales no eran sólo aspectos de la discontinuidad sino también del sistema ultrasónico y del material examinado. En la **Tabla 2-9**, se resumen las consideraciones de algunos de estos autores y en la **Figura 2-8** se presenta un resumen mediante las concepciones de una investigación de 1999, la cual agrupa los parámetros

que influyen en la amplitud del eco en: aquellos asociados con el material, las discontinuidades, el personal de END y la técnica de END.

**Tabla 2-9:** Aspectos que influyen en la altura del eco.

AUTOR(ES)	ASPECTO	ALTURA DEL ECO
<b>(Rumsey, 1960)</b>	Energía transmitida	“la energía que se transmite del transductor es, en general, mucho mayor que la reflejada por el defecto”. Por lo que no se puede esperar percibir un eco con la misma energía transmitida originalmente a la discontinuidad.
<b>(Bastien, 1968)</b>	Composición química de la discontinuidad	Las propiedades acústicas de la discontinuidad
<b>(Bastien, 1977)</b>	Ángulo de incidencia en la discontinuidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) La zona muerta.</li> <li>b) Orientación haz-discontinuidad.</li> <li>a) Regiones sin penetración del haz.</li> <li>b) La impedancia acústica discontinuidad-material.</li> <li>c) Tamaños de grano grandes con respecto a la longitud de onda.</li> </ul>
<b>(Obraz, 1978)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometría y posición de la discontinuidad.</li> <li>• Palpador.</li> </ul>	“La altura de eco dependía del tamaño, la profundidad y la posición de la discontinuidad en la trayectoria, así como de las propiedades del palpador”
<b>(J. M. Coffey, 1979).</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energía transmitida</li> <li>• Propiedades acústicas de la discontinuidad</li> </ul>	<p>“La potencia de la señal dependerá de la cantidad de sonido que se transmite al componente y de las propiedades reflectantes de los defectos (para lo cual todavía no hay suficientes estudios)”.</p> <p>“un defecto será detectable cuando su señal (eco) crezca por encima del ruido de fondo y de grandes ecos de interferencia”</p>
<b>(T. J. Jessop, 1981)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometría de la discontinuidad</li> <li>• Material examinado</li> </ul>	<p>Tipo de defecto, forma y orientación</p> <p>Propiedades del material</p> <p>Eficiencia de acoplamiento del palpador en la superficie</p>
<b>(Thompson, 1983)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometría de la discontinuidad</li> <li>• Sistema ultrasónico</li> <li>• Material examinado</li> <li>• Palpador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) La orientación, rugosidad y forma de la discontinuidad.</li> <li>b) Las características del transductor y la instrumentación electrónica.</li> <li>c) La absorción de la onda en el material.</li> <li>d) Los cambios en la intensidad del haz ultrasónico durante la propagación.</li> </ul>
<b>(S. Williams, 1985)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometría de la discontinuidad</li> <li>• Material examinado</li> <li>• Personal END</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Las características del defecto (tamaño, forma y orientación)</li> <li>b) la ubicación del defecto (posición en el espesor, dirección y proximidad)</li> <li>c) La geometría de la soldadura</li> <li>d) Las propiedades de materiales</li> <li>e) El acceso del personal</li> </ul>
<b>(Ogilvy, 1989).</b>	Rugosidad de la discontinuidad	La rugosidad de la superficie de inspección y del defecto. “una alta rugosidad incrementa la detección de algunos defectos por encima de 20° de desorientación en el haz incidente”.
<b>(R.L. Hockey, 1991)</b>	Características electrónicas del equipo	Cambios en el ancho de banda y frecuencia central del palpador.
<b>(Österberg, 2000)</b>	Características electrónicas del equipo	Los defectos de materiales pueden tener características frecuencia-dominio que causan que la amplitud de su eco difiera significativamente entre equipos de inspección ultrasónica de diferentes anchos de banda y frecuencia.

**Figura 2-8:** Parámetros que pueden influir en la capacidad de detección de un END.



Fuente: adaptado de (Olav Forli, 1999).

En síntesis, la amplitud del eco de la discontinuidad no es un parámetro adecuado para definir la severidad de las discontinuidades pues influye muy poco en la amplitud del eco. Esta aparente falta de relación entre el tamaño de la discontinuidad y la amplitud del eco impide establecer, en términos prácticos, si la discontinuidad es efectivamente perjudicial para la estructura o componente que la contiene. Sin embargo, a pesar de que esto fue indicado por diversos autores a lo largo de los años, e incluso por las mismas entidades americanas que regulan la fabricación de los puentes en Estados Unidos, no hubo un cambio en el procedimiento tendiente a corregir esta y otras falencias.

A pesar de los cuestionamientos del procedimiento para caracterizar discontinuidades, a la fecha el procedimiento de UT se sigue usando tanto en Estados Unidos como en Latinoamérica, sin que se vislumbre todavía un cambio en un futuro próximo.

### 2.2.1.2 Los reflectores artificiales y las discontinuidades de soldadura

El uso de la amplitud del eco de reflectores artificiales para establecer la severidad de las discontinuidades se inició en 1959 con los estudios del ingeniero alemán J. Krautkrämer, quien propuso estimar el tamaño de los defectos comparando el eco de la discontinuidad con el eco de FBHs perpendiculares al haz mediante el uso de diagramas Distancia/ganancia/ tamaño (DGS) o AVG ( Abstand Verstärkung Grosse). Sin embargo como lo había advertido el mismo autor, ésta aproximación sólo sería válida para defectos ubicados en el campo lejano y solamente “en casos muy favorables” podría dar una idea

del tamaño real del defecto (J. Krautkrämer, 1959). Pese a estas advertencias del mismo autor, el método se popularizó tanto en Europa como en Estados Unidos.

Con la popularización del método de Krautkrämer, empezaron las críticas sobre su efectividad, principalmente en cuanto a la capacidad que tendrían los reflectores artificiales para simular la respuesta de las discontinuidades de las soldaduras, y sobre las condiciones en las que podría aplicarse el método.

Respecto a la aplicabilidad, existen varias investigaciones que apuntan a que las condiciones para que se presente un defecto que tenga las características “ideales” planteadas por el método Krautkrämer son poco frecuentes e improbables. Por ejemplo, el *Institut de chercheurs de la Siderurgie* concluye que “en la práctica, la ocurrencia de un defecto plano es muy rara”. En 1977, este mismo instituto indicó que la aproximación de Krautkrämer solo puede aplicarse de manera exitosa a “defectos planos circulares o ligeramente elípticos con superficies suaves, en ángulos perpendiculares al haz ultrasónico, lo cual es una condición que en la práctica nunca aplica” (Bastien, 1977).

Al comparar la amplitud del eco de la discontinuidad con la de un reflector de calibración (un corte de una sierra o un FBH), M. Coffery et al. concluyeron que: “la amplitud del eco depende tanto de la forma y orientación del reflector como de su tamaño”. De manera que esta aproximación “no puede ser aplicada de forma general”. Estos autores consideran que la técnica sólo debería usarse en situaciones donde *los defectos son pequeños y se haya demostrado su buena correlación con discontinuidades naturales durante la calibración* (J. M. Coffey, 1979). Años después, Punjani et al. indicaron que “la aproximación al tamaño relativa a un estándar de referencia, como por ejemplo un agujero de fondo plano, es meramente cualitativa y poco confiable” (Punjani, 1984).

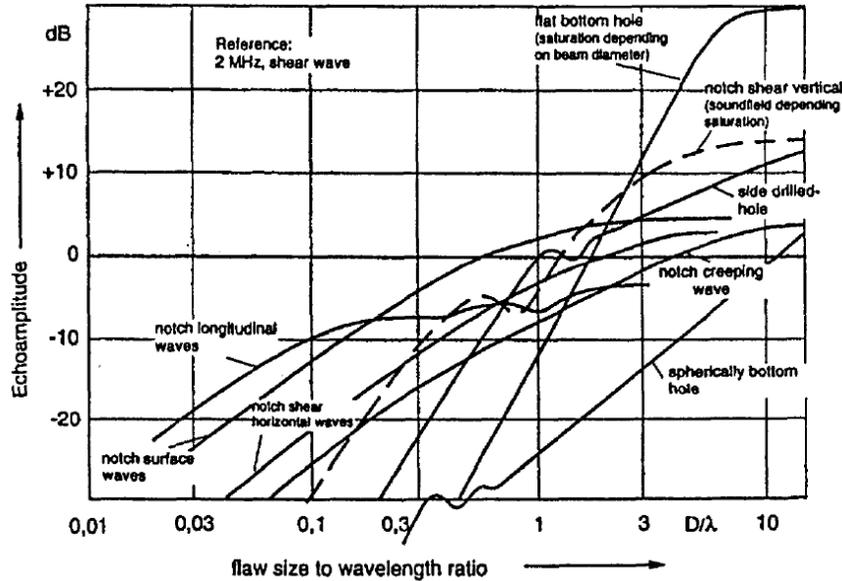
Para S. Williams et al., en la mayoría de los defectos la comparación de la amplitud del eco mediante reflectores artificiales ofrece poca información sobre el tamaño real de las discontinuidades. Además, los autores creían que sólo era posible establecer el tamaño de las discontinuidades de esta manera, cuando las discontinuidades eran menores que el haz ultrasónico. Para discontinuidades mayores que el haz, los autores creían que no existía una correspondencia entre la amplitud del eco y su tamaño (S. Williams, 1985). Sin embargo, estas afirmaciones no son ciertas, pues el tamaño de discontinuidades mayores que el haz podría evaluarse, siempre y cuando estén a una distancia adecuada del palpador y se realicen movimientos para establecer los límites de la discontinuidad.

Respecto a la sensibilidad de las evaluaciones mediante la amplitud de eco con reflectores artificiales, los ensayos realizados por Tutzschky, utilizando FBHs, les permitieron concluir que los “reflectores FBH menores a 1.5 mm no eran detectados”, y que el reflector debería tener por lo menos 2.5 mm para poder detectarse (Tutzschky, 1987).

En el año 2000, la Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI) emprendió un gran estudio para “establecer las características esenciales que debían tener los defectos para examinarse con END”. Entre los hallazgos de esta investigación que se muestran en la **Figura 2-9** se encuentran que la relación de la amplitud del eco con el tamaño del reflector/longitud de onda es altamente dependiente del tipo de reflector (FBH, NTH, EBH

y SDH), y no es necesariamente proporcional al tamaño del reflector, los autores concluyen que “no existe una dependencia monótona predecible” (Österberg, 2000).

**Figura 2-9:** Amplitudes del eco para diferentes tipos de reflectores artificiales.



Fuente: (Österberg, 2000, pág. 22(50)).

Para la SKI, el tipo de reflector artificial para la evaluación de discontinuidades no debería seleccionarse únicamente por su aparente similitud geométrica con las discontinuidades, sino más bien por su similitud en la respuesta que tendría cuando interactúa con la onda (Österberg, 2000). Por lo tanto, la SKI sugiere que lo mejor es trabajar con discontinuidades naturales en lugar de reflectores artificiales.

El uso de discontinuidades naturales en ultrasonido ha sido explorado principalmente por el Instituto Internacional de Soldadura (TWI), quienes consideran cuatro formas de producir discontinuidades naturales de forma efectiva (con tolerancias muy ajustadas en su tamaño) así: defectos implantados, modificación del procedimiento de soldeo, defectos obtenidos por mecanizado y defectos obtenidos por propagación. Con estos métodos se pueden obtener tolerancias del orden de  $\pm 0.5$  mm de alto y  $\pm 1$  mm en su longitud (M Consonni, 2014). Sin embargo, es importante anotar que la fabricación de este tipo de discontinuidades resulta mucho más costosa que los reflectores artificiales.

En otro estudio del año 2010 se afirmó que “los reflectores planos circulares generan una amplitud mayor que un reflector cilíndrico y que un reflector esférico” (Tennakoon T. , 2010), lo cual quiere decir, según el autor, que los reflectores FBH tienen una respuesta mayor a la que genera un reflector SDH o EBH. Esto es coherente con H. Wüstenberg et al. que concluyen que la respuesta de los reflectores SDH y FBH son diferentes (H. Wüstenberg, 2020), y, por tanto, su relación con la respuesta de las discontinuidades sería igualmente diferente.

En vista de que la mayoría de los autores advierte sobre la falta de relación que existe en las respuestas ultrasónicas de los reflectores artificiales y las discontinuidades, resulta importante preguntarse entonces cuáles características de las discontinuidades permiten o no su detección. La **Figura 2-10** presenta un resumen de algunas de estas características propuestas por Virkkunen. Estudios de este tipo ya habían sido desarrollado muchos años antes, como los de H Wüstenberg et al., en los que, además, se hacía diferencia entre difracción y reflexión (H. Wüstenberg, 2020).

**Figura 2-10:** Características esenciales para la detección y evaluación de grietas.



Fuente: Adaptado de (Virkkunen, 2011).

### 2.2.1.3 Estimación de la longitud de la discontinuidad con la caída de 6 dB

En el UT pulso-eco, además de estimar la severidad de la discontinuidad con la amplitud del eco, se estimaba también su tamaño con la aproximación de “caída de decibeles” (DD), el cual estima la longitud de la discontinuidad mediante el desplazamiento del palpador (lateralmente o hacia delante y hacia atrás) hasta que la altura máxima del eco cayera hasta un determinado porcentaje de la amplitud o cantidad de dB. Este movimiento permite establecer los bordes de la discontinuidad, siempre y cuando ésta sea más grande que el haz del palpador. Esta caída va desde el 50% (6 dB) hasta 90% (20 dB). El método de UT de la AWS usa la aproximación de 6 dB o caída del 50% de la altura del eco.

Esta metodología también ha sido criticada por varios autores desde que se empezó a usar el ultrasonido. Un estudio de este estilo es el del B. Kato del año 1976, en el que el autor compara los métodos de caída (6 dB del AWS y 10 dB del Japanese Industrial Standard o JIS, o 50% y 70% de caída del eco), de desvanecimiento (100%) y de *Ultrasonic B-Scope angle beam* para determinar su capacidad de estimar la longitud de discontinuidades (B. Kato, 1976). Kato concluye que el método de desvanecimiento (caída del 100%) del eco era el más preciso al estimar el tamaño de las discontinuidades.

Para el caso de los métodos más prácticos, el de caída de 10 dB (70% de altura del eco) es superior al de 6 dB, ya que éste último tiende a subestimar la longitud del defecto. El

autor también concluye que "no hay diferencias en la confiabilidad entre los dos métodos... y el nivel de precisión de los métodos parece ser insuficiente para estimar la altura del defecto" (B. Kato, 1976).

En el reporte 242, se indicó que la aproximación DD es confiable para estimar el tamaño de la discontinuidad siempre que se asuma lo siguiente (T. J. Jessop, 1981):

- El haz ultrasónico es un cono sencillo con bordes rectos.
- La distribución de la presión del sonido en el haz varía simétrica y suavemente.
- La señal aumenta o disminuye cuando el transductor se mueve a través del defecto se puede detectar en la pantalla del equipo.
- Los puntos de caída de dB (bordes del haz) coinciden con los bordes de la discontinuidad.

De acuerdo con Jessop et. al. la aproximación de caída de 20dB tendería a subestimar el tamaño de la discontinuidad, alrededor de 2 mm, cuando se empleaban ángulos de 45° y 60° (T. J. Jessop, 1981).

Años después, en 1987 la *Atomic Energy Control Board* de Canadá realizó un estudio con discontinuidades reales y artificiales para comparar las diferentes aproximaciones de caída de dB, así: 1dB (caída del 11%), 3dB (caída del 29%), 6 dB (50% -AWS-), 12 dB (75%), 14 dB Drop (80%), 20 dB Drop (90%). Del estudio se concluyó que la técnica más precisa era la de 14dB Drop (80%) y que, cuando se usaba una caída menor que 14 dB se tendía a subestimar el tamaño de las discontinuidades, y a sobreestimar el tamaño con caídas por encima de 14 dB.

Del estudio del *Atomic Energy Control Board* también se concluyó que las discontinuidades "con una longitud menor al ancho del haz ultrasónico no podían evaluarse con las técnicas de caída de decibeles", ya que se terminaba midiendo el ancho del haz en lugar de las dimensiones de la discontinuidad (Murphy, 1987), esto es debido a que los bordes del haz angular terminan incidiendo con las caras o bordes de las lámina de acero examinadas, por lo que se terminan interpretando tales ecos como si existiera una discontinuidad.

Para Ogilvy, las técnicas de verificación del tamaño a través de la caída de decibeles (dinámica del eco) requieren una cuidadosa interpretación de los datos cuando la rugosidad está presente (Ogilvy, 1989).

En otro estudio del 2011, el autor compara las técnicas de 6 dB y 12 dB para dos palpadores de  $\phi 12.7$  mm y dos frecuencias (3.5 MHz y 5 MHz) sobre entallas fabricadas por EDM. Los resultados contradicen lo indicado por autores previos, ya que indica que la técnica de 12 dB tiende a sobrestimar "entre 3 y 7 mm la longitud de las entallas". Además indica que un aumento en la frecuencia reduce dicho error en un determinado tamaño por sólo 2-3 mm (Ciorau, 2011). Finalmente el autor recomienda que "para discontinuidades de 10 mm debería usarse la técnica de 6 dB" y "por encima de 10 mm" se puede usar cualquiera de las dos aproximaciones.

Otros estudios más recientes, cuestionan la caída de 6 dB así:

- Para Looten los defectos menores al tamaño del palpador tienden a ser sobreestimados en su longitud cuando se usa la aproximación de caída de 6 dB (Looten, 2014, pág. 39).
- Alok et al., concluyen que la aproximación de caída de 6 dB con zapatas de 45° y 60° tiende a sobreestimar la altura de las discontinuidades, cuando se examinan reflectores tipo SDH. Para el caso de ranuras inclinadas, la aproximación se vuelve más precisa si la discontinuidad se orienta perpendicular al haz del sonido y su tamaño es igual o mayor que el ancho del haz en ese punto (Alok Prakash, 2015).
- P. Holloway indica que la aproximación de 6 dB sólo es adecuada para reflectores ideales SDH, los cuales difieren de las discontinuidades reales (Holloway, 2021).
- En el estudio del 2014 de Daniel W., se concluyó que la caída de 6 dB tendía a sobreestimar el tamaño de los defectos que tenían un tamaño menor que el transductor (Looten, 2014, pág. ix).

A pesar de todas las críticas que ha tenido la aproximación de DD, no se ha desarrollado un procedimiento alternativo que sea igualmente confiable para establecer el tamaño de la discontinuidad partiendo de la dinámica del eco en ultrasonido en SCAN A. Además, aunque la caída de 6dB ha sido criticada debido a que tiende a sobreestimar el tamaño de la discontinuidad, su practicidad hace que sea difícil considerar un método diferente pues sería más difícil de percibir en la pantalla del equipo y de registrar por parte del operador.

#### 2.2.1.4 Atenuación del sonido lineal (2 dB/in)

Los códigos AWS (D1.1 y D1.5) usan el valor de 2 dB/in (0.08 dB/mm) para establecer la forma como el sonido se atenúa a medida que recorre cierta distancia en el interior del material (véase la **Ecuación 16** del *Índice de la indicación*). No es clara la forma en como la AWS llegó a este valor; lo único que se sabe es que este mismo valor fue propuesto por primera vez por la BSC (Dexter A. Olsson, 1969), y que fue el resultado de una serie de experimentos realizados por la BSC con diferentes tipos de reflectores artificiales, los cuales generaron atenuaciones entre 1.5 y 3.5 dB/in. A esta aproximación de la AWS se le conoce como atenuación fija (del inglés *fixed attenuation*).

El valor de 2 dB/in, se reconoce en acústica como el coeficiente de atenuación. Sin embargo, la manera como la AWS asume que sucede la atenuación del sonido en el material difiere un poco de las fórmulas de atenuación usadas en acústica. La AWS asume que existe una relación lineal entre la atenuación y la distancia del sonido, mientras que las fórmulas de la acústica dicen que son del tipo exponencial y se relaciona con la amplitud del eco en lugar de la distancia del sonido. Estas ecuaciones fueron presentadas en el numeral **1.2.5 Atenuación de las ondas**.

Existen muy pocos estudios que cuestionen de forma directa este valor de atenuación de la AWS. El más importante es el Reporte 242 en el que se indica que el valor de 2 dB/in “no describe de forma correcta la respuesta teórica de reflectores pequeños fuera del campo cercano, ni toma en cuenta las variaciones de atenuación que pueden ser profundamente afectadas por la relación distancia-amplitud” (T. J. Jessop, 1981).

Baldev et al. Reconocen que existen tres parámetros principales que inciden en la pérdida de energía del pulso ultrasónico: la dispersión de haz (consiste en una función geométrica donde la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia); absorción (energía mecánica se convierte en energía térmica); dispersión (reflexión en los límites de grano, pequeñas grietas y otras imperfecciones) (BALDEV RAJ, 1995).

Otro estudio de Looten sugiere que no debería usarse un único valor de atenuación para caracterizar la pérdida en amplitud con la distancia del sonido para todos los defectos. En su lugar sugiere incorporar una curva DAC para mejorar la precisión con la que se define el valor del *Índice de la indicación* (Looten, 2014) y, en vez de los 2 dB/in, sugiere asumir un valor entre 4 y 4.25 dB/in.

De hecho esta incorporación de una curva de atenuación, que no fue propiamente una DAC sino una curva Time/Correction/ Gain (TCG), fue propuesta por Paul Holloway para mejorar el procedimiento de UT de estructuras metálicas del código canadiense CSA W59, y, de hecho, ya fue considerada en la versión del año 2018 de este documento (Paul Holloway A. C., 2018), (Robert J. Connor, 2019).

En otro estudio de Paul Holloway del año 2017, el autor indica que la atenuación del sonido se basa en tres factores primarios: “dispersión, absorción y divergencia” (Holloway, 2017), y que la suma de la atenuación debido a la dispersión y la absorción en aceros al carbono es del orden de 0.01 dB/mm (0.25 dB/in) en el rango de 2 a 4MHz. Esto es casi ocho veces menor que el valor usado por la AWS.

Paul Holloway en el 2017 indica que la atenuación del sonido se basa en tres factores primarios: “dispersión, absorción y divergencia” (Holloway, 2017), y que la suma de la atenuación debido a la dispersión y la absorción en aceros al carbono es del orden de 0.01 dB/mm (0.25 dB/in) en el rango de 2 a 4 MHz. Esto es casi ocho veces menor que el valor usado por la AWS. Además, el autor indica que la atenuación no sigue un modelo lineal y que depende de la forma del haz del transductor así: “menos divergencia genera menos atenuación” y “mayores ángulos de incidencia exhibirán una mayor atenuación” (Holloway, 2017). Los modelos de atenuación generados para palpadores AWS de 2.25 MHz con el software CIVA le permiten concluir: la función lineal con pendiente 2 dB/in se ajusta bien para un ángulo de incidencia de 45°, y no tan bien para ángulos de 60 y 70°. Por lo cual la suposición de la AWS es imprecisa para ángulos de incidencia de 60 y 70°.

Las críticas de Paul Holloway, al parecer llevaron a que se hicieran cambios en la forma de estimar la atenuación en la normativa canadiense (CSA W59) en la versión del 2018 (Paul Holloway A. C., 2018; Paul Holloway A. C., 2017). Donde se reemplazó la fórmula de atenuación de la AWS por curvas TCG.

En conclusión, la aproximación dada por la AWS para la atenuación no es coherente con las investigaciones actuales en ultrasonido y se asumen relaciones que tienden a tener una caída menos pronunciada que la de las aproximaciones que se tienen en acústica. Para la atenuación se debería considerar el empleo de bloques que permitan obtener información real de lo que sucede o considerar gráficos previamente simulados en software para mantener el pragmatismo del procedimiento de la AWS en este aspecto.

## 2.2.2 Técnica operativa del procedimiento y sus limitaciones

### 2.2.2.1 Técnica operativa

Con respecto a la técnica operativa, se han considerado las siguientes limitantes en el procedimiento como problemas que inciden en la capacidad de detección que puede alcanzarse con el procedimiento de la AWS:

- Preferencia por el ángulo de 70° para el examen de soldaduras.
- Limitar las dimensiones del cristal del transductor y de las zapatas (que restringe el examen de uniones con bajos espesores).
- Limitar a frecuencia de inspección a un rango mínimo de 2-2.5 MHz.

De acuerdo con (AWS D1.5, 2015) y con Dexter (Dexter A. Olsson, 1969) el ángulo de refracción más perpendicular a la discontinuidad sería el óptimo para detectar aquellas discontinuidades más perjudiciales (verticales) y, por tanto, debería ser usado siempre. El autor y la BSC suponían que los defectos típicos de producción tendían a ser verticales (perpendiculares a la superficie) y, por tanto, su detección (amplitud grande) se lograba mejor con ángulos que incidieran casi de forma perpendicular a esta discontinuidad. Esto descartaba la existencia de discontinuidades con otro tipo de orientaciones.

Para Looten el ángulo de inspección más eficiente no es el que establece por defecto el procedimiento prescriptivo de la AWS sino el que se requiera para las condiciones que tiene la discontinuidad, pues, tal y como lo afirma el autor, una discontinuidad detectada con 70° también pudo haberse detectado con 45° (si la geometría de la soldadura es favorable). Este autor considera que no se debería restringir el uso de un ángulo de incidencia particular (Looten, 2014, pág. 90). Paul Holloway considera lo mismo e indica que el ángulo debería seleccionarse con base en la geometría de la soldadura y, además, un ángulo de 45° podría ser una buena selección en muchos casos ya que genera una menor pérdida de energía (Paul Holloway A. C., 2018).

Los palpadores típicos del procedimiento de la AWS son de un tamaño relativamente grande (tanto el transductor como la zapata), lo cual aumenta la distancia del índice de salida del haz al extremo de la zapata e imposibilita examinar en primera pierna soldaduras de espesores pequeños (del orden de la ½ in), que es un precepto fundamental de la AWS. Esta limitación ha sido criticada principalmente por Paul Holloway (Paul Holloway A. C., 2018; Paul Holloway A. C., 2017).

Limitar la frecuencia con la cual se puede realizar el examen de ultrasonido ha sido criticada por Paul Holloway, pues restringe la posibilidad de contar con un procedimiento que se adapte mejor a las circunstancias que se requieren en un determinado proyecto (Paul Holloway A. C., 2018; Paul Holloway A. C., 2017). Las frecuencias que usa la AWS son relativamente bajas, y en algunos casos se podría requerir frecuencias un poco mayores para mejorar la detección de un determinado tamaño de discontinuidad.

### 2.2.2.2 Claridad del procedimiento y variabilidad de los resultados

El procedimiento de UT de la AWS se ha reconocido como un método difícil de entender para los examinadores, básicamente por lo siguiente (Paul Holloway A. C., 2018):

- Asumir que valores positivos grandes en el índice de la indicación “d” implican una discontinuidad menos severa y los valores negativos una discontinuidad más severa. Esto resulta contraintuitivo.
- Aumentar determinada cantidad de dB por encima del nivel cero de referencia para realizar la exploración.

Otro estudio que hace referencia a lo poco claro que es el procedimiento para el examinador es el de Robert E, en el que se destacó la necesidad de someter a los examinadores a pruebas especiales cuando las juntas tienen respaldos metálicos (Robert E. Shaw Jr., 2002). En el estudio de Jessop et al. se recomendó algo similar aunque considerando un esquema de calificación nacional del personal de ensayos no destructivos, diferente al esquema ASNT orientado al empleador.

## 2.3 INTERPRETACIÓN DE LA FORMA DEL ECO

Desde los inicios del impulso-eco se trató de establecer el tipo de discontinuidad a partir de la forma del eco. Sin embargo, este método se ha descartado en muchas ocasiones porque no parece dar una información consistente en todos los casos. Para M. Coffery et al “la señal depende de la cantidad de sonido transmitido al componente y más fundamentalmente de las propiedades reflectantes de los defectos...” “Sin embargo, entender completamente las propiedades reflectantes de, incluso, obstáculos elementales continúa siendo un problema desafiante en la teoría de difracción de ondas elásticas. “Además el problema inverso de interpretar los patrones de ecos en una forma rigurosa es un terreno largamente inexplorado” (J. M. Coffey, 1979, pág. 154).

En la **Tabla 2-10** se resume como algunos autores abordan el análisis de la forma del eco para distinguir las diversas discontinuidades mediante este parámetro.

**Tabla 2-10.** Forma del eco (SCAN-A) esperada para discontinuidades de soldaduras.

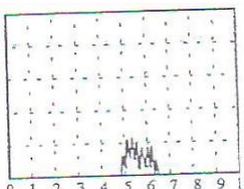
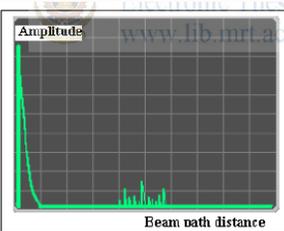
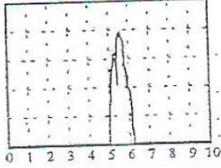
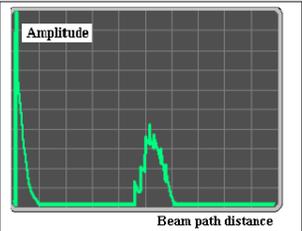
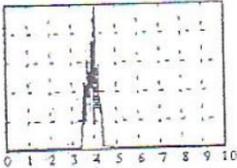
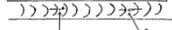
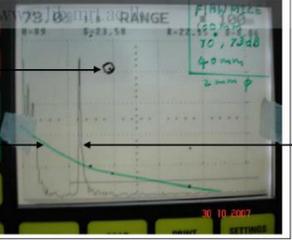
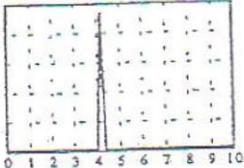
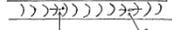
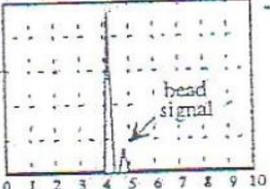
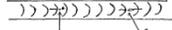
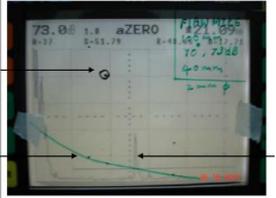
DISCONTINUIDAD	Ibrahim Burhan 2019	AUTORES (IAEA, 2021, pág. 205)	(Tennakoon T. , 2010)
Porosidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Low amplitude”.</li> <li>• “Giving multiple signals with a wide signal maintain on orbital”</li> </ul> 	<p>“This gives rise to a lot of tiny echoes, depending on the number and distribution of the pores”.</p> <p>“In most cases, echoes from pore pockets can be distinguished from slag inclusions because the former ones give much smaller echoes whereas the latter ones give high pine-shaped echoes.”</p> 	<p>“Give rise to a lot of tiny echoes, depending on the number and distribution of the pores. There are a number of multiple echoes with small amplitudes”</p> 

Figure 8.17

DISCONTINUIDAD		AUTORES		
		Ibrahim Burhan 2019	(IAEA, 2021, pág. 205)	(Tennakoon T., 2010)
Inclusión de escoria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Signal contains numerous half cycles and rounded peak"</li> <li>• "Signal appears to fall as the beck edge rises"</li> </ul> 	<p>When the probe is orbited around the flaw on both sides of the weld seam the echo height usually will not change; only the branches of the pine tree will change shape and position. If the flaw is elongated parallel to the seam, a lateral scan will show a steady echo signal height over a significant length of scan while a depth scan will show a sharp peak over a short distance</p>  <p>Figure 8.18.</p>	<p>"Swiveling the probe on the same spot causes the echo indication to vary randomly, some peaks rise and some falls and indication position in either on the screen"</p> 	
Grietas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "High amplitude and multi-faceted reflector"</li> <li>• "Signal rise and fall on the swivel and lateral scanning"</li> <li>• "Decrease in amplitude if orbital scanning"</li> </ul> 	<p>They reflect the sound energy totally in a particular direction. The echo height falls off drastically when the probe is orbited around the defect or rotated about its own axis from its position of maximum echo signal.</p>   <p>Figure 8.19.</p>	<p>"Produces sharp echo when the beam is at right angle to the defect"</p> 	
Penetración incompleta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "High amplitude of both side (A and B) of welded plate"</li> <li>• "Rapidly decreasing in amplitude on rotational scanning"</li> </ul> 	  <p>Figure 8.19.</p>	<p>"Gives clear and Sharp echo. The echo disappears when the probe is moved orbital"</p> 	
Falta de fusión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "High amplitude"</li> <li>• "Rapidly decreasing in amplitude on the swivel and orbital scanning"</li> <li>• "Remain the amplitude when lateral"</li> </ul> 	  <p>Figure 8.19.</p>	<p>"Echo trace remains in one position when the probe is moved over a given section of the weld in a direction at right angles to it depending on the size of the defect"</p> 	
Socavado	No indicado			<p>"Gives a clear sharp signal. At the same time, the maximum amplitude occurs at either half or one slap distance between the probe and the weld"</p>

Aunque muchas veces se ha intentado adoptar esta aproximación, en la realidad es posible ver que esta interpretación no genera información que pueda ser interpretable de forma sencilla, ya que las discontinuidades naturales producen respuestas mucho más complejas que las mostradas en los documentos resumidos en la tabla, debido a la cantidad de parámetros que influyen en la amplitud y en la forma del eco.

## **2.4 ANÁLISIS FINAL DEL ESTADO DEL ARTE Y SU RELACIÓN CON LA INVESTIGACIÓN**

Es importante resaltar que no se encontraron trabajos o investigaciones que evaluaran la incidencia de cambios en el procedimiento AWS en su capacidad de detección y en su capacidad de evaluación, de forma sistemática, mediante reflectores artificiales. El método AWS ha sido poco analizado, probablemente por las falencias de origen que tiene, y, por tanto, pocos trabajos fueron encontrados al respecto, algunos de los cuales fueron de entidades estatales relacionadas con puentes, como el Reporte 242, la publicación FHWA-HRT-04-124 y el Reporte 908. Los dos primeros trabajos usaron discontinuidades naturales y el último simulaciones con software CIVA.

Las investigaciones independientes fueron principalmente de Paul Holloway (con cuatro publicaciones), la investigación de maestría de Looten del año 2014 y la investigación de Robert E. del 2002 que consideró el procedimiento D1.1 (qué, como se explicó, es básicamente igual al D1.5 excepto por algunas condiciones especiales cuando se examinan miembros de fractura crítica donde se debe aumentar un poco el nivel de exploración).

Es importante anotar que, las investigaciones llevadas a cabo por Paul Holloway emplearon simulaciones con el software CIVA y algunas discontinuidades naturales. Los demás, a excepción de Looten quien uso reflectores artificiales, usaron discontinuidades naturales.

De todo esto es posible ver que no se hallaron investigaciones específicas con reflectores artificiales típicos de varios tamaños para validar la metodología AWS, ni que sucedía en la capacidad de detección y la evaluación de las discontinuidades cuando se realizaba cambios en el tamaño del cristal del transductor y en su frecuencia. Ninguno de los estudios indicó de forma clara si existía una relación entre el tamaño del reflector artificial y el tamaño de la amplitud del eco, que es el parámetro que fundamenta el método de examen de la AWS. Este es el vacío cognitivo que se buscó llenar con el presente trabajo.



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

##### 3.1.1 Experimentos con reflectores artificiales

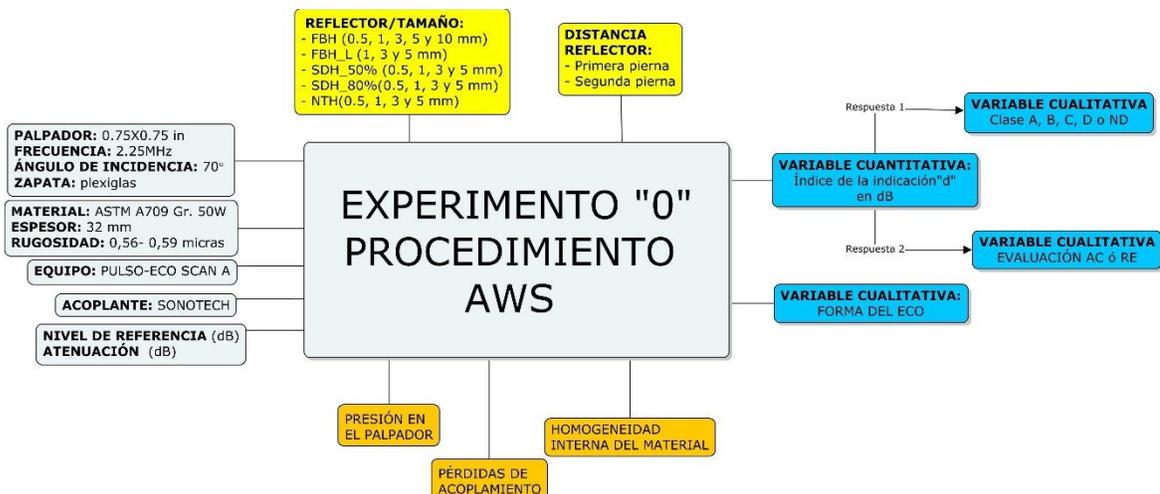
Se diseñaron y ejecutaron tres experimentos de capacidad de detección y evaluación de reflectores artificiales tal como se describe a continuación:

- Experimento “0” para establecer la capacidad de detección del procedimiento de UT del código AWS D1.5 y que corresponde al objetivo específico No. 1.
- Experimento “1” para evaluar el efecto del cambio en el tamaño del cristal y que corresponde al objetivo específico No. 2.
- Experimento “2” para evaluar el efecto del cambio en la frecuencia del transductor que corresponde al objetivo específico No.3.

###### 3.1.1.1 Experimento inicial (Objetivo 1)

En la **Figura 3-1** se presenta un esquema del diseño experimental para los ensayos realizados con el método prescriptivo del AWS D1.5, que muestra los parámetros fijos (derecha), las variables de entrada (tipo de reflector, tamaño del reflector y la distancia del sonido), las variables de respuesta (*índice de la indicación* y forma del eco) y las variables no controlables (abajo).

**Figura 3-1:** Experimento “0”, procedimiento AWS D1.5.



El experimento “0” (**Figura 3-1**) o de control permitió identificar los tipos y tamaños de reflectores detectables con el haz de ultrasonido obtenido bajo las condiciones del procedimiento de UT de la AWS. Para lo anterior se usaron cinco tipos de reflectores

artificiales (SDH\_50, SDH\_80, FBH, FBH\_L y NTH) con cuatro tamaños para los reflectores SDH y NTH, cinco tamaños para el reflector FBH cortos y tres tamaños para los FBH\_L (FBH largos) que se encuentran por encima y por debajo de la longitud de onda para una frecuencia de 2.25 MHz en acero (~1.4 mm). Los SDH\_50 se encuentran ubicados en la parte central de la placa y los SDH\_80 en el cuarto inferior, además los FBH ubican su superficie en la parte central de la placa. Los NTH se ubican en las superficies de las placas de acero.

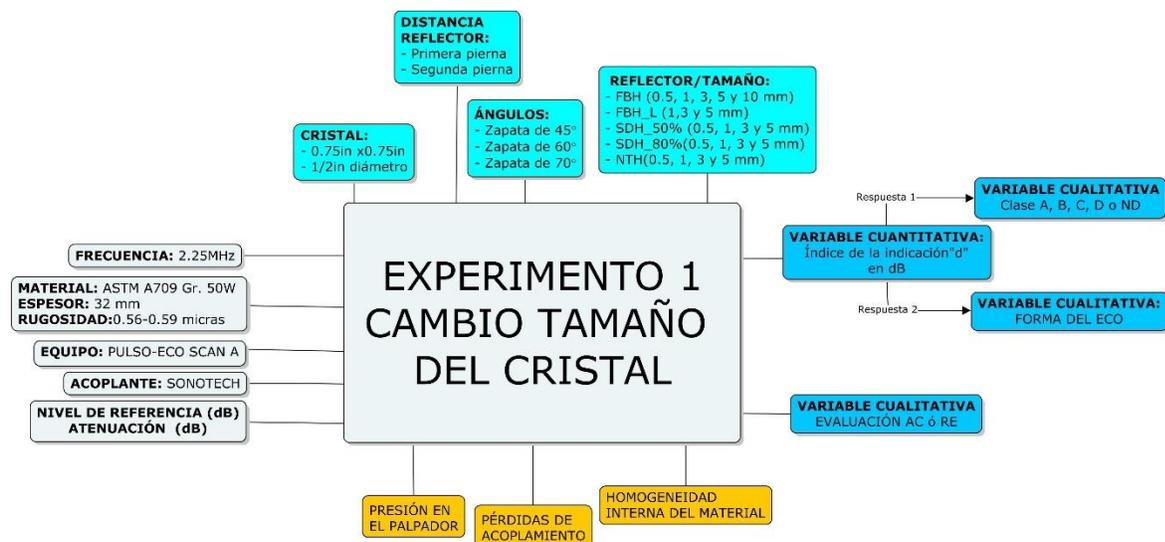
También se trató de establecer si existía una relación entre el índice de la indicación y el tamaño y tipo de reflector, y si se podía establecer alguna respuesta predecible.

### 3.1.1.2 Experimentos “uno” y “dos” (Objetivo 2 y Objetivo 3)

Los experimentos “1” y “2” corresponden a modificaciones de dos variables que inciden en la capacidad de detección del procedimiento: el tamaño y la frecuencia del cristal del palpador. Cuanto mayor es la frecuencia, mayor será la sensibilidad del haz ultrasónico, y se podrían detectar discontinuidades más pequeñas. Lo mismo sucede cuando se disminuye el tamaño del cristal del palpador, pues genera un haz que tiene una menor dispersión, que permitiría, en teoría, detectar discontinuidades más pequeñas a distancias mayores. Se usaron los mismos reflectores del experimento “0”, con excepción de los FBH\_L que solo se usaron con un ángulo de 70°.

En la **Figura 3-2** presenta un esquema del diseño experimental para los ensayos realizados cambiando la forma y diámetro del cristal ( $\phi 12.7$  mm) que muestra los parámetros fijos (derecha), las variables de entrada (dimensiones/forma del cristal, tipo de reflector, tamaño del reflector y ángulo de refracción), las variables de respuesta (índice de la indicación y forma del eco) y las variables no controlables (abajo).

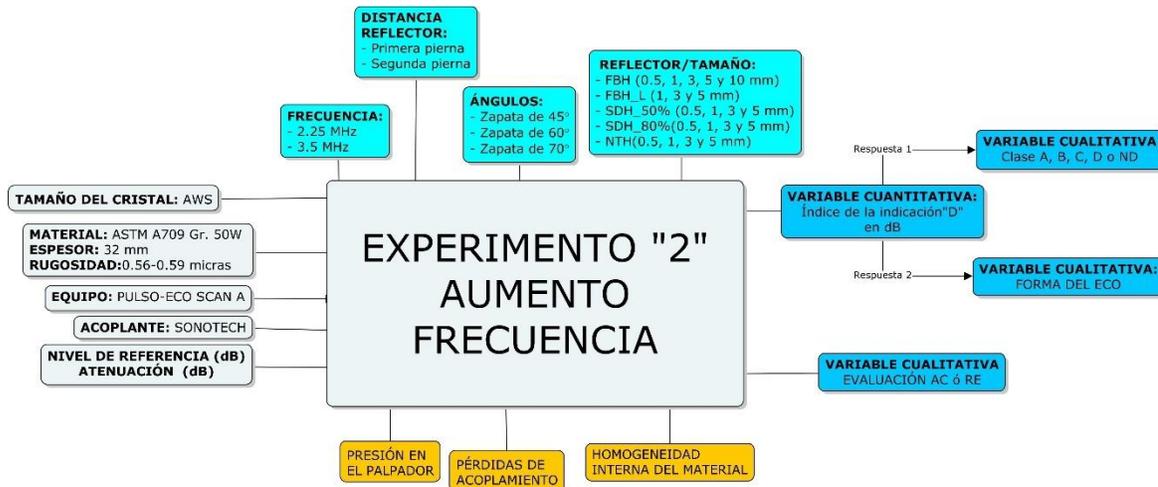
**Figura 3-2:** Experimento “1” donde se disminuye el tamaño del cristal.



La **Figura 3-3** presenta un esquema del diseño experimental para los ensayos realizados cambiando la frecuencia del palpador (3.5 MHz) que muestra los parámetros fijos

(derecha), las variables de entrada (frecuencia del cristal, tipo de reflector, tamaño del reflector y ángulo de refracción), las variables de respuesta (índice de la indicación y forma del eco) y las variables no controlables (abajo).

**Figura 3-3:** Experimento “2” donde se aumenta la frecuencia del palpador.



De cada experimento se realizaron ocho verificaciones (dos niveles de escaneo, dos distancias del sonido y dos repeticiones). Además, se definieron dos variables de respuesta: una cuantitativa (*índice de la indicación* en dB) y una cualitativa: forma del eco (imágenes). Además de establecer la capacidad de detección, se hizo lo siguiente:

- Establecer si había relación (lineal o proporcional) entre el índice de la indicación “d” y el tamaño y forma del reflector.
- Establecer si había una relación entre el índice de la indicación y el ángulo de incidencia, es decir si con cambios en el ángulo de incidencia se generaban cambios predecibles en el índice de la indicación.
- Evaluar la capacidad del procedimiento para evaluar las discontinuidades de forma coherente y precisa.

También se hicieron comparaciones entre los resultados de cada tipo de palpador y ángulo de incidencia para establecer, principalmente, si el índice de la indicación cambiaba o se aumentaba la detección con determinados tamaños.

### 3.1.1.3 Suposiciones experimentales

Para poder comparar los resultados obtenidos con los ángulos de incidencia de 60° y 45° con los obtenidos con el ángulo estándar de 70°, se empleó la siguiente suposición (T. J. Jessop, 1981):

- La diferencia entre un reflector obtenido con un ángulo de 70° y uno obtenido con un ángulo de 60° es de “+3dB”. Por lo tanto, al *índice de la indicación* obtenido con 60° se le suma 3dB para obtener un índice de la indicación corregido.

- La diferencia entre un reflector obtenido con un ángulo de 70° y uno obtenido con un ángulo de 45° es de “+5dB”. Por lo tanto al *índice de la indicación* obtenido con 45° se le suma 5dB para obtener un índice de la indicación corregido.

El uso de reflectores artificiales en este estudio, en lugar de discontinuidades naturales se basa en que con estos se pueden lograr respuestas más estables que permitan evaluar mejor que sucede cuando se hacen variaciones en condiciones del sistema ultrasónico.

### 3.1.2 Atenuación en el material

Por último, se llevó a cabo un pequeño estudio de forma de la atenuación del sonido con la distancia en un bloque de acero (con reflectores SDH ubicados a cierta distancia) del mismo material que los bloques de los experimentos 0, 1 y 2, con el fin de establecer que tan diferente era la atenuación para cada tipo de palpador y como influía esto en el valor del índice de la indicación. Para este estudio sólo se empleó el ángulo de incidencia de 45° que permitía el examen de la mayoría de los agujeros del bloque fabricado. En el numeral **4.5 ANÁLISIS DE ATENUACIÓN CON BLOQUE** se presentan las curvas obtenidas con este ensayo y se comparan con la curva lineal que adopta el enfoque del método AWS.

### 3.1.3 Experimento con discontinuidades reales

Se seleccionaron dos cupones soldados con discontinuidades naturales inducidas durante el soldeo, que se encuentran en el Laboratorio de Soldadura de la Universidad Nacional de Colombia, producto de una tesis de Ingeniería Mecánica de los años ochenta cuyos autores son los ingenieros José Alejandro Arango y Argemiro Rafael Arrieta (José A. Arango Ossa, 1988). A los cupones se les tomaron radiografías para identificar y estimar la posición aproximada de las discontinuidades que presentaban. En la **Tabla 3-1** se indican las características de los cupones que se emplearon en la última parte de la fase experimental.

**Tabla 3-1:** Cupones con discontinuidades naturales.

IDENTIFICACIÓN	IMAGEN RADIOGRÁFICA	ESPESOR
<p><b>PL5A (P3)</b></p> <p><b>Discontinuidades:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de penetración</li> <li>• Porosidad aislada</li> <li>• Falta de fusión</li> </ul>		9.5 mm

IDENTIFICACIÓN	IMAGEN RADIOGRÁFICA	ESPESOR
<p><b>PL5B (P10)</b></p> <p><b>Discontinuidades:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de penetración</li> </ul>		<p>13 mm</p>

El objetivo de emplear estos cupones fue establecer como cambia la respuesta de las discontinuidades detectadas cuando se varía el tamaño del cristal y la frecuencia del palpador. Para este caso se hizo algunos cambios en el ángulo de la incidencia, y se usaron dos de los tres palpadores: AWS y ROUND. Se hizo evaluaciones, en primera y segunda pierna y, en primera pierna sólo cuando el tamaño de la zapata lo permitía.

## 3.2 EQUIPOS Y ACCESORIOS UTILIZADOS

### 3.2.1 Equipo de ultrasonido

Se usó un equipo de ultrasonido USM Go, fabricado por General Electric modelo DMS/USMGo con número de serial USMGO11095139 propiedad de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín), cuyas características técnicas cumplen con las indicadas en la cláusula 6 del código AWS D1.5 Bridge Welding Code. Véase **Figura 3-4**.

**Figura 3-4:** Equipo de UT empleado para realizar los experimentos de la investigación.



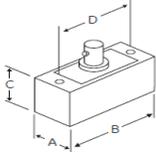
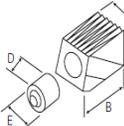
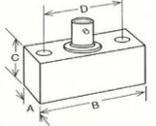
### 3.2.2 Palpadores ultrasónicos

Las características de los palpadores empleados en esta investigación se resumen en la **Tabla 3-2** y consisten básicamente de:

- Un palpador con un tamaño del cristal que cumple los requisitos de los códigos AWS D1.1/D1.5. Será identificado como “AWS\_2.25” o “AWS”.

- Un palpador de 3.5 MHz cuyo tamaño del cristal y zapatas se asemejan a las requeridas por los códigos AWS. Será identificado como “ASE\_3.5” o “ASE”.
- Un palpador miniatura con un cristal de  $\phi 1/2$  in de 2.25 MHz. Será identificado como “ROUND\_2.25” o “ROUND”.

**Tabla 3-2:** Palpadores usados en la fase experimental y sus características.

Palpador	Fabricante / serial No	Tipo de palpador	Geometría cristal / dimensiones	Esquema de los elementos	Datos técnicos	f (MHz)	$\lambda_{transv}$ (mm)
<b>GE AWS GAMMA 2.25MHz/0.75"x0.75" SQ</b>	GE / SGE0110	Angle Beam Transducers—Types SWS and AWS	Cuadrado A=21.6 mm B= 31.8 mm C= 19.1 mm D= 25.4 mm		Frecuencia central: 2.27MHz Echo pulse duration, -20dB: 1.38 $\mu$ s	2,25	1,4
<b>Transductor GE MSW-QC GAMMA 2.25/0.5</b>	GE/ SAB0133	Miniature Angle Beam Transducers—Type MSW-QC	Circular $\phi$ 12,7 mm		Frecuencia centra: 2.25MHz Echo pulse duration, -20dB: 1.42 $\mu$ s	2,25	1,4
<b>Transductor Technisonic General Purpose Series (GP) 0.75"x1.0"</b>	Technisonic	ABS- 030608-GP	Rectangular A=25.4 mm B= 39.62 mm C= 18.54 mm D= 33.27 mm		No se tienen	3,5	0,9

En el Anexo B se presenta los certificados de dos de los tres palpadores empleados en la investigación. La **Tabla 3-3** describe las zapatas utilizadas para generar los ángulos de incidencia de 45°, 60° y 70° con los tres palpadores empleados. A manera de ejemplo, la **Figura 3-5** muestra las fotografías del conjunto transductor AWS\_2.25/Zapatas usados en el experimento “0” y “1”.

**Tabla 3-3:** Zapatas (45°, 60° y 70°) para los tres tipos de palpadores empleados.

Palpador	Tipo de zapata	Ángulo real	Características verificadas
<b>AWS_2.25MHz</b>	W-104 45°	45°	Distancia salida (leading edge): 16 mm
	W-105 60°	61°	Distancia salida (leading edge): 17 – 20 mm
	W-106 70°	71°	Distancia salida (leading edge): 20 mm
<b>ROUND_2.25MHz</b>	W-201 45°	45°	Distancia salida (leading edge): 13 mm
	W-202 60°	62°	Distancia salida (leading edge): 17-19 mm
	W-203 70°	70°	Distancia salida (leading edge): 19-22 mm
<b>ASE_3.5MHz</b>	WSR-0608-45	45°	Distancia salida (leading edge): 16 mm
	WSR-0608-60	61°	Distancia salida (leading edge): 19 mm
	WSR-0608-70	70°-71°	Distancia salida (leading edge): 24 -25 mm

**Figura 3-5:** Palpadores AWS (70°, 60° y 45°), verificación del ángulo de incidencia.



### 3.2.3 Bloques empleados en la fase experimental

#### 3.2.3.1 Bloques estándar de la AWS

Se emplearon los bloques estándar requeridos por el procedimiento de la AWS, los cuales se resumen en la **Tabla 3-4**.

**Tabla 3-4.** Bloques empleados para la calibración del sistema ultrasónico.

BLOQUE	MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
<b>IIW Tipo 2</b>	Acero al carbono	Dimensiones en pulgadas
<b>Distancia y amplitud (TYPE DS)</b>	Acero al carbono	Dimensiones en pulgadas
<b>Bloque de resolución (TYPE RC)</b>	Acero al carbono	Dimensiones en pulgadas

En la **Tabla 3-5** se muestra la verificación del nivel cero de referencia (nivel b) de un palpador AWS de 45° con el bloque IIW Tipo 2.

**Tabla 3-5:** Verificación del nivel cero de referencia para un ángulo de 45° (AWS).



#### 3.2.3.2 Bloques con reflectores artificiales

Se diseñaron y fabricaron cinco bloques de acero ASTM A709 50W de 32 mm de espesor (espesor final 30.5 mm), un material empleado tradicionalmente en la fabricación de puentes. La rugosidad Ra de los bloques quedó entre 0.538 y 0.7242  $\mu\text{m}$  (ISO 16610-21),

lo cual, de acuerdo con (Tennakoon T. , 2010), *está en un valor que tiene un efecto poco relevante en la amplitud de la señal ultrasónica.*

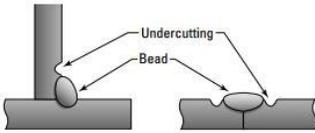
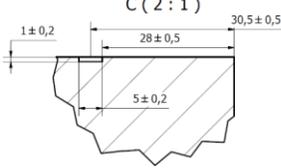
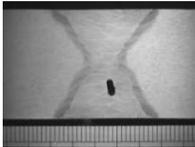
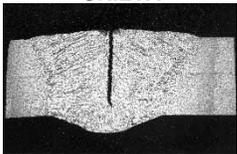
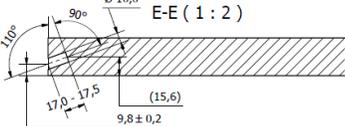
En la **Tabla 3-6** se resumen las características de los bloques construidos para esta investigación y en el Anexo C se presentan sus planos. Los bloques tienen conjuntos de reflectores artificiales tipo FBH, NTH y SDH, de diferentes dimensiones por encima y por debajo de la longitud de onda (1.4 mm) asociada a la frecuencia de 2.25Mz.

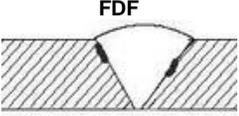
**Tabla 3-6:** Características de los bloques con reflectores artificiales.

#	BLOQUE	TIPO ENTALLA	TIPO DE FABRICACIÓN	CARACTERÍSTICAS	PESO
1	Bloque FBH 20°	FBH	Electroerosión Taladrado	De 290x250 mm con cinco agujeros de $\phi$ 0.5, 1, 3, 5 y 10 mm de 17.5 mm de profundo orientado a 20°.	19,3 kg
2	Bloque notches 3-5-1-0.5 mm	NTH	Taladrado	De 290x250 mm con entallas de 0.5, 1, 3 y 5 mm de profundo y de 5 mm de ancho.	19,3 kg
3	Bloque SDH 1-0.5 mm	SDH	Electroerosión Taladrado	De 290x250 mm con agujeros laterales de $\phi$ 0.5 y 1 mm y 40 mm de profundidad a 50% y 80% del espesor.	19,3 kg
4	Bloque SDH 5 mm -3 mm	SDH	Taladrado	De 290x250 mm con agujeros laterales de $\phi$ 3 mm y 5 mm y 40 mm de profundidad a 50% y 80% del espesor.	19,3 kg
5	Bloque FBH 20° largos	FBH	Electroerosión Taladrado	De 270x160 mm con tres agujeros de $\phi$ 1, 3 y 5 mm, 20 mm de largo y 16,5 mm de profundo (orientado a 20°).	10,85 kg

La idea de los reflectores seleccionados (muy comunes en la calibración), es la de imitar la geometría de los tipos de discontinuidades que se esquematizan en la **Tabla 3-7**.

**Tabla 3-7.** Relación de reflectores artificiales con discontinuidades en soldadura.

DISCONTINUIDADES	TIPO	RESPUESTA	REFLECTOR ARTIFICIAL
<p><b>SOCAVADOS</b></p> 	GEOMÉTRICA	Reflexión + difracción	<p>NTH</p> 
<p><b>POROSIDAD /INCLUSIONES DE ESCORIA</b></p> 	VOLUMÉTRICA	Reflexión	<p>SDH</p> 
<p><b>GRIETA</b></p> 	PLANAR	Reflexión	<p>FBH</p> 

DISCONTINUIDADES	TIPO	RESPUESTA	REFLECTOR ARTIFICIAL
	PLANAR		

### 3.2.3.3 Bloque para la atenuación del sonido

Además de los cinco bloques que se describieron en la **Tabla 3-6**, se diseñó y fabricó otro bloque de acero ASTM A709 Grado 50W para establecer la atenuación real del sonido en función de su distancia de recorrido en el acero, usando reflectores SDH de  $\phi 1.5$  mm ubicados a diferentes distancias y profundidades (el plano de su fabricación se muestra en el Anexo C). Este sólo se empleó para establecer la atenuación de los tres transductores considerando sólo el ángulo de incidencia de  $45^\circ$ .

### 3.2.4 Análisis de los datos

Los datos fueron procesados principalmente con Microsoft Excel, cuando se hicieron comparaciones individuales de máximo dos variables por Experimento. Los análisis macro de los datos, que implica hacer comparaciones de los tres palpadores, ángulos de incidencia y tipos de reflectores (y tamaño) fueron llevados a cabo con Python 3.9 y con las librerías Seaborn y Matplotlib.

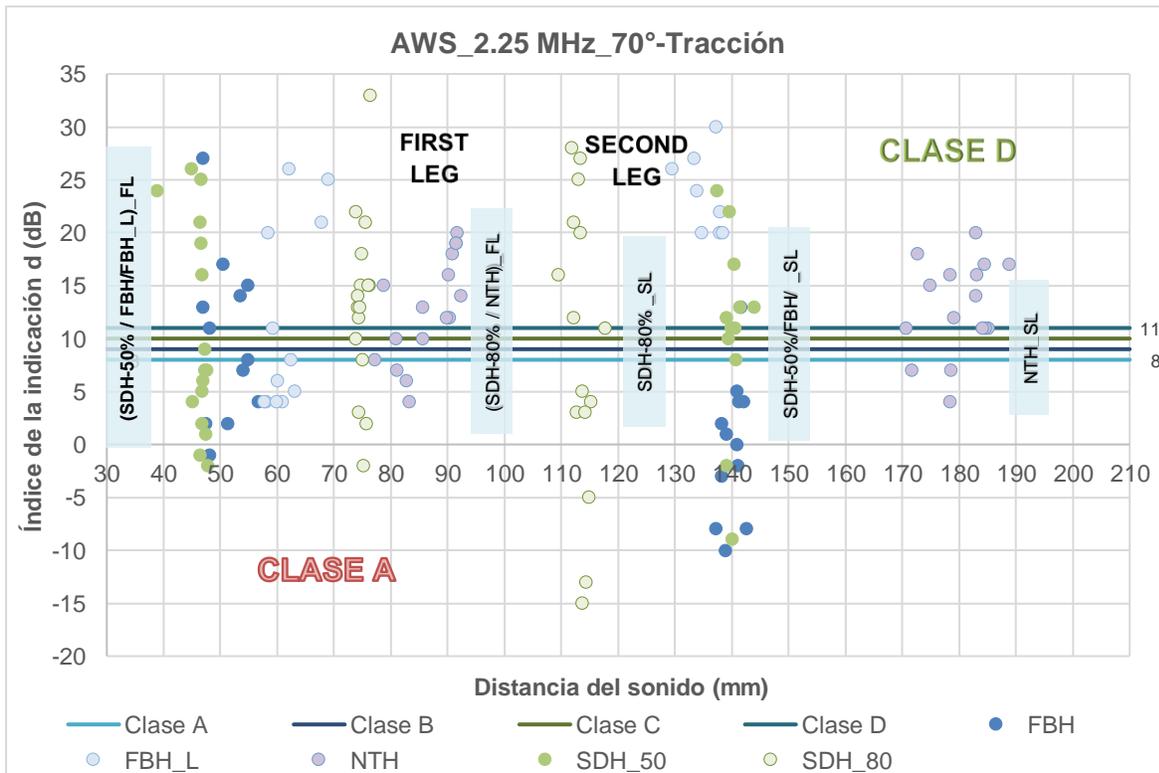
## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 EXPERIMENTO 0: PALPADOR DE 2.25MHz E INCIDENCIA DE 70°

#### 4.1.1 Capacidad de detección de reflectores artificiales

La **Figura 4-1** muestra el *Índice de la indicación* “d” obtenido para los reflectores artificiales detectados con el palpador de 2.25 MHz/70° o palpador estándar (procedimiento prescriptivo AWS) vs. la distancia del sonido, así como los niveles de severidad de discontinuidades para esfuerzos de tracción establecidos como criterios en la tabla 6.3 del código AWS D1.5 (8, 9, 10 y 11 dB). No se grafican los reflectores no detectados.

**Figura 4-1:** Índices “d” de los reflectores vs. distancia del sonido del experimento “0”.



**Notas:**

**(SDH-50% / FBH/FBH\_L)\_FL:** reflectores SDH-50%, FBH pequeños y FBH largos examinados en primera pierna.

**(SDH-80% / NTH)\_FL:** reflectores SDH-80% y NTH examinados en primera pierna.

**SDH-80%\_SL:** reflectores SDH-80% examinados en segunda pierna.

**(SDH-50%/FBH/FBH\_L)\_SL:** reflectores SDH-50% y FBH, examinados en segunda pierna

**NTH\_SL:** reflectores NTH examinados en segunda pierna.

Para espesores entre 20 y 38 mm, una discontinuidad se clasifica como clase “D” cuando el valor de  $d \geq 11$  dB (12, 13, etc.) y como clase “A” cuando es  $\leq 8$  dB (considerando valores

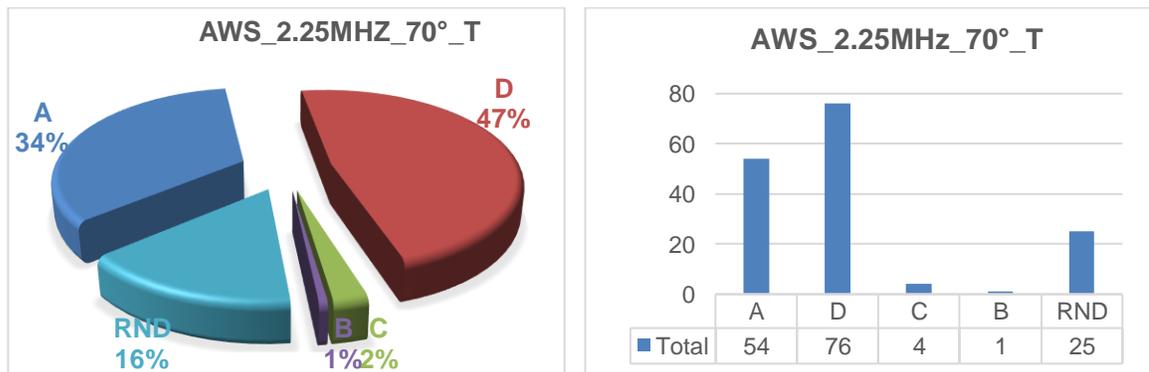
negativos). Si el valor de  $d$  es 9 dB, la discontinuidad se clasifica como “B”, y si es 10 dB se clasifica como “C”. Las clases B y C resultan más difíciles de obtener desde el punto de vista estadístico, pues corresponden a un valor específico (9 y 10 dB) en un intervalo que, para este estudio, varió aproximadamente entre -20dB y +35 dB.

Puede notarse en la **Figura 4-1** que la gran mayoría de reflectores artificiales detectados (SDH, FBH y NTH) se clasificaron como A (discontinuidades grandes) y D (discontinuidades menores), y muy pocos reflectores se clasificaron como B (discontinuidades medias) y C (discontinuidades pequeñas). Además, de la **Figura 4-1** es posible ver que no existe una relación lineal entre el índice de la indicación y la distancia del sonido (en mm), es decir que pese a que existe un requisito de examinar en primera pierna en la metodología AWS, este podría no ser necesario pues no se observa una relación entre dichas variables.

Si los datos obtenidos en esta investigación se quisieran evaluar, considerando los criterios de aceptación y rechazo para soldaduras sometidas a esfuerzos de compresión, las cuatro líneas horizontales del gráfico de la **Figura 4-1** se tendrían que desplazar 6 dB hacia abajo, aumentando el número de reflectores que se clasifican como “D” y disminuyendo los que se clasifican como “A”. En este trabajo se seguirán analizando los resultados con base en los criterios de aceptación para soldaduras sometidas a esfuerzos de tracción (Tabla 6.3 del código AWS D1.5:2010).

En la **Figura 4-2** se presenta la proporción de datos que se clasificaron como “A”, “B”, “C” y “D” (reflectores detectados a los que se le asigna una severidad según el procedimiento AWS), además de los reflectores no detectados (RND). Cabe recordar que en el experimento “0” se realizaron 160 ensayos (con dos réplicas), de cinco tipos de reflectores (NTH, FBH, FBH\_L, SDH\_50% y SDH\_80%) y cinco tamaños para reflectores FBH, cuatro tamaños para reflectores NTH, SDH\_50 y SDH\_80% y tres tamaños para reflectores FBH\_L.

**Figura 4-2:** Distribución de los datos en detectados (A, B, C o D) y RND.



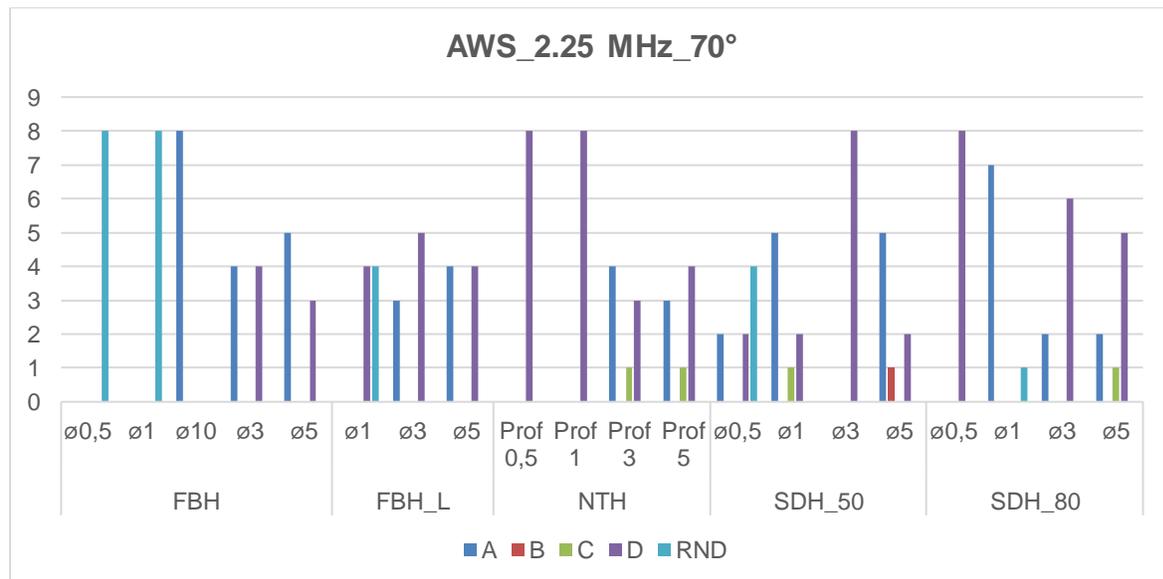
Como se indicó anteriormente, las clases “D” (47%) y “A” (34%) son las más recurrentes alcanzando el 81% del total de datos. Las clases B y C fueron solo el 3% de los datos. Respecto a la no detección, está fue del 16%, que corresponde a 25 datos de los 160

obtenidos. De lo anterior, es posible afirmar que con el procedimiento de UT de la AWS se obtuvo una capacidad de detección del orden del 84% que se considera aceptable.

La **Figura 4-3** muestra el número de detecciones vs. el tipo y tamaño del reflector, discriminando entre los detectados (RD) y clasificados como "A", "B", "C" o "D" y RND. Puede notarse que los reflectores FBH de  $\phi 1$  mm y  $\phi 0.5$  mm, no fueron detectados en los 8 ensayos realizados para cada tamaño (dos niveles de exploración, 1ª y 2ª pierna y dos repeticiones), lo cual se puede ver también en la **Tabla 4-1**. También es posible ver que para los reflectores SDH no siempre se obtuvo una respuesta estable en el tiempo, es decir que en una exploración el reflector se clasificó como D y en otro momento como A, B o C. Algo similar sucede con los reflectores FBH, aunque en este caso la respuesta se restringe a "A", "C" o "D".

Todos los reflectores NTH se detectaron en los 32 ensayos, y se obtuvieron respuestas relativamente estables (Clase D), con algunas variaciones.

**Figura 4-3:** Clasificación de reflectores detectados y no detectados.



**Tabla 4-1:** Reflectores ND en el Experimento "0".

CANT.	REFLECTOR	TAMAÑO	OBSERVACIONES
8	FBH	0.5 mm	No detectado 100%
8	FBH	1 mm	No detectado 100%
4	FBH_L	1 mm	No detectado el 50%
4	SDH_50%	0.5 mm	No detectado el 50%
1	SDH_80%	1 mm	No detectado el 12,5%

De lo anterior se puede concluir que: los reflectores NTH pueden detectarse en profundidades de hasta 0.5 mm, por lo que el procedimiento AWS tienen una alta capacidad de detección para este tipo de reflectores. Lo mismo sucede con los reflectores

SDH de  $\phi 0.5\text{mm}$  (ubicado en el 80% del espesor) y de  $\phi 1\text{mm}$ ,  $\phi 3\text{mm}$  y  $\phi 5\text{mm}$  (ubicados en el 50% y el 80% del espesor), los cuales fueron detectados recurrentemente. Sólo el reflector SDH\_50 de  $\phi 0.5\text{ mm}$  muestra una tendencia a la no detección.

Los reflectores FBH con  $\phi \leq 1\text{mm}$  no fue posible detectarlos y los FBH\_L de  $\phi 1\text{ mm}$  tuvieron una alta tendencia a no ser detectados.

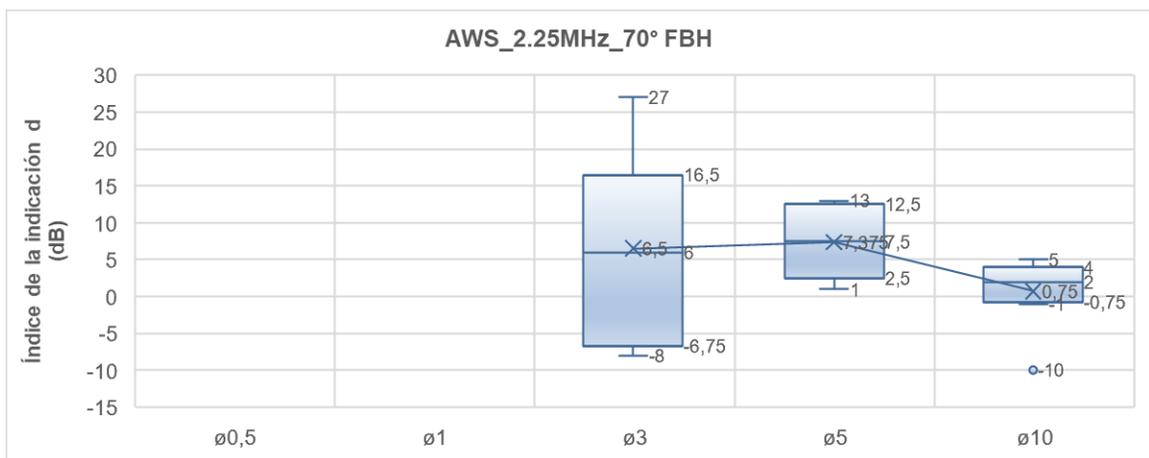
### 4.1.2 Capacidad de evaluación de las discontinuidades

Antes de proceder con los resultados, resulta importar definir que es la “*capacidad de evaluación*”, para lo cual en esta investigación se adopta la siguiente definición: *La capacidad que tiene el procedimiento de examen con UT para que la indicación proveniente de una discontinuidad o reflector artificial particular, se evalúe consistentemente con una determinada clase de severidad.* Esto implicaría que una misma discontinuidad/reflector debería dar casi el mismo valor de “d” bajo diferentes exploraciones, manteniendo los parámetros básicos de ángulo de incidencia y tipo de palpador empleado.

#### 4.1.2.1 Dispersión y variabilidad de los datos

En la **Figura 4-4**, **Figura 4-5**, **Figura 4-6** y **Figura 4-7** se muestra el promedio y la dispersión de los datos de “d” obtenidos con el palpador estándar, frente a los cambios en el tamaño del reflector, para los tres tipos de reflectores considerados en la investigación. En cada tamaño se presentan los resultados de las ocho observaciones (dos niveles de exploración, 1ª y 2ª pierna y dos repeticiones). En la **Tabla 4-2** se presenta el promedio y la desviación estándar para de *d* para los reflectores FBH examinados con el palpador estándar.

**Figura 4-4:** Variabilidad del índice de la indicación vs. Tamaño del reflector FBH.

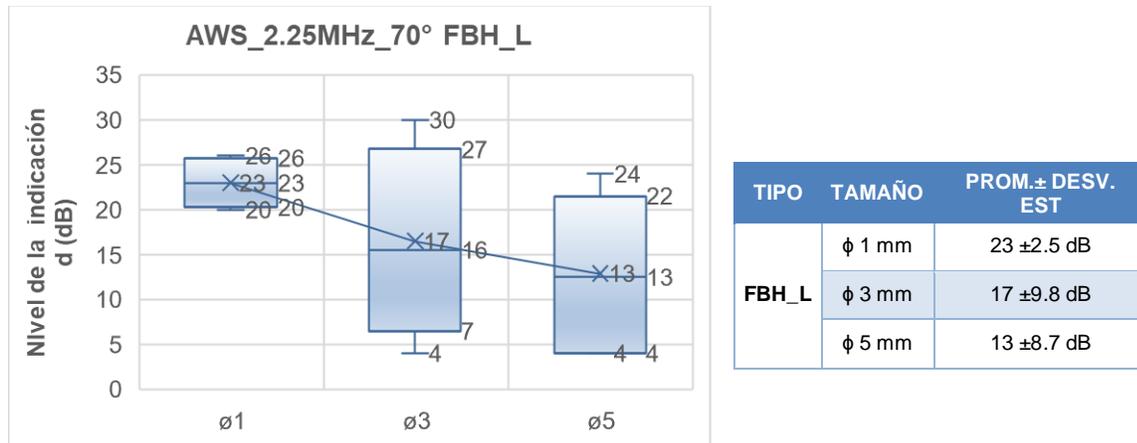


**Tabla 4-2:** Promedio y desviación estándar del índice de la indicación de reflectores FBH.

TIPO	TAMAÑO	PROM.± DESV. ESTÁNDAR
FBH	φ 3 mm	6.5 ± 12.5 dB
	φ 5 mm	7.4 ± 4.5 dB
	φ 10 mm	0.75 ± 4.5 dB

La **Figura 4-4** y la **Tabla 4-2** muestran que los valores promedio en el *índice de la indicación* obtenidos para reflectores FBH de φ3 mm y φ5 mm son muy parecidos (entre 6.5 y 7.4 dB), y que se reduce a 0.75 dB para el tamaño de φ10 mm. Este descenso en “d” resultaría lógico por el aumento del área del reflector artificial. Además, la mayor dispersión (desviación estándar) de los datos se observó para el reflector detectado más pequeño (φ3 mm) y fue de ±12.5 dB.

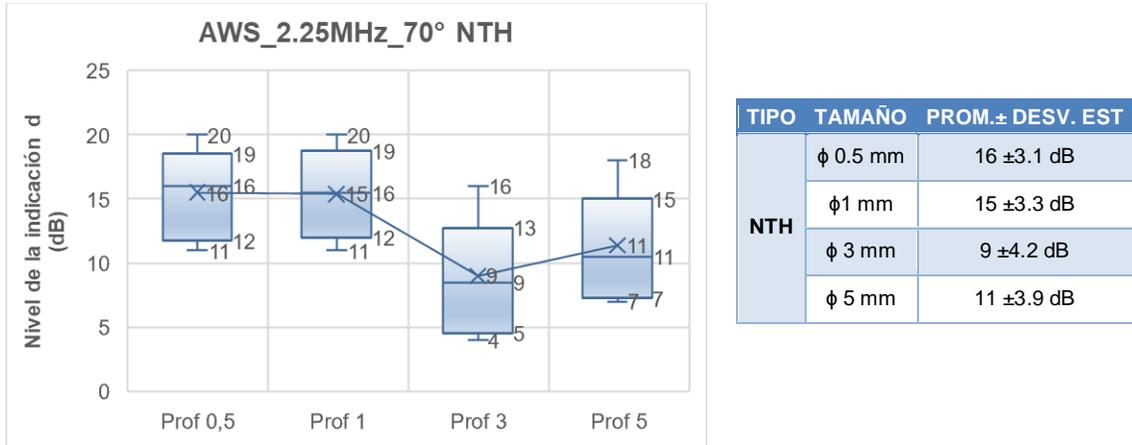
La **Figura 4-5** muestra la variabilidad de “d” para reflectores FBH\_L y, en este caso, se ve una clara tendencia a que disminuya el *índice de la indicación* con el tamaño de la discontinuidad. También se observó una alta dispersión, aunque esta vez en los tamaños de reflectores más grandes, así: φ3 mm con 17 ±9.8 dB y φ5 mm con 13 ±8.7 dB. Tomando en consideración de que los límites establecidos por el AWS, para clasificar la severidad de las indicaciones tiene un ancho total de 3 dB (entre 8 y 11 dB, como se mostró en la **Figura 4-1**), es posible indicar que las dispersiones encontradas son muy grandes en comparación con estos límites.

**Figura 4-5:** Variabilidad del índice de la indicación vs. Tamaño del reflector FBH\_L.

La **Figura 4-6** muestra la variabilidad de “d” para reflectores NTH y una tabla con los valores promedio y las desviaciones estándar. Puede notarse que los promedios de “d” son muy similares para profundidades de 0.5 mm (16 dB) y 1 mm (15 dB), y luego hay una reducción en “d” (lo cual es un indicativo de que se pasa a defectos más grandes) para profundidades mayores. La dispersión de los datos se mantiene más o menos constante (±3-4 dB) y sigue siendo excesiva si se toma en cuenta que hay criterios de aceptación para las clases B y C que están separados por solo 1 dB. Como consecuencia, un mismo tipo y tamaño de reflector puede llegar a clasificarse como A, B, C o D con diferentes

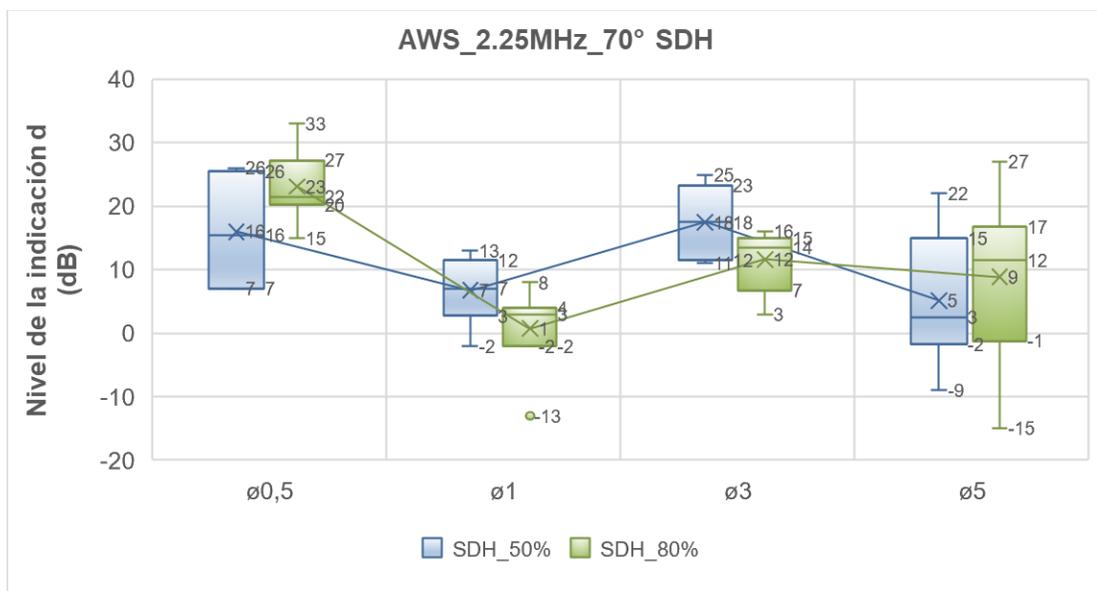
exploraciones, lo cual es un indicio de que el método de UT de la AWS es deficiente en su capacidad de evaluación de las discontinuidades.

**Figura 4-6:** Variabilidad del índice de la indicación vs. Tamaño del reflector NTH.



La **Figura 4-7** muestran la variabilidad de “d” para reflectores SDH y la **Tabla 4-3** incluye los valores promedios y las desviaciones estándar de los resultados. En la **Figura 4-7** se nota una leve tendencia a que el promedio de “d” se reduzca con el incremento en el tamaño del reflector entre los tamaños de φ0.5 mm y φ1 mm y entre φ3 mm y φ5 mm. Puede verse también, intervalos muy amplios de los valores de “d” que van desde unos 10dB hasta unos 42 dB, lo cual denota una alta variabilidad o dispersión y por tanto una imprecisión para asociar un determinado nivel de indicación al reflector.

**Figura 4-7:** Variabilidad del índice de la indicación vs tamaño del reflector SDH.



**Tabla 4-3:** promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores SDH.

TIPO DE REFLECTOR	TAMAÑO	PROM± DESV. EST
SDH_50%	φ 0.5 mm	16 ±9 dB
	φ 1 mm	7±5 dB
	φ 3 mm	18±5 dB
	φ 5 mm	5±10 dB
SDH_80%	φ 0.5 mm	23±5 dB
	φ 1 mm	1±6 dB
	φ 3 mm	12±5 dB
	φ 5 mm	9±12

En la mayoría de los gráficos no se observó una tendencia marcada en el cambio del valor de “d” cuando se aumenta o se disminuye el tamaño del reflector, exceptuando el caso de los reflectores FBH. Para el caso de los reflectores SDH y NTH se observa que, aunque dos tamaños consecutivos crecientes muestran una disminución en el valor promedio de d, cuando se compara con el tercer tamaño esta tendencia desaparece.

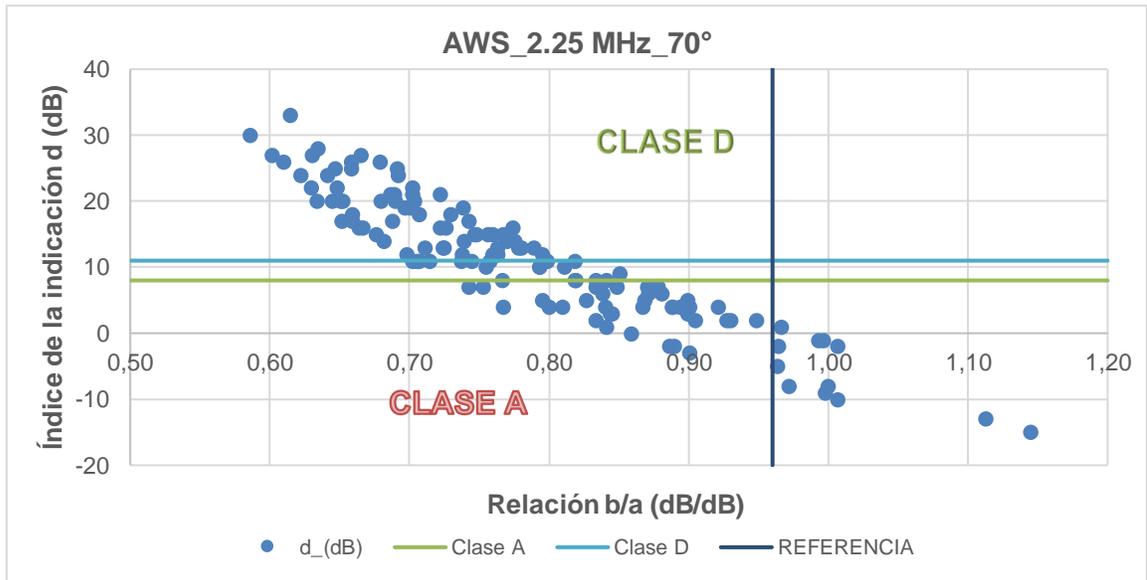
#### 4.1.2.2 Nivel de referencia/ Nivel de la indicación (b/a)

Considerando que “b” es el nivel de referencia y que “a” es el *nivel de la indicación* antes de la corrección (**Ecuación 16**), se supone que la relación b/a sería un indicativo de la proporción de la respuesta acústica del agujero SDH de φ1.5 mm y 25 mm de largo en comparación con la respuesta obtenida del reflector artificial examinado (que simula la discontinuidad natural). Lo anterior fue representado en la **Figura 4-8** mediante la relación b/a (adimensional) vs. el *índice de la indicación* d.

Para el análisis de b/a se considera lo siguiente: cuando  $b/a < 0.96$  se supone que la respuesta acústica del reflector examinado es menor que la del reflector de referencia, y cuando  $b/a \geq 0.96$ , se supone que la respuesta del reflector examinado es mayor que la del reflector de referencia. Además, se presume que una respuesta acústica más grande correspondería a un reflector artificial “acústicamente más grande” (área mayor) que el reflector de referencia y que una respuesta acústica más pequeña correspondería a un reflector “acústicamente más pequeño” que el SDH de referencia.

A partir de la **Figura 4-8**, (en la que se pusieron las clases AWS y la línea vertical de  $b/a=0.96$ ), es posible afirmar que la mayoría de los reflectores examinados tuvieron una respuesta acústicamente menor la del reflector de referencia, y muy pocos tuvieron una respuesta acústica mayor. En la **Tabla 4-4** se muestran cuáles fueron los reflectores con relaciones  $b/a \geq 0.96$ , que corresponde a un total de 12 datos.

**Figura 4-8:** Relación b/a versus el índice de la indicación d.



**Tabla 4-4:** Reflectores con relaciones b/a cercanas a 1.

REFLECTOR	INTENTO	TAMAÑO	PIERNA	b/a	a_(dB)	d_(dB)
SDH_80	T1	φ1 mm	FL	0,96	61,3	-2
	T2		SL	1,11	53,1	-13
	T2	φ5 mm	SL	0,96	60,5	-5
	T1			1,15	50,9	-15
SDH_50	T1	φ1 mm	FL	1,01	58,7	-2
	T2		FL	0,97	60,3	1
	T1	φ5 mm	SL	1,00	58,4	-9
	T2		FL	0,99	58,7	-1
FBH	T2	φ3 mm	SL	0,97	57,7	-8
	T1			1,00	56,1	-8
	T1	φ10 mm	FL	1,00	56,3	-1
	T2		SL	1,01	55,7	-10

De la **Tabla 4-4** se puede ver que algunos reflectores SDH\_50 y SDH\_80 de φ1 mm y φ5 mm generaron respuestas acústicamente mayores que el SDH de referencia de φ 1.5 mm, lo cual no es coherente para el reflector de ø1mm que tiene un tamaño menor que el de referencia. Esta tendencia estuvo entre el 25 y el 37.5% de los datos. En cuanto a los reflectores FBH, el 25% de las observaciones de los tamaños de ø10 mm y ø3 mm generaron respuestas mayores a las del nivel de referencia.

A partir de los anterior, es posible indicar que no se puede establecer una relación entre el *índice de la indicación* y el tamaño del reflector con el procedimiento prescriptivo de la AWS, pues la amplitud del eco no parece depender del tamaño de los reflectores. Por lo tanto, se puede decir que la capacidad de evaluación de reflectores artificiales del método de la AWS es prácticamente nula, y esto podría ser muy similar en el caso de discontinuidades naturales.

## 4.2 EXPERIMENTO 1: DISMINUCIÓN DEL TAMAÑO DEL CRISTAL

### 4.2.1 Capacidad de detección de reflectores artificiales

La **Figura 4-9**, la **Figura 4-10** y la **Figura 4-11** presentan los valores de “d” obtenidos con palpadores de  $\phi 12.7$  mm y ángulos de 70, 60 y 45°, respectivamente, versus la distancia del sonido para los reflectores FBH, FBH\_L (sólo para ángulo de 70°), NTH, SDH\_50 y SDH\_80. Las líneas horizontales representan los niveles de severidad (8, 9, 10 y 11 dB) de discontinuidades para esfuerzos de tracción de la tabla 6.3 del código AWS D1.5 para los dos tipos de palpadores (AWS y ROUND) empleados en el Experimento 1 y los tres ángulos de incidencia (70°, 60° y 45°). Además, la línea vertical azul clara de los gráficos representa la división entre los datos obtenidos en primera pierna (izquierda) y en segunda pierna (derecha).

Es de anotar que, para los datos obtenidos con los ángulos de 45° y 60° se realizó una corrección en el *índice de la indicación* de +3 dB (60°) y +5 dB (45°), de acuerdo con lo mencionado en el numeral 3.1.1.3. Esta corrección se hizo para estimar mejor la tendencia a una clase de severidad determinada, a pesar del cambio en el ángulo de examen; considerando que el procedimiento de UT de la AWS no tiene alternativas de clasificación cuando se hace un examen con ángulos de 45° y 60° para espesores de hasta 38 mm.

Como un análisis general de los gráficos, es posible indicar que, al igual que los resultados obtenidos con el experimento 0, la gran mayoría de reflectores artificiales detectados corresponden a las clases A y D, en comparación con aquellos clasificados como B y C. Es decir se mantiene la tendencia a que el solo existan dos niveles de severidad típicos (donde se concentran los datos), mostrando casi inútiles la clase B y C y por tanto la aproximación para estimar la longitud de “6dB Drop”.

La **Figura 4-9** muestra que, con ciertos reflectores, como son los NTH (examinados en segunda pierna) existe una tendencia a que los índices de la indicación obtenidos con un palpador sean más grandes (menos severos) que los obtenidos con el otro palpador. El palpador AWS, en este caso tiende a generar respuestas que se inclinan por una severidad mayor. Algo similar sucede con los reflectores SDH\_80.

Por otro lado, se observa que no existe una diferencia notable en el índice la indicación obtenido en primera pierna y en segunda pierna. La mayoría de los datos presentan respuestas con una alta dispersión en rangos similares, sin importar el tipo de reflector.

Figura 4-9: Índices “d” vs. distancia del sonido en palpador ROUND 70°.

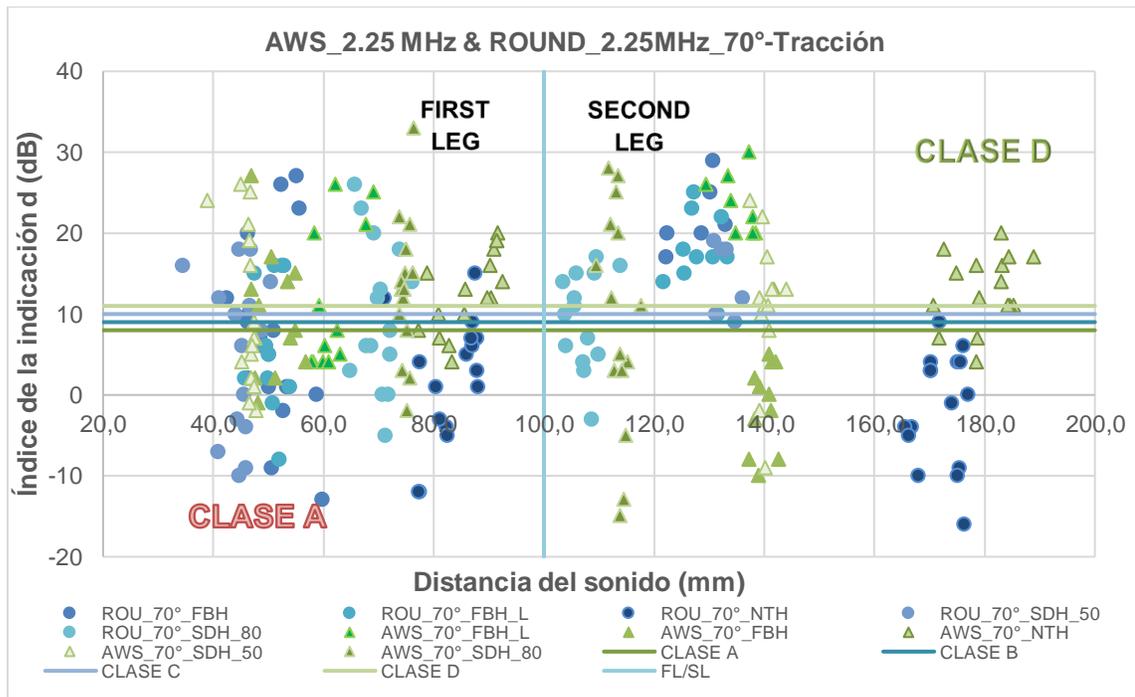
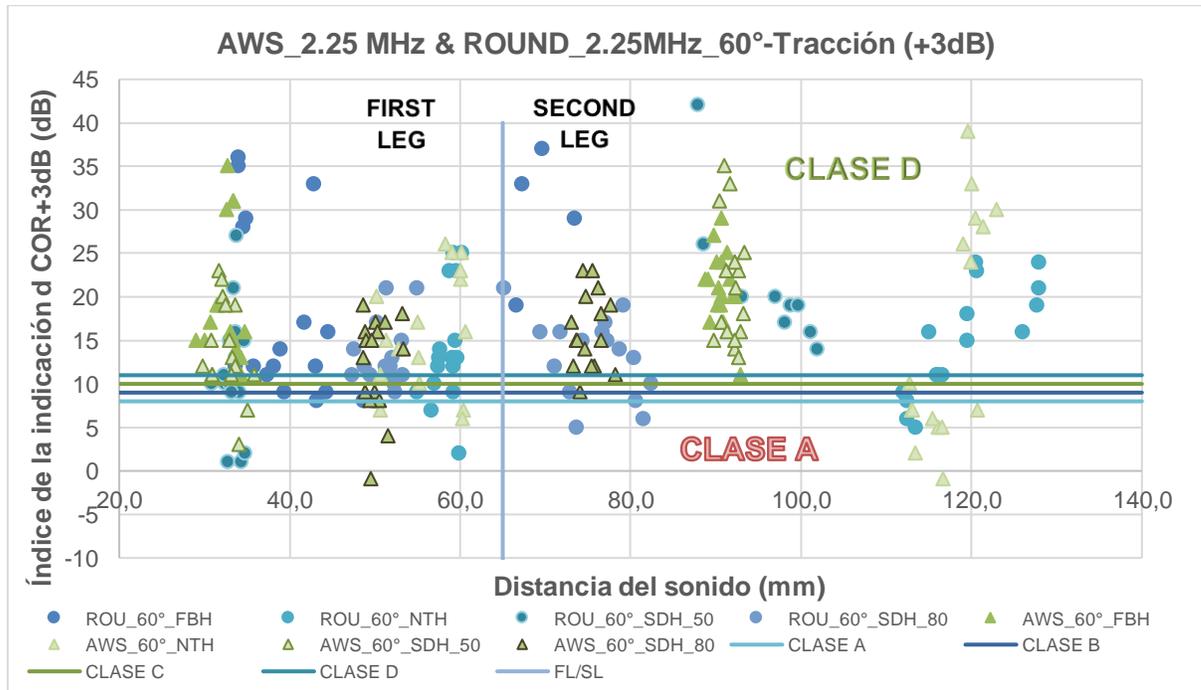


Figura 4-10: Índices “d” (corregido +3dB) vs. distancia del sonido (ROUND\_60°).

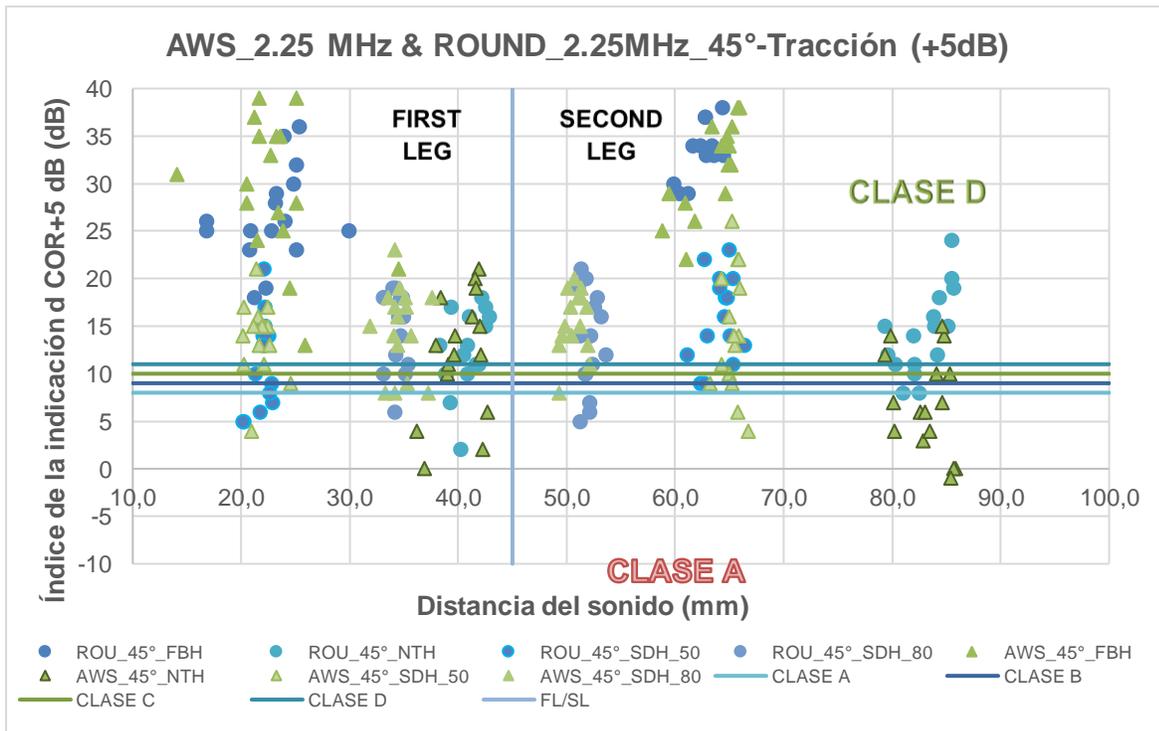


La Figura 4-10 para un ángulo de incidencia de 60°, muestra que existe una mayor proporción de reflectores clasificados como “D” que como “A”, esto se debe, en parte, a la

corrección que se hizo en los datos para adaptar los criterios de severidad de código AWS, exclusivos para un ángulo de 70°. En esta figura se observa que los valores de  $d$  obtenidos con uno u otro palpador, para un determinado reflector, es en términos generales, similar y con una alta dispersión.

La **Figura 4-11** para un ángulo de incidencia de 45° muestra, al igual que con el gráfico de la **Figura 4-10** que existe una mayor proporción de reflectores clasificados como “D” que como “A”, debido en parte a la corrección de los datos para adaptar los criterios aplicables a 70° a este ángulo de incidencia. Muy pocos reflectores caen en el estrecho intervalo establecido por el código AWS para las clases B y C. Por otro lado, el intervalo en el que el valor de “d” se encuentra para un tipo determinado de reflector, considerando las ocho mediciones realizadas (dos niveles de exploración, 1ª y 2ª pierna y dos repeticiones), fue similar con ambos tipos de palpadores. Acá tampoco se observó diferencia en los datos obtenidos en primera pierna y en segunda pierna.

**Figura 4-11:** Índices “d” (corregido +5dB) vs. distancia del sonido (ROUND\_45°).



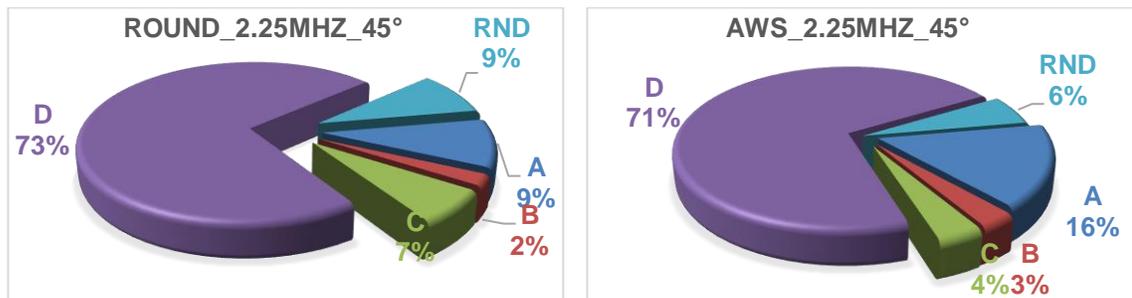
La **Figura 4-12**, la **Figura 4-13** y la **Figura 4-14** presentan la proporción de datos obtenidos con los palpadores ROUND y AWS que se clasificaron como “A”, “B”, “C” y “D”, además de los reflectores no detectados (RND).

Cabe recordar que en el experimento “1” se realizaron 864 mediciones (de las cuales 160 corresponde a las mediciones del Experimento 0), con dos réplicas, de cinco de reflectores (NTH, FBH, SDH\_50% y SDH\_80% para todos los ángulos y FBH\_L solo para 70°) y cinco tamaños para reflectores FBH, tres para FBH\_L y cuatro tamaños para reflectores NTH, SDH\_50 y SDH\_80%, tal como se muestra en la **Figura 3-2**.

La **Figura 4-12** muestra que la capacidad de detección de reflectores con un ángulo de incidencia de 45° fue similar con ambos tipos de transductores, siendo ligeramente mejor en el caso del palpador AWS/45°: 91% para el ROUND y 94% para el AWS. La capacidad para detectar los reflectores como B, C y D también fue similar con ambos palpadores, aunque hay diferencias leves en las proporciones que no superan el 4%.

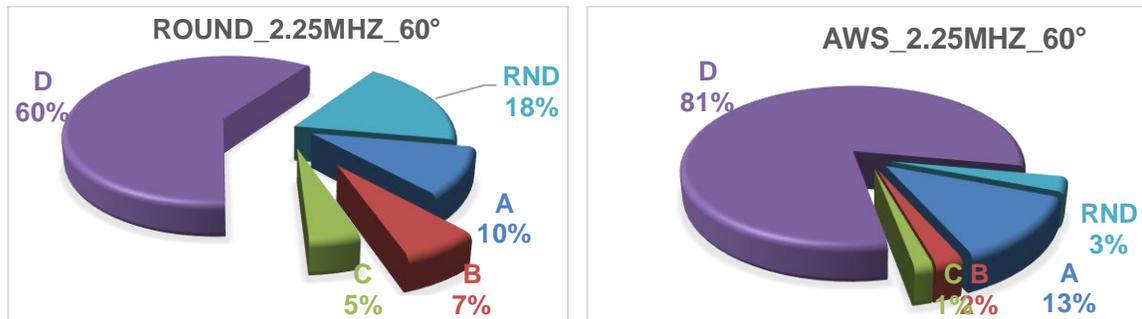
Para la Clase A se observa que el palpador AWS/45° tiene una tendencia mayor a clasificar los reflectores artificiales de esta forma. Además, la proporción de RNDs fue del 9% para el palpador ROUND/45° y 6% para el AWS/45°, que se consideran valores muy bajos, es decir con este ángulo, la capacidad de detección no varía al cambiar el tipo del palpador.

**Figura 4-12:** Proporción para la clasificación con palpadores ROUND y AWS de 45°.



La **Figura 4-13** muestra que la capacidad de detección (100% – %RND) del palpador AWS/60° fue mayor que la del palpador ROUND/60° (82% con el ROUND y 97% con el AWS). Además, si se comparan las proporciones de reflectores clasificados como “A”, “B” y “C” se observa que, en este caso, fueron mayores para el palpador ROUND/60° que para el AWS/60° (22% para el ROUND y 16% para el AWS).

**Figura 4-13:** Proporción para la clasificación con palpadores ROUND y AWS de 60°.

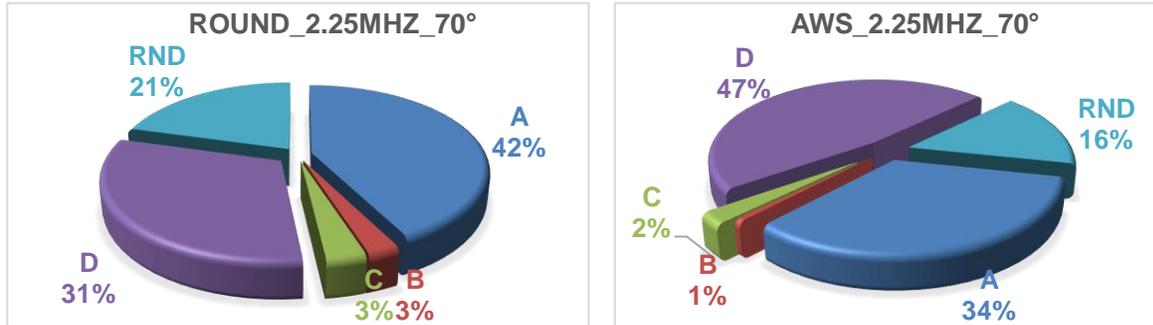


Se anota que, con el palpador AWS/60° se obtuvieron más reflectores clasificados como “D” que con el palpador ROUND/60°. Además, puede verse que el %RND con el palpador ROUND/60° subió al 18%, lo que denota que su capacidad de detección es menor que la obtenida con el palpador AWS/60°. En esta caso la capacidad de detección del palpador pequeño fue peor que la obtenida con el palpador AWS.

La **Figura 4-14** muestra que la capacidad de detección del palpador AWS/70° fue mayor que la obtenida con el palpador ROUND/70° (79% del ROUND y 84% del AWS). Además,

la proporción de reflectores clasificados como D fue también mayor con el palpador AWS/70° (47% del AWS versus 31% del ROUND), y las proporciones de reflectores clase “A”, “B” y “C” fueron mayores para el caso del palpador ROUND/70°. El %RND con el ROUND/70° fue del 21%, lo que da muestras de su menor capacidad de detección.

**Figura 4-14:** Proporción para la clasificación con palpadores ROUND y AWS de 70°.



Como una conclusión general es importante indicar que las clases B y C fueron siempre inferiores al 12% de los datos para el palpador ROUND y al 7% para el palpador AWS. Además la capacidad de detección del palpador AWS, siempre fue mejor que la obtenida con el palpador ROUND, sin importar el ángulo de incidencia.

La mejor capacidad de detección se obtuvo con el palpador AWS con una incidencia de 60° (RND de 3%) y la peor con el palpador ROUND de 70° (RND de 21%). Para ángulos de 60° y 70°, la proporción de reflectores clasificados como “D” fue mayor cuando se usó el palpador AWS; para el ángulo de incidencia de 45°, el % de clase D fue mayor con el palpador ROUND.

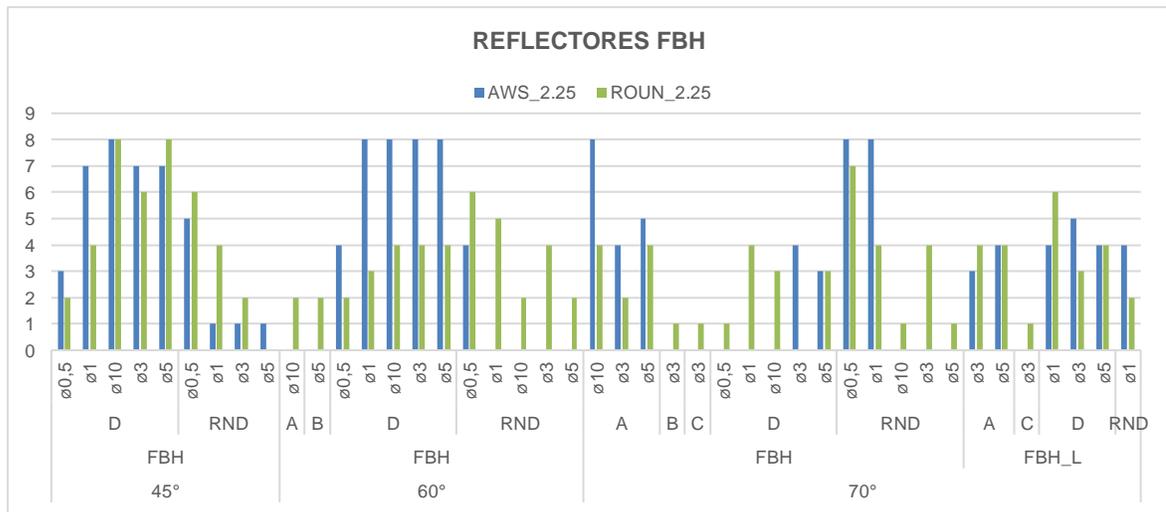
De los resultados obtenidos, también se puede observar una marcada tendencia del procedimiento, a que, independiente del tipo de palpador, los reflectores se clasifiquen mayoritariamente como “D”, es decir, a que se consideren como discontinuidades no perjudiciales para la estructura y que, por lo tanto, no sean rechazables. Con esto se corroboran las apreciaciones que tienen diferentes autores de que el procedimiento tiende a dejar discontinuidades dañinas en las soldaduras y que no es capaz de discernir estas de las inocuas de forma consistente.

En la **Figura 4-15**, la **Figura 4-16** y la **Figura 4-17** se muestra la cantidad de reflectores que fueron clasificados como A, B, C, D o RND, agrupados por tipo de reflector (FBH, NTH y SDH) y por tamaño de reflector. Es importante anotar que en la **Figura 4-15** se presentan datos para reflectores “FBH” y “FBH\_L” y en la **Figura 4-17** para los reflectores “SDH\_50” y “SDH\_80”. Cada gráfica muestra los datos para los dos palpadores (ROUND y AWS) y los tres ángulos de incidencia empleados en el Experimento 1.

La **Figura 4-15** muestra que los reflectores FBH examinados con 45° fueron principalmente clasificados como D o RND, sin importar el palpador. Es decir que reflectores examinados con 45° tienden a considerarse inocuos para la estructura, a pesar de tener tamaños tan grandes como  $\phi 10$  mm. La proporción de reflectores FBH clasificados como D con 45°,

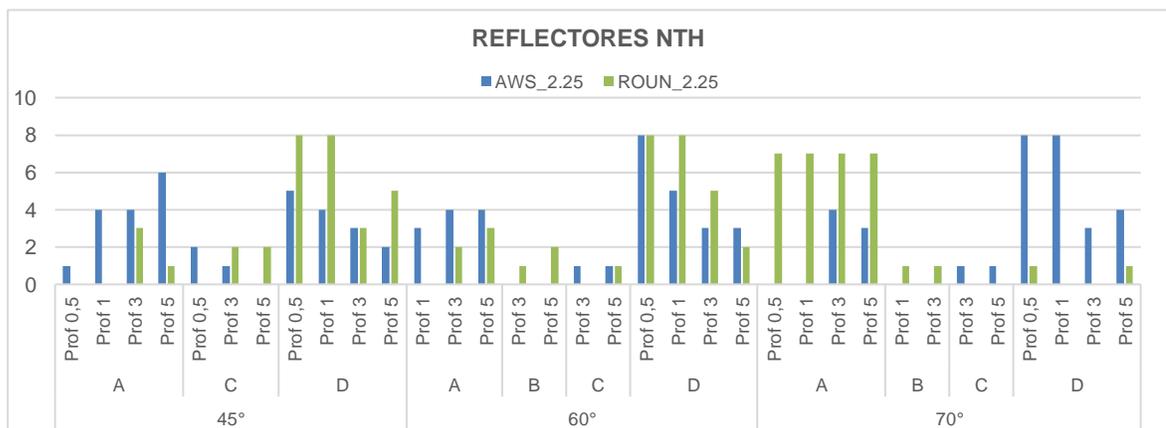
fue similar con ambos tipos de palpadores. Los reflectores FBH examinados con AWS/60° se clasificaron mayormente como “D”, sin importar su tamaño. Para los reflectores FBH\_L hay una tendencia a clasificar como “A” o “D” en tamaños mayores que 3 mm. Con el palpador AWS/70° hay una tendencia a clasificar los reflectores FBH como “A” (rechazable), y con el palpador ROUND/70° no se observa una tendencia particular.

**Figura 4-15:** Cantidad de reflectores FBH clasificados como A, B, C, D ó RND.

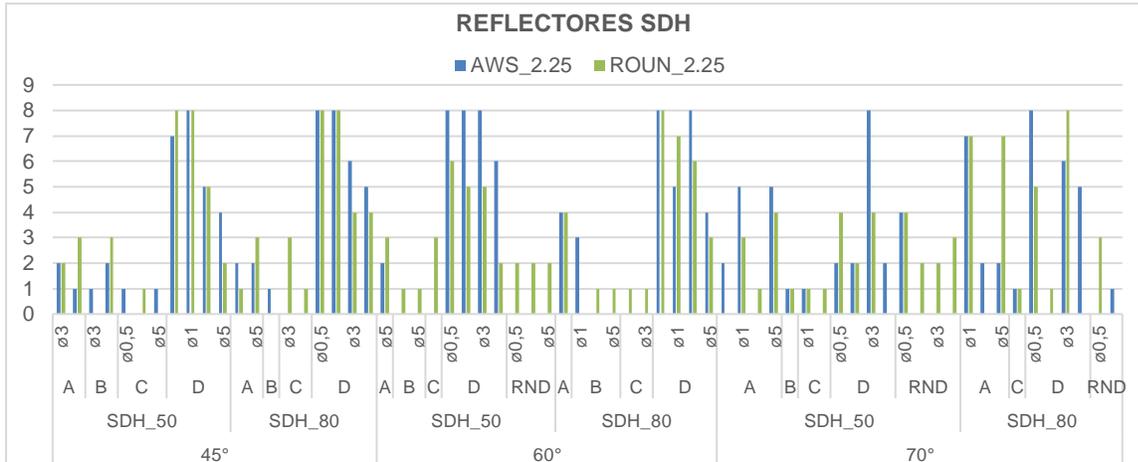


La **Figura 4-16** muestra que los reflectores NTH examinados con 45°, 60° y 70° tienden a clasificarse principalmente como “A” o como “D”, sin importar el tipo de palpador y ángulo de incidencia. En una menor proporción los reflectores se clasifican como “B” y “C”. Todos los reflectores NTH fueron detectados sin importar su tamaño y palpador empleado.

**Figura 4-16:** Reflectores NTH clasificados como A, B, C, D ó RND.



La **Figura 4-17** muestra que los reflectores SDH pueden ser clasificados como “A”, “B”, “C” o “D”, sin importar el ángulo de incidencia empleado, su posición (en la mitad SDH\_50 o en el cuarto inferior SDH\_80) o su tamaño. Además hay más probabilidades de que los reflectores SDH no se detecten con ángulos de incidencia de 60° y 70°.

**Figura 4-17:** Reflectores SDH clasificados como A, B, C, D ó RND.

La **Tabla 4-5** presenta el tipo y tamaño de los reflectores que no fueron detectados con ambos tipos de palpadores y los tres ángulos de incidencia. Es importante resaltar que en esta investigación sólo se considera una tendencia a la no detección cuando el porcentaje de reflectores no detectados, para las ocho mediciones, fue mayor o igual al 50% (solo estos datos se presentan en la referida tabla). De esta tabla es posible ver que, la *no detección* fue un poco mayor con el transductor ROUND que con el AWS, así:

- El palpador ROUND tuvo una tendencia muy marcada a no detectar reflectores  $FBH \leq \phi 1$  mm cuando se examina con  $45^\circ$  y  $\leq \phi 3$  mm cuando se examina con  $60^\circ$  y  $70^\circ$ . Lo mismo sucedió con reflectores SDH de  $\phi 0.5$  mm examinados con  $70^\circ$ .
- El palpador AWS tuvo también una tendencia marcada a no detectar reflectores  $FBH \leq \phi 0.5$  mm cuando se examina con  $45^\circ$  y  $60^\circ$  y  $\leq \phi 1$  mm cuando se examina con  $70^\circ$ .

**Tabla 4-5:** Reflectores con tendencia a la no detección para el Experimento 1.

PALP.	CANT.	ÁNGULO	REFLECTOR	TAMAÑO	OBSERVACIONES
AWS_2.25	5	$45^\circ$	FBH	0.5 mm	No detectado el 62%
	4	$60^\circ$	FBH	0.5 mm	No detectado el 50%
	8	$70^\circ$	FBH	0.5 mm	No detectado el 100%
	8		FBH	1 mm	No detectado el 100%
ROUND_2.25	6	$45^\circ$	FBH	0.5 mm	No detectado el 75%
	4		FBH	1 mm	No detectado el 50%
	6	$60^\circ$	FBH	0.5 mm	No detectado el 75%
	5		FBH	1 mm	No detectado el 50%
	4		FBH	3 mm	No detectado el 50%
	7	$70^\circ$	FBH	0.5 mm	No detectado el 87,5%
	4		FBH	1 mm	No detectado el 50%
	4		FBH	3 mm	No detectado el 50%
4	SDH_50		0.5 mm	No detectado el 50%	

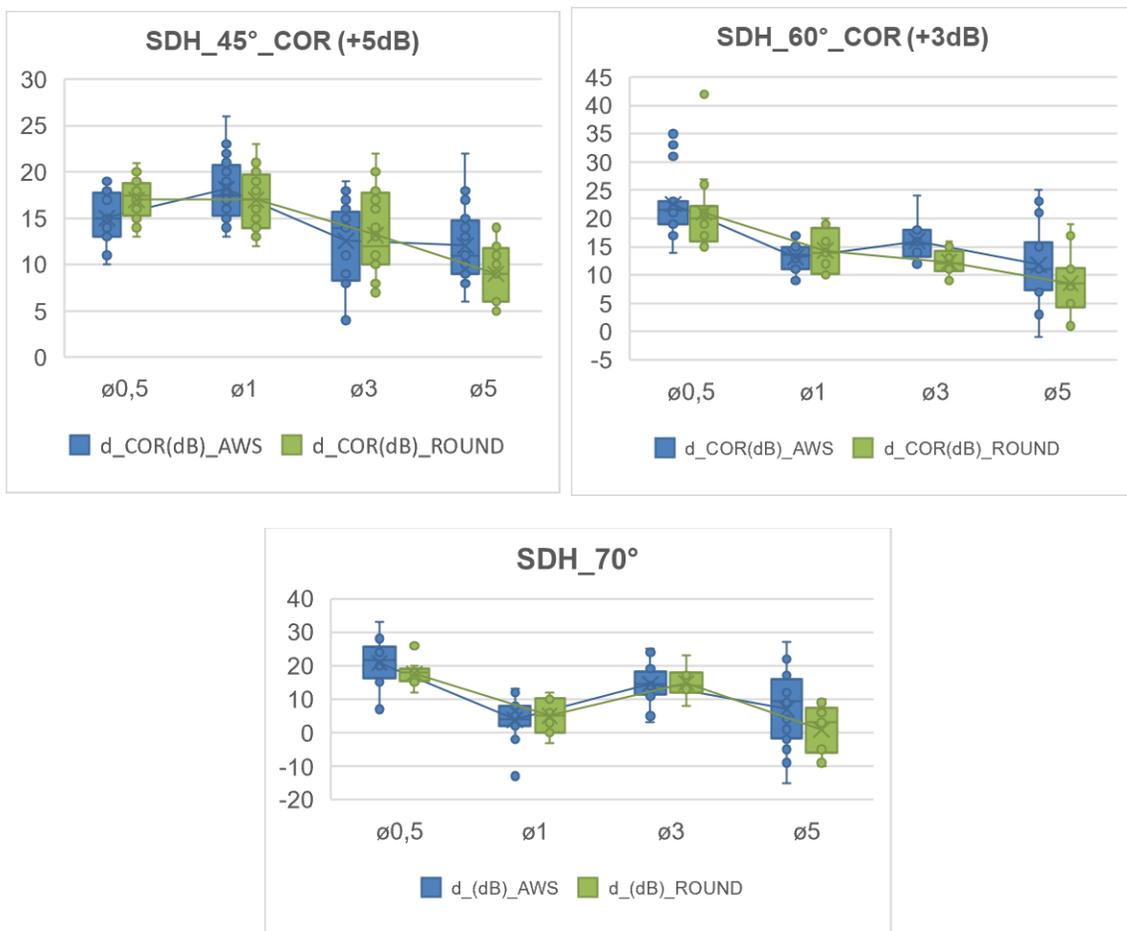
Los reflectores FBH exhiben una mayor tendencia a la no detección que los reflectores SDH y NTH, lo cual parece corresponder más a la longitud que tienen estos reflectores que a su tamaño. Se cree que el ultrasonido pulso-eco SCAN-A tiende a discernir bien discontinuidades transversales con cierta altura; sin embargo los datos muestran que más bien tiende a discernir o captar bien discontinuidades que tienen una longitud determinada (perpendicular al espesor) como los reflectores SDH y NTH en lugar de una altura (a través del espesor) como los reflectores FBH.

### 4.2.2 Capacidad de evaluación de las discontinuidades

#### 4.2.2.1 Dispersión y variabilidad de los datos

La **Figura 4-18** presenta la distribución de los valores obtenidos para el *índice de la indicación* para los reflectores SDH y los tres ángulos de incidencia. Aquí se observa cómo cambia el *índice de la indicación* (eje vertical) a medida que se aumenta el diámetro del reflector (eje horizontal).

**Figura 4-18:** Índice de la indicación vs. tamaño del reflector SDH (45°, 60° y 70°).



En la **Tabla 4-6** se presenta un resumen del promedio (media) y la desviación estándar (donde se encuentra el 68.26% de los datos) de  $d$ , que resultaron del Experimento 1, para cada tamaño y tipo reflector SDH, agrupado por tipo de palpador y ángulo de examen empleado.

El valor medio de  $d$  obtenido para los reflectores SDH es relativamente similar para varios tamaños de reflector y ambos tipos de transductores y tiende a ser mayor que 11 dB (Clase D). Además existe una leve tendencia a que se disminuya el valor del “ $d$ ” con el aumento en el tamaño del reflector, aunque varía dependiendo del ángulo de examen y el tipo de transductor empleado. Sólo el tamaño de  $\phi 5$  mm tiende a dar valores medios de “ $d$ ” menores que 11 dB (que habilitan clases de severidad dañinas) cuando se usa el palpador ROUND (con los tres ángulos); con el palpador AWS los 11 dB solo ocurren con un ángulo de  $70^\circ$ .

**Tabla 4-6:** Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores SDH.

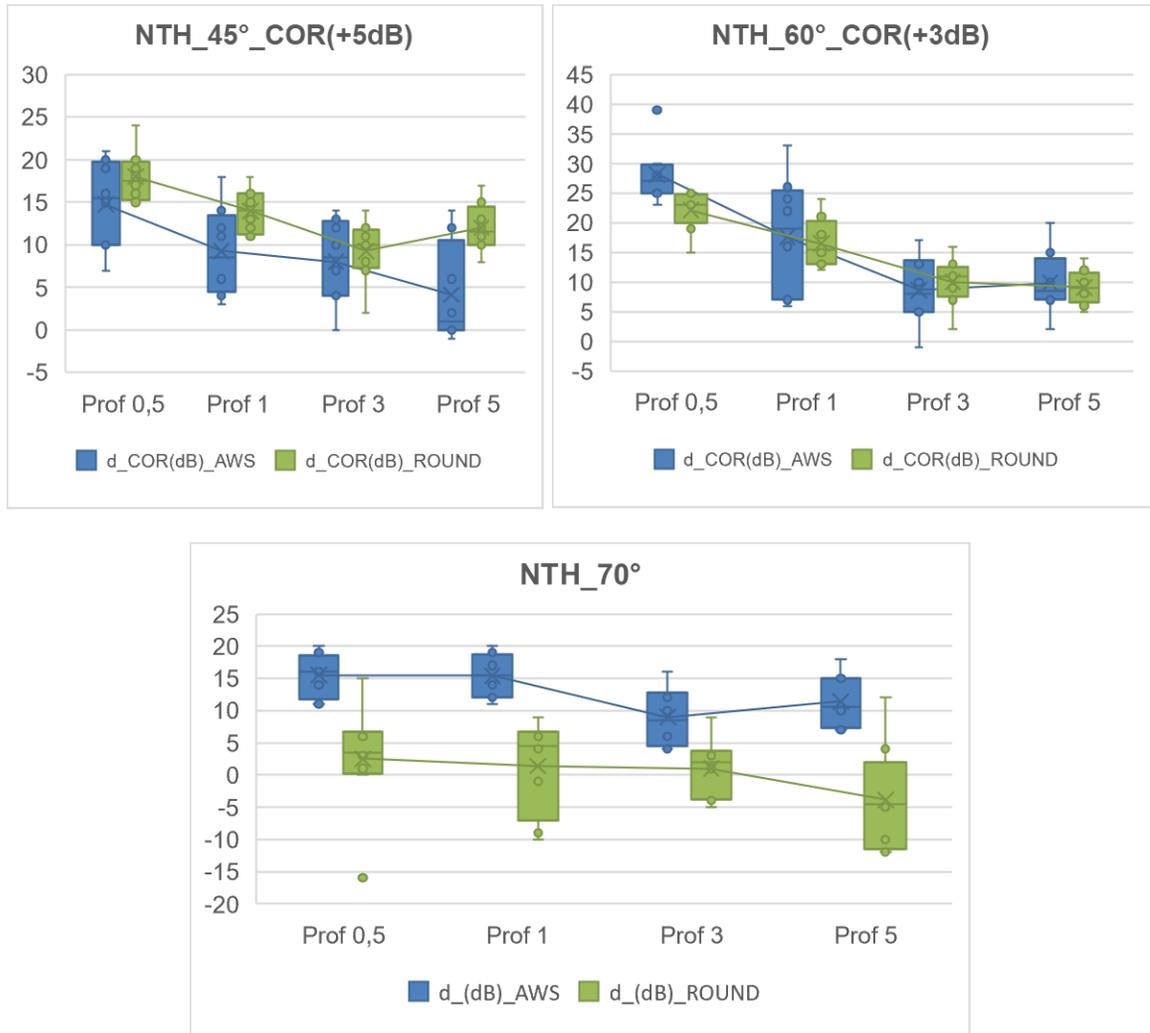
PALP	ANG	TAMAÑO	MED±DESVT ( $\sigma$ )	PALP	ANG	TAMAÑO	MED±DESVT( $\sigma$ )
AWS_2.25MHZ	45°	$\phi 0.5$ mm	15.1 ± 2.7 dB	ROUND_2.25MHZ	45°	$\phi 0.5$ mm	17.0 ± 2.3 dB
		$\phi 1$ mm	18.2 ± 3.6 dB			$\phi 1$ mm	17 ± 3.2 dB
		$\phi 3$ mm	12.6 ± 4.7 dB			$\phi 3$ mm	13.2 ± 4.8 dB
		$\phi 5$ mm	12.1 ± 4.3 dB			$\phi 5$ mm	9.0 ± 3.2 dB
	60°	$\phi 0.5$ mm	22.6 ± 5.8 dB		60°	$\phi 0.5$ mm	21.6 ± 7.1 dB
		$\phi 1$ mm	13.1 ± 2.8 dB			$\phi 1$ mm	14.3 ± 3.8 dB
		$\phi 3$ mm	16.0 ± 3.1 dB			$\phi 3$ mm	12.3 ± 2.3 dB
		$\phi 5$ mm	11.8 ± 7.2 dB			$\phi 5$ mm	8.5 ± 5.4 dB
	70°	$\phi 0.5$ mm	20.8 ± 7.8 dB		70°	$\phi 0.5$ mm	17.9 ± 3.9 dB
		$\phi 1$ mm	3.9 ± 6.5 dB			$\phi 1$ mm	5.0 ± 4.7 dB
		$\phi 3$ mm	14.6 ± 5.9 dB			$\phi 3$ mm	14.8 ± 3.9 dB
		$\phi 5$ mm	7.0 ± 11.6 dB			$\phi 5$ mm	0.8 ± 7.3 dB

De la **Tabla 4-6**, se observa que existe una alta dispersión (se considera una alta dispersión si la desviación estándar es  $\pm 1.5$  dB, que corresponde a la mitad del rango de 3 dB que separa una clase A de una D). Existen dispersiones que van entre  $\pm 2.3$  y  $\pm 11.6$  dB, que resultan muy amplias cuando el valor promedio de “ $d$ ” queda cercano a las clases B y C (9 y 10 dB): en este caso, una indicación con una alta dispersión podría quedar clasificada como A, B, C o D. En algunos casos la desviación estándar es aproximadamente mayor o igual que la media de los datos, lo que lleva a rangos muy amplios de más de 30 dB (palpador AWS/70°-SDH  $\phi 5$  mm). Además en varios tamaños se presentan cantidades considerables de valores atípicos.

Esta alta dispersión implica, además que, un mismo reflector puede tomar valores de entre 8-11 dB, sin importar el tamaño del reflector, por lo que hace muy difícil que se pueda establecer de forma inequívoca que el reflector o discontinuidad natural evaluado corresponde a un tamaño que realmente puede ser perjudicial para el desempeño de la estructura.

En la **Tabla 4-7** se presentan los valores promedio y la desviación estándar de los *índices de la indicación* para cada tamaño de reflector NTH, dependiendo del tipo de palpador y el ángulo de examen utilizado. Esta información se acompaña, con diagramas de caja y bigotes que se muestran en la **Figura 4-19**.

**Figura 4-19:** Índice de la indicación vs. profundidad del reflector NTH (45°, 60° y 70°).



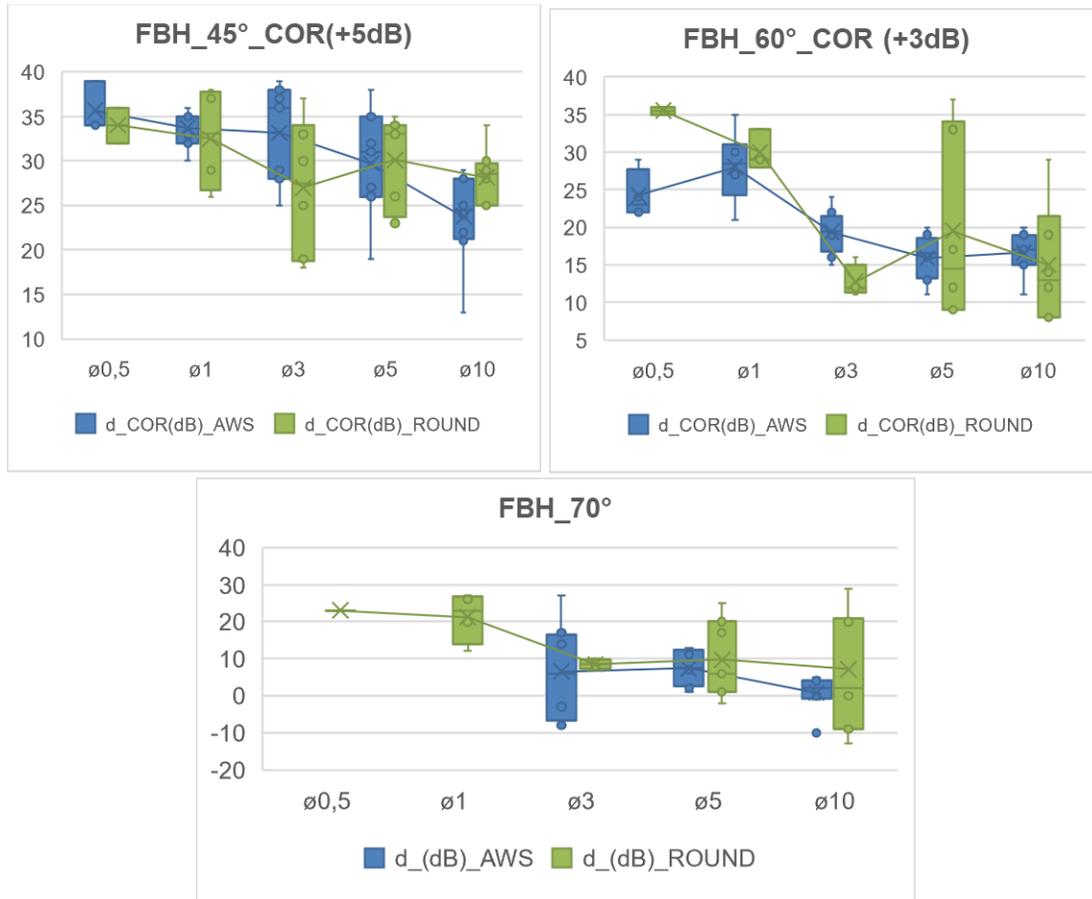
A partir de la **Tabla 4-7** y la **Figura 4-19** se observa que existe una leve diferencia entre las medias de los datos obtenidos con el transductor estándar AWS y las obtenidas con el transductor ROUND. La diferencia es más notable para el ángulo de 70°, donde el transductor AWS tuvo una tendencia a generar respuestas con niveles de indicación más positivos (de severidad menor) que las obtenidas con el ROUND. Este efecto se invierte para el ángulo de 45°, donde el palpador ROUND genera respuestas más positivas (índice de la indicación más grande) que el palpador AWS. Con el ángulo de 60° el índice de la indicación tiene a disminuir con el aumento en la altura del reflector. Además, el *índice de la indicación* de algunos reflectores presentan una menor desviación estándar (menor a  $\pm 4$ dB), tal y como se ve en la **Tabla 4-7**.

**Tabla 4-7:** Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores NTH.

PALP	ANG	TAMAÑO	MED±DESVT ( $\sigma$ )	PALP	ANG	TAMAÑO	MED±DESVT ( $\sigma$ )
AWS_2.25MHZ	45°	φ0.5 mm	14.8 ± 5.2 dB	ROUND_2.25MHZ	45°	φ0.5 mm	18.0 ± 3.0 dB
		φ1 mm	9.3 ± 5.3 dB			φ1 mm	14.0 ± 2.6 dB
		φ3 mm	8.0 ± 5.0 dB			φ3 mm	9.3 ± 3.7 dB
		φ5 mm	4.1 ± 5.9 dB			φ5 mm	12.0 ± 2.9 dB
	60°	φ0.5 mm	28.1 ± 5.0 dB		60°	φ0.5 mm	22.1 ± 3.4 dB
		φ1 mm	17.6 ± 10.2 dB			φ1 mm	16.5 ± 4.2 dB
		φ3 mm	8.6 ± 5.9 dB			φ3 mm	10.0 ± 4.2 dB
		φ5 mm	9.9 ± 5.6 dB			φ5 mm	9.1 ± 2.9 dB
	70°	φ0.5 mm	15.5 ± 3.3 dB		70°	φ0.5 mm	2.5 ± 8.8 dB
		φ1 mm	15.4 ± 3.5 dB			φ1 mm	1.4 ± 7.3 dB
		φ3 mm	9.0 ± 4.4 dB			φ3 mm	1.0 ± 4.8 dB
		φ5 mm	11.4 ± 4.2 dB			φ5 mm	-3.9 ± 8.3 dB

La **Figura 4-20** presenta la distribución de los valores del índice de la indicación obtenidos para los reflectores FBH y la **Tabla 4-8** presenta el promedio y la desviación estándar de índice de la indicación para cada tamaño de reflector, palpador y ángulo de incidencia usados para examinarlos.

**Figura 4-20:** Índice de la indicación vs. diámetro del reflector FBH (45°, 60° y 70°).



**Tabla 4-8:** Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores FBH.

PALP	ANG	TAMAÑO	MED±DESVT ( $\sigma$ )	PALP	ANG	TAMAÑO	MED±DESVT ( $\sigma$ )
AWS_2.25 MHz	45°	φ0.5 mm	35.7± 2.9 dB	ROUND_2.25 MHz	45°	φ0.5 mm	34.0 ± 2.8 dB
		φ1 mm	33.7 ± 2.1 dB			φ1 mm	32.5 ± 5.9 dB
		φ3 mm	33.1 ± 5.6 dB			φ3 mm	27.0 ± 7.7 dB
		φ5 mm	29.7 ± 6.3 dB			φ5 mm	30.1 ± 5.2 dB
		φ10 mm	23.8 ± 5.2 dB			φ10 mm	28.1 ± 3.1 dB
	60°	φ0.5 mm	24.3 ± 3.3 dB		60°	φ0.5 mm	35.5 ± 0.7 dB
		φ1 mm	28.0 ± 4.6 dB			φ1 mm	30.0 ± 2.6 dB
		φ3 mm	19.4 ± 2.9 dB			φ3 mm	12.8 ± 2.2 dB
		φ5 mm	15.9 ± 3.0 dB			φ5 mm	19.5 ± 12.4 dB
		φ10 mm	16.6 ± 2.9 dB			φ10 mm	15 ± 8 dB
	70°	φ3 mm	6.5 ± 13.3 dB		70°	φ3 mm	8.5 ± 1.3 dB
		φ5 mm	7.4 ± 4.7 dB			φ5 mm	9.7 ± 10.8 dB
		φ10 mm	0.8 ± 4.8 dB			φ10 mm	7.1 ± 16.2 dB

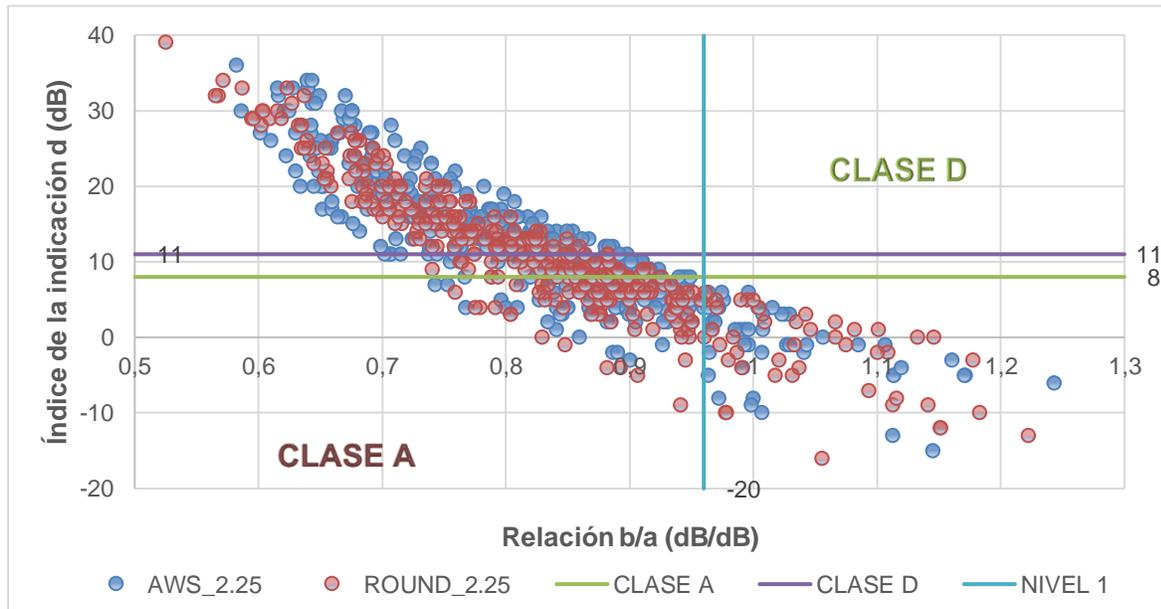
De la **Figura 4-20** y la **Tabla 4-8**, se puede ver que solamente los reflectores FBH examinados con 45° presentaron una tendencia reducir el *índice de la indicación* con el aumento en el tamaño del reflector, lo cual fue particularmente evidente con el transductor estándar AWS. Algo similar sucedió para el examen con 70°, aunque en este caso la tendencia a la baja fue más marcada a partir de  $\phi > 3$  mm.

La dispersión de los datos vuelve a ser muy alta en comparación con el rango de 3 dB establecido por el AWS para separar las distintas clases de severidad. Las desviaciones estándar encontradas variaron entre  $\pm 2.1$  hasta  $\pm 6.3$  dB para los palpadores AWS y entre  $\pm 0.7$  hasta  $\pm 16.2$  dB para los palpadores ROUND. Lo anterior es una señal de la incapacidad de la técnica para clasificar las indicaciones (A, B, C o D) cuando el promedio de “d” está muy cercano a los criterios de la AWS. Nótese como los reflectores de  $\phi 3$  mm,  $\phi 5$  mm y  $\phi 10$  mm pueden caer en zonas de clasificación A, B, C o D cuando se examinan con 70° (ejemplos resaltados en verde en la **Tabla 4-8**).

#### 4.2.2.2 Relación Nivel de referencia/ Nivel de la indicación (b/a)

En la **Figura 4-21** se presentan los valores del *índice de la indicación* “d” proveniente de los reflectores del Experimento 1 vs. la relación Nivel de referencia/Nivel de la indicación (b/a) para los dos tipos de palpadores. El parámetro adimensional b/a pretende mostrar cuáles reflectores artificiales presentaron respuestas acústicamente mayores o menores que el nivel de referencia b del reflector SDH que tiene  $\phi 1.5$  mm y 25 mm de longitud. Los valores se consideraron acústicamente mayores cuando la relación  $b/a \geq 0.96$ .

En esta gráfica los índices de la indicación d, obtenidos con ángulos de 60° y 45° no fueron corregidos con +3dB y +5dB, como se hizo con en las gráficas del numeral 4.2.2.1, ya que no se están usando los datos para establecer una clasificación de severidad (A, B, C y D).

**Figura 4-21:** Relación b/a versus el índice de la indicación d para el Experimento 1.

Puede verse en el gráfico que los valores de “d” obtenidos con los dos tipos de palpadores AWS y ROUND, se ubican en niveles similares, aunque el ancho de la banda de los datos obtenidos con el palpador ROUND es más estrecho que el del AWS. En la gráfica se puede ver que la mayoría de los reflectores artificiales detectados mostraron una respuesta “acústicamente menor” ( $b/a \leq 0.96$ ) que la del nivel de referencia.

Los reflectores que mostraron respuestas acústicamente mayores ( $b/a \geq 0.96$ ) se resumen en la **Tabla 4-9**. Solo se presentan 82 de los 94 datos con  $b/a \geq 0.96$ , ya que se excluyeron los datos del palpador AWS/70° que se presentaron en el numeral 4.1.2.2. Cerca del 30% de los datos de la **Tabla 4-9** corresponden a reflectores examinados en segunda pierna y los demás corresponden a reflectores examinados en primera pierna. La columna “OBSER” de la tabla corresponde al número de observaciones (de las ocho realizadas) que llevaron a que el tamaño y tipo de reflector examinado obtuviese un valor de  $b/a \geq 0.96$ .

**Tabla 4-9:** Reflectores con relaciones  $b/a \geq 0.96$  del Experimento 1.

PALP	REFL	ANG.	TAMAÑO	OBSER	b/a	a_(dB)	d_(dB)
AWS	NTH	45°	Prof. 0.5 mm	1	0,97	58,1	2
			Prof. 1 mm	5	0,99, 0,99, 0,96 1,04, 1,03	56,7, 56,9, 54,9, 54,1, 54,7	1, 1, 6, -2, -1
			Prof. 3 mm	5	0,98, 1,03, 0,97 1,17, 1,08	57,5, 51,5, 54,7 48,1, 51,9	5,-1, 2, -5, -1
			Prof. 5 mm	6	1,17, 1,11, 0,99, 1,16, 1,24, 1,11	47,9, 47,5, 53,7 48,5, 45,3, 47,5	-5, -5, 1, -3, -5
		60°	Prof. 3 mm	1	0,99	48,1	-4

PALP	REFL	ANG.	TAMAÑO	OBSER	b/a	a_(dB)	d_(dB)
	SDH_50	45°	φ3 mm	4	1.11, 1.00, 1.04, 0.96	50.7, 53.1, 50.7, 55.1	-1, 6, -1, 4
			φ5 mm	4	0.97, 1.00, 1.01, 0.96	54.3, 52.7, 52.5, 54.9	6, 3, 1, 4
		60°	φ5 mm	2	0.97, 1.06	57.7, 53.1	4, 0
	SDH_80	45°	φ3 mm	2	1.03, 1.02	54.7, 51.7	3, 3
			φ5 mm	3	1.03, 1.02, 1.01	54.5, 52.1, 52.5	3, 4, 3
		60°	φ5 mm	2	1.00, 1.12	54.1, 50.1	3, -4
ROUND	FBH	70°	φ5 mm	2	0.99, 0.97	61.90, 60.30	-2, 1
			φ10 mm	3	1.11, 0.96, 1.22	54.90, 60.70, 47.70	-9, 0, -13
	NTH	45°	Prof. 3 mm	3	0.96, 1.18, 1.03	46.90, 38.30, 40.10	5, -3, 2
			Prof. 5 mm	2	0.97, 0.96	46.50, 43.30	2, 2
		70°	Prof. 3 mm	1	1.03	47.9	-1
			Prof. 0.5 mm	1	1.06	57.9	-16
			Prof. 1 mm	1	0.98	62.5	-10
			Prof. 3 mm	3	0.99, 1.02, 0.98	61.7, 56.9, 59.1	-4, -5, -3
	SDH_50	45°	φ3 mm	3	1.07, 1.04, 0.99	42.30, 37.70, 39.50	2, 3, 5
			φ5 mm	5	1.00, 1.08, 1.15, 1.13, 0.97	44.90, 41.70, 34.30, 34.70, 40.50	4, 1, 0, 0, 4
	SDH_80	45°	φ3 mm	4	0.96, 1.00, 0.96, 1.01	46.90, 45.10, 47.10, 44.70	6, 5, 5, 2
			φ5 mm	4	1.07, 1.05, 0.99, 1.10	42.30, 43.10, 39.70, 35.70	0, 1, 5, 1
	SDH_50	70°	φ1 mm	2	0.98, 1.02	45.52, 44.25	0, -3
			φ5 mm	4	1.09, 1.04, 1.14, 1.18	40.84, 45.8, 45.80, 44.6	-7, -4, -9, -10
	SDH_80	70°	φ5 mm	1	1.03	56.5	-5

A partir de los datos de la **Tabla 4-9** se observó que:

- La mayoría de los reflectores SDH con  $b/a \geq 0.96$ , presentaban diámetro  $\geq 3$  mm. Muy pocos reflectores SDH menores que  $\phi 3$  mm mostraron respuestas acústicas mayores al nivel de referencia. Los SDHs pueden detectarse fácilmente con los tres ángulos de incidencia y los dos tipos de palpadores. Sin embargo, este hallazgo solo fue posible, típicamente en el 50% de las observaciones obtenidas

para cada tipo de reflector (4 de 8), y en otros casos esporádicos en el 12.5% (1 de 8) y el 75% (6 de 8) de las observaciones.

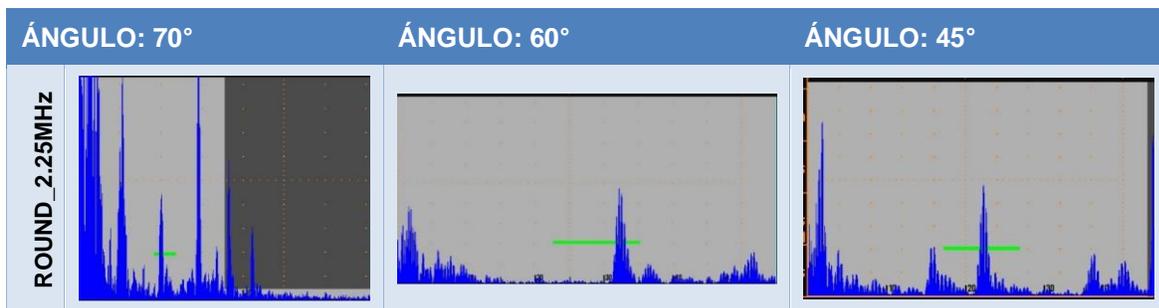
- La mayoría de los reflectores NTH con  $b/a \geq 0.96$ , tienen una altura  $\geq 3$  mm. Muy pocos reflectores NTH  $< 3$  mm mostraron respuestas acústicas mayores al nivel de referencia, lo cual fue particularmente evidente con el palpador AWS/45°. Sin embargo, este hallazgo solo fue posible, típicamente en el 37.5% (3 de 8 observaciones) de las observaciones obtenidas para cada tamaño de reflector.
- Contrario a lo que sucedió en el experimento 0 en el que el palpador AWS/70° casi no generó respuestas acústicamente mayores que las del nivel de referencia para reflectores NTH con alturas mayores a 3 mm, con el palpador ROUND/70° esto sí fue posible como se ve en la **Tabla 4-9**.
- Sólo algunas de las observaciones en los reflectores FBH de más de  $\phi 5$  mm generaron respuestas acústicas mayores al nivel de referencia para el palpador ROUND-/70°. Con los demás ángulos no se obtuvieron respuestas de este tipo reflectores SDH. Además, esto sucedió en menos del 37.5% (3 de 8) de las observaciones realizadas por cada tipo y tamaño de reflector.

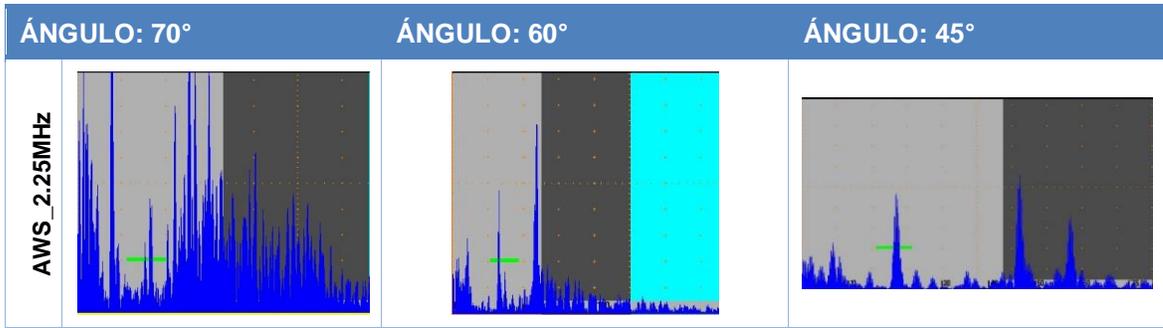
Para lograr valores  $b/a \geq 0.96$ , el mínimo valor del *índice de la indicación* “d” requerido fue de 6dB, valor que posibilita que el reflector se clasifique como “A”, si se consideran los criterios de aceptación para 70° y una condición de esfuerzos de tracción. En vista de la alta volatilidad de los datos (probabilidades menores al 50% para lograr que un reflector de más de 3 mm genere una respuesta acústicamente mayor que el nivel de referencia) es posible indicar que, sin importar el tipo de palpador que se emplee, el *índice de la indicación* no resulta ser un parámetro confiable para determinar el nivel de severidad.

#### 4.2.3 Forma del eco de los reflectores artificiales

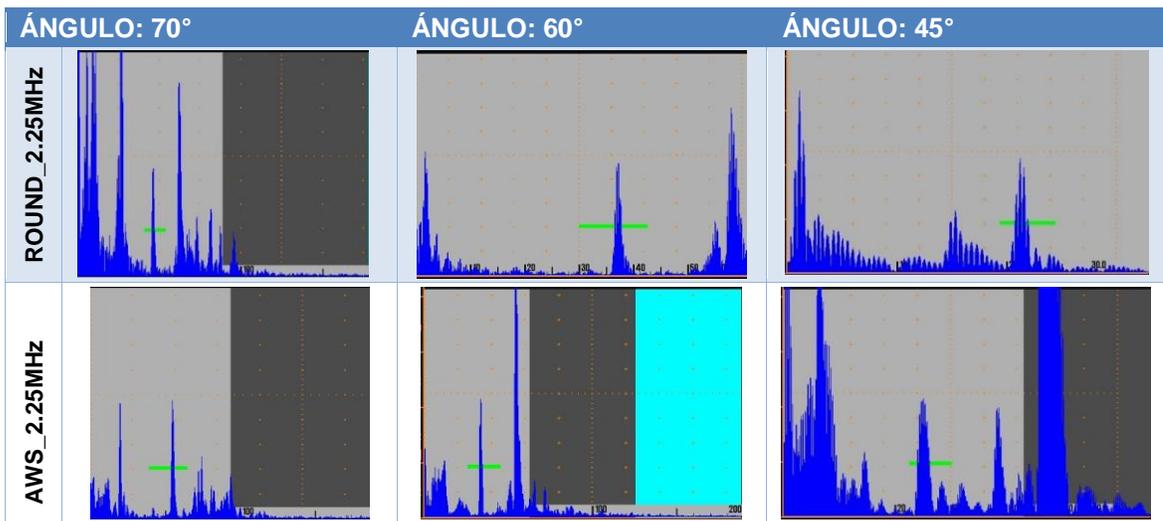
En la **Tabla 4-10**, **Tabla 4-11** y **Tabla 4-12** se presentan algunas imágenes obtenidas para los tres tipos de reflectores, de un tamaño de 3 mm examinados con los tres ángulos de incidencia y los dos transductores empleados en el experimento 1 (AWS y ROUND). Las imágenes de las tablas muestran el eco marcado con la compuerta (línea horizontal de color verde). Además, el eje horizontal de las figuras corresponde a la distancia a la cual se registró la señal (en milímetros), y el eje vertical al % en la altura del eco.

**Tabla 4-10:** Formas del eco para el reflector SDH de  $\phi 3$  mm (primera pierna).

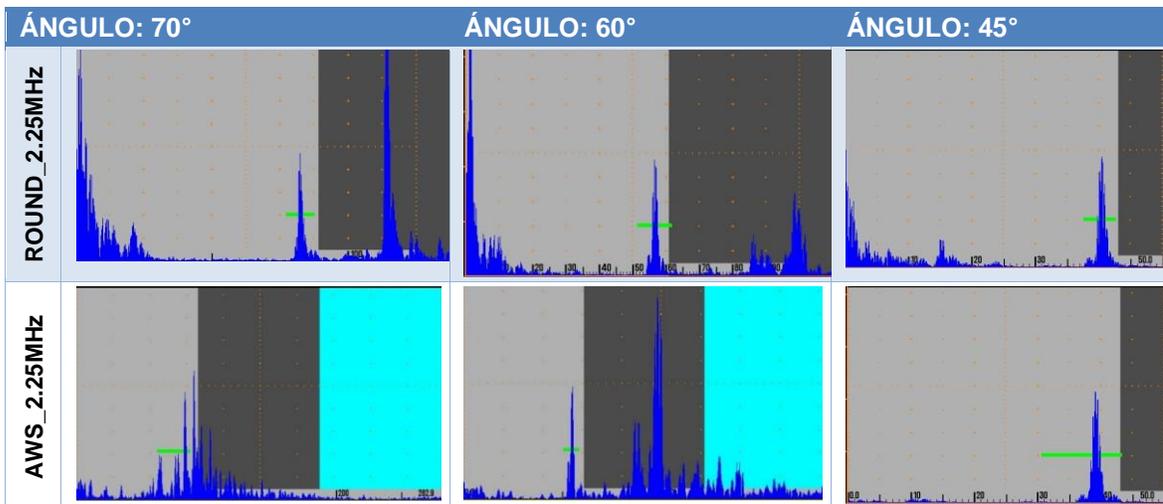




**Tabla 4-11:** Formas del eco para el reflector FBH de  $\phi 3$  mm (primera pierna) .



**Tabla 4-12:** Formas del eco para el reflector NTH de 3 mm (primera pierna).



Cuando se comparan las respuestas para los tres ángulos de incidencia y los dos tipos de transductores se pueden notar algunas diferencias muy leves en los ecos del reflector SDH

de  $\phi 3$  mm que se hacen más anchos con ángulos de  $45^\circ$  y  $60^\circ$ . Sin embargo tales diferencias no son lo suficientemente significativas para permitir que este parámetro defina inequívocamente el reflector examinado por tipo de transductor y ángulo de incidencia empelado. De manera similar sucede para los ecos del reflector FBH y SDH. No fue posible establecer una correlación entre la forma del eco con el tipo y tamaño de los reflectores artificiales utilizados en este estudio.

### 4.3 EXPERIMENTO 2: AUMENTO DE LA FRECUENCIA DEL PALPADOR

#### 4.3.1 Capacidad de detección de reflectores artificiales

La **Figura 4-22**, **Figura 4-23** y la **Figura 4-24** presentan los valores obtenidos para “d” vs la distancia del sonido para los reflectores FBH y FBH\_L (sólo para ángulo de  $70^\circ$ ); para NTH; para SDH\_50 y SDH\_80. Las líneas horizontales representan los niveles de severidad (8, 9, 10 y 11 dB que corresponden a las clases A, B, C y D respectivamente) de discontinuidades para esfuerzos de tracción de la tabla 6.3 del código AWS D1.5. Los datos se presentan para los resultados obtenidos con los palpadores AWS y ASE y los tres ángulos de incidencia ( $70^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $45^\circ$ ). La línea vertical azul clara de los gráficos, representa la división entre los datos obtenidos en primera pierna (izquierda) y en segunda pierna (derecha).

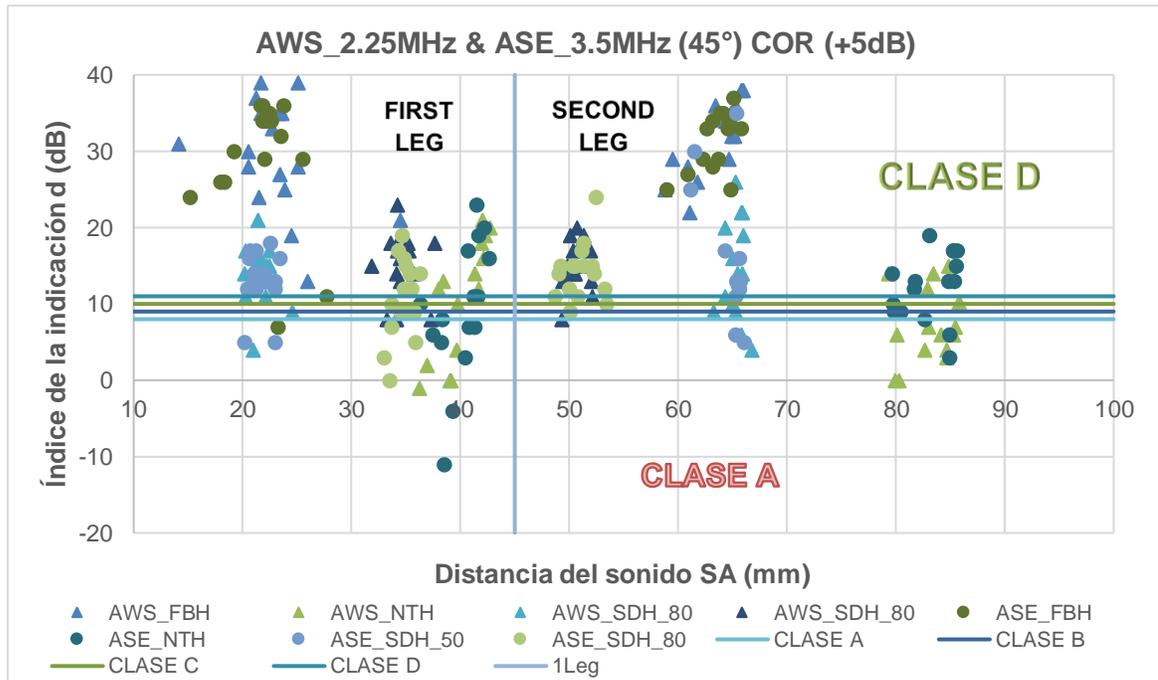
Es de anotar que, para los ángulos de  $45^\circ$  y  $60^\circ$  se consideró la corrección en el *índice de la indicación* de 3dB y 5dB (de acuerdo con el numeral 3.1.1.3), con el fin de que los criterios de severidad de la AWS que son exclusivamente aplicables a  $70^\circ$ , fuesen aplicables a otros ángulos de examen ( $45^\circ$  y  $60^\circ$ ) y por tanto se pudiese establecer una clasificación del reflector para su análisis comparativo.

Cabe recordar que en el experimento “2” se realizaron 864 mediciones (de las cuales 160 corresponde a las mediciones del Experimento 0 -datos de AWS 2.25MHz/ $70^\circ$ - y 272 al Experimento 1 -datos del examen con AWS\_2.25MHz/ $60^\circ$  y AWS\_2.25MHz/ $45^\circ$ ). Las observaciones se obtuvieron con dos réplicas, de cinco de reflectores (NTH, FBH, SDH\_50% y SDH\_80% para todos los ángulos y FBH\_L solo para  $70^\circ$ ) y cinco tamaños de reflectores FBH, tres de FBH\_L y cuatro de reflectores NTH, SDH\_50 y SDH\_80%.

En las tres gráficas puede notarse, de forma general, que la gran mayoría de reflectores artificiales, detectados, corresponden a las clases A y D y muy pocos reflectores corresponden a la clase B y C. Además el rango en el que el valor de “d” se encuentra, para un tipo determinado de reflector fue similar con ambos tipos de palpadores.

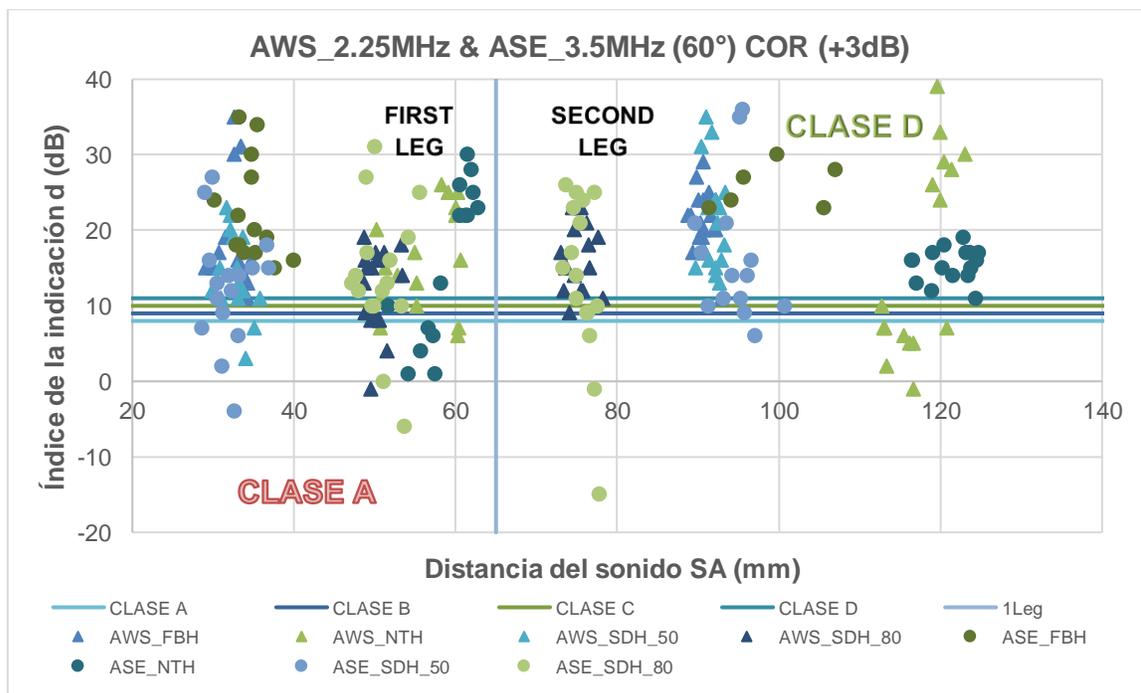
La **Figura 4-22** para un ángulo de  $70^\circ$  muestra que, no existen índices de la indicación diferenciales entre los reflectores examinados con uno u otro tipo de palpador. También, se puede ver es que, en algunos casos las respuestas son muy parecidas, por lo menos en la dispersión de los datos, como sucede con reflectores SDH\_80 y NTH examinados en segunda pierna. Los reflectores FBH y SDH\_50 que se encuentran en un posición a través del espesor, similar (es decir en la mitad), también presentaron respuestas muy parecidas, sin importar el tipo de palpador usado para su examen.

**Figura 4-22:** Índice de la indicación vs distancia del sonido del experimento 2 (45°).



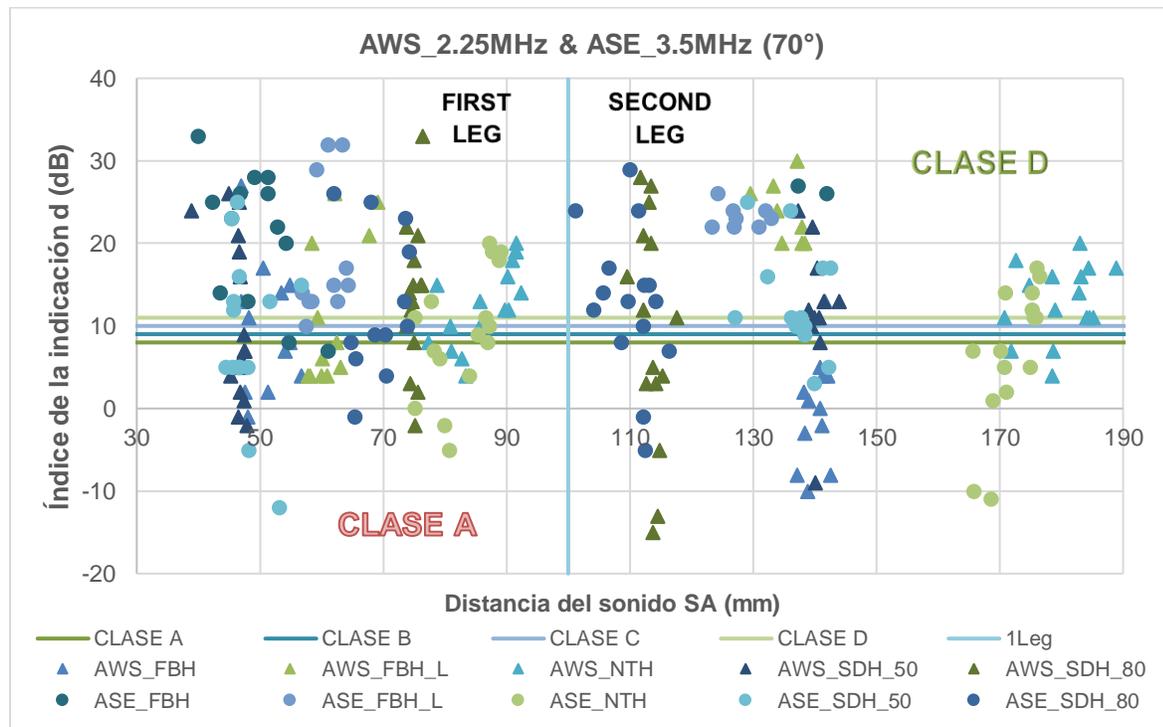
La **Figura 4-23** muestra que existe una mayor proporción de reflectores clasificados como “D” que como “A”, esto se debe, en parte, a la corrección que se hizo en los datos para adaptar los criterios de severidad de código AWS, exclusivos para un ángulo de 70°.

**Figura 4-23:** Índice de la indicación vs distancia del sonido del experimento 2 (60°).



La **Figura 4-24** para un ángulo de incidencia de  $70^\circ$  muestra que existe una proporción de reflectores clasificados como “D” y como “A” similares. Es importante anotar que con este ángulo la proporción de reflectores clasificados como “A” aumenta debido que no existe corrección en los criterios de severidad de las discontinuidades, como sucede para los reflectores examinados con  $45^\circ$  y  $60^\circ$ . Muy pocos reflectores se introducen en el estrecho intervalo que establece el código AWS para las clases B y C.

**Figura 4-24:** Índice de la indicación vs distancia del sonido del experimento 2 ( $70^\circ$ ).



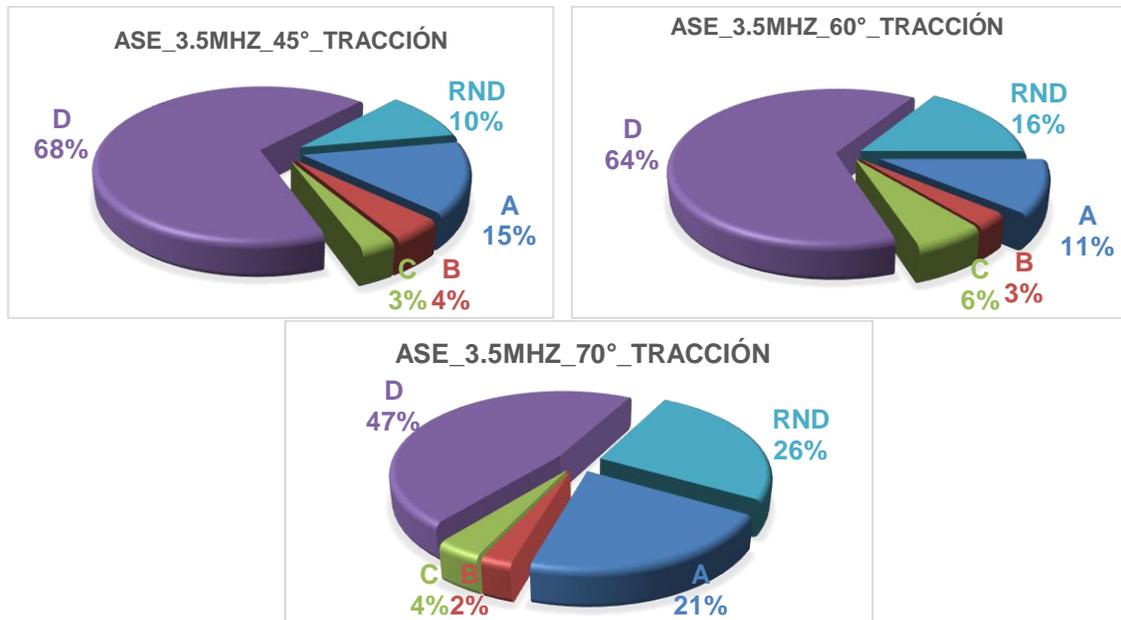
La **Figura 4-25** presenta solo los datos obtenidos para el palpador ASE, no se muestran los resultados del palpador AWS, pues estos fueron mostrados en la sección de los resultados del Experimento 1. En esta figura se presenta la proporción de reflectores que se clasificaron como “A”, “B”, “C” y “D” y no detectados (RND), empleando los tres ángulos de incidencia estándar ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $70^\circ$ ).

En un análisis sólo del palpador, es posible ver que, con el ángulo de  $45^\circ$  se obtuvo la mejor capacidad de detección, del 90% (un RND del 10%) y la peor con el ángulo de  $70^\circ$  (RND del 26%). Cuando se comparan estos valores con los obtenidos con el palpador AWS en el experimento 1, lo que podemos ver es que el palpador ASE siempre tuvo una menor capacidad de detección que el palpador AWS.

Con respecto a las proporciones de las clasificaciones, es posible indicar que la proporción de reflectores “B” y “C” examinados con el palpador ASE, se mantuvo por debajo del 10%, lo cual es similar a lo encontrado con los palpadores AWS y ROUND. Además, la Clase “D” fue la designación más usual para los reflectores examinados, seguida por la Clase “A”. En el caso del palpador ASE, sólo con un ángulo de  $70^\circ$  se logró una proporción mayor

al 20% para la Clase “A”, lo cual se explica en la no corrección que se hizo a los valores del índice de la indicación.

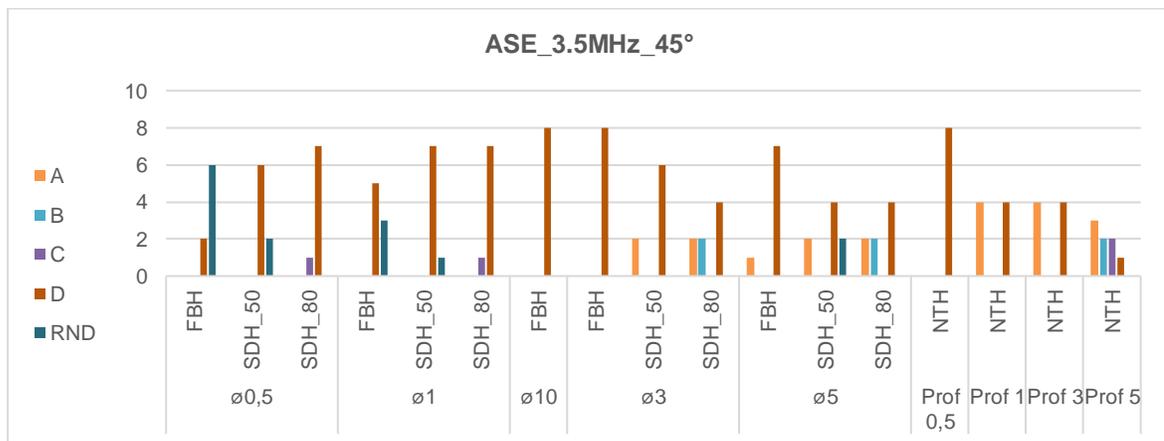
**Figura 4-25:** Clasificación reflectores examinados con el palpador ASE\_3.5 MHz.



En la **Figura 4-26**, la **Figura 4-27** y la **Figura 4-28** se muestra la cantidad de reflectores que fueron clasificados en una severidad determinada (A, B, C, D o RND), agrupados por tipo de reflector (FBH, NTH y SDH), tamaño de reflector y ángulo de incidencia (45°; 60° y 70°).

La **Figura 4-26** muestra los resultados de clasificación de reflectores solo para el ángulo de 45°. En esta figura se puede ver que los reflectores FBH, examinados con 45°, fueron principalmente clasificados como D o fueron no detectados, sin importar su tamaño. Los reflectores FBH tuvieron la mayor proporción de no detectados.

**Figura 4-26:** Refletores clasificados como A, B, C o D o no detectados para 45°.



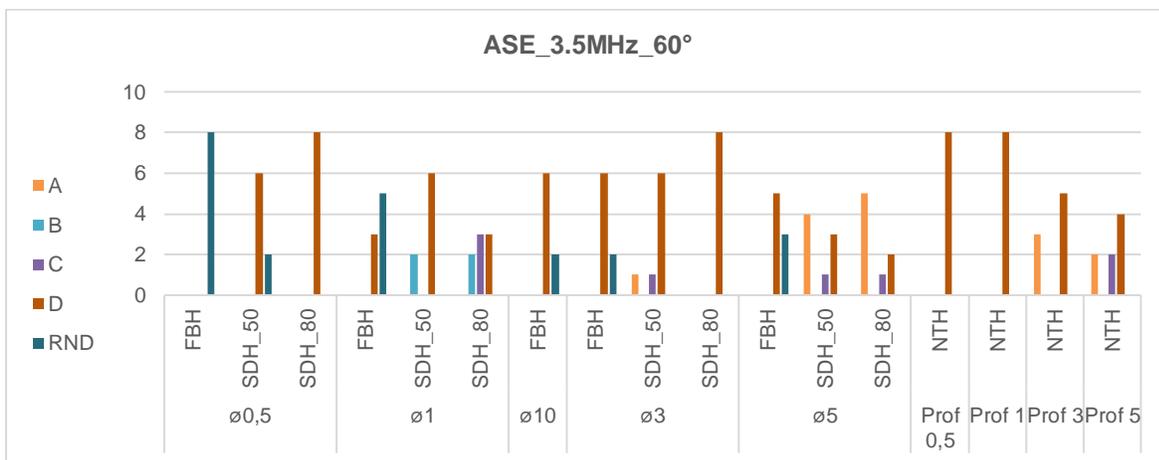
Con los reflectores SDH, fue posible obtener algunos reflectores clasificados como B o como C, aunque sólo en el caso de aquellos ubicados en el 80% del espesor (parte más cercana a la superficie inferior).

Para las entallas con profundidades de 1 y 3 mm hay un 50% de posibilidad de que estas se clasifiquen como A o como D. Con NTH de 5 mm de profundidad hay una alta volatilidad en los datos, por lo que el reflector puede tomar las adoptar las cuatro clases sin distinción.

La **Figura 4-27** (para un ángulo de 60°) muestra una tendencia de clasificación similar a obtenida con el ángulo de 45° para el caso de los reflectores FBH y algunos tamaños de los reflectores SDH. Para el caso de los reflectores NTH, se observa una tendencia más marcada a que reflectores de menos de 3 mm de profundidad se clasifiquen como "D". En los reflectores NTH de 5 mm, el reflector puede clasificarse como A, D o C.

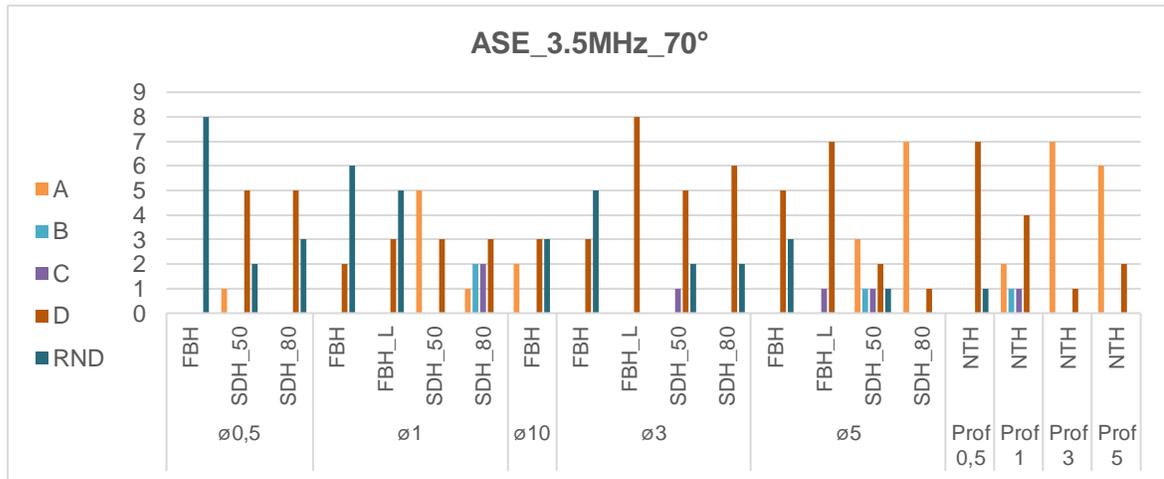
Los reflectores FBH de 0.5 mm de diámetro no fueron detectados bajo ninguna circunstancia con este ángulo de 60°, además este tipo de reflectores presentaron la mayor tasa de no detección. La recurrencia de la clase D, es igualmente notoria para este tipo de reflectores.

**Figura 4-27:** Reflectores clasificados como A, B, C o D o no detectados para 60°.



La **Figura 4-28** (que corresponde a los resultados para un ángulo de 70°) muestra una tendencia a que los reflectores NTH tiendan a clasificarse como "A" cuando se examinan con un ángulo de este tipo. Contrario a lo que sucede con el examen con ángulo de 60° y 45°. También se observó una mayor volatilidad en la clasificación que adoptan los reflectores SDH y una tendencia a no detectarlos un poco mayor que la presentada con los otros ángulos. Al igual que con los otros ángulos, los reflectores FBH exponen una mayor tendencia a la no detección que los demás tipos de reflectores; no fue posible detectar reflectores FBH menores a 3 mm de diámetro.

**Figura 4-28:** Reflectores clasificados como A, B, C o D o no detectados para 70°.



La **Tabla 4-13** presenta el tipo y tamaño de los reflectores que no fueron detectados con ambos tipos de palpadores y los tres ángulos de incidencia. Es importante resaltar que en esta investigación sólo se considera una tendencia a la no detección cuando el porcentaje de RND de las ocho mediciones realizadas a cada reflectores es mayor o igual al 50%.

**Tabla 4-13:** Reflectores RND, discriminados por tipo y tamaño de reflector (Experimento 2).

PALP.	CANT.	ÁNGULO INC.	REFLECTOR	TAMAÑO	OBSERVACIONES
ASE_3.5	6	45°	FBH	0.5 mm	No detectado el 75%
	8	60°	FBH	0.5 mm	No detectado el 100%
	5		FBH	1 mm	No detectado el 62.5%
	8	70°	FBH	0.5 mm	No detectado el 100%
	6		FBH	1 mm	No detectado el 80%
	5		FBH	3 mm	No detectado el 62.5%
	5		SDH	0.5 mm	No detectado el 62.5%
	4		SDH	3 mm	No detectado el 50%

La no detección fue levemente mayor con el transductor ASE que con el transductor AWS (pues se incluyen algunos tamaños adicionales o tipos de reflectores), así:

- Los reflectores FBH menores a  $\phi 3$  mm tienen una alta tendencia a la no detección con el transductor ASE/70°.
- Los reflectores FBH de  $\phi 0.5$  mm tienen una alta tendencia a la no detección sin importar el ángulo de incidencia.
- Los reflectores SDH de  $\phi 0.5$  mm y  $\phi 3$  mm tienen una tendencia a la no detección cuando se emplea un ángulo de 70°, esto no sucedió con el transductor AWS.

Los reflectores SDH de  $\phi 3$  mm, tienen una anormal tendencia a la no detección cuando se emplea el palpador ASE/70°, lo cual podría estar relacionado más bien con la técnica de examen o la dificultad para ubicar de forma adecuada el palpador en el espacio, en vista de que tiene un ancho mayor que el palpador AWS.

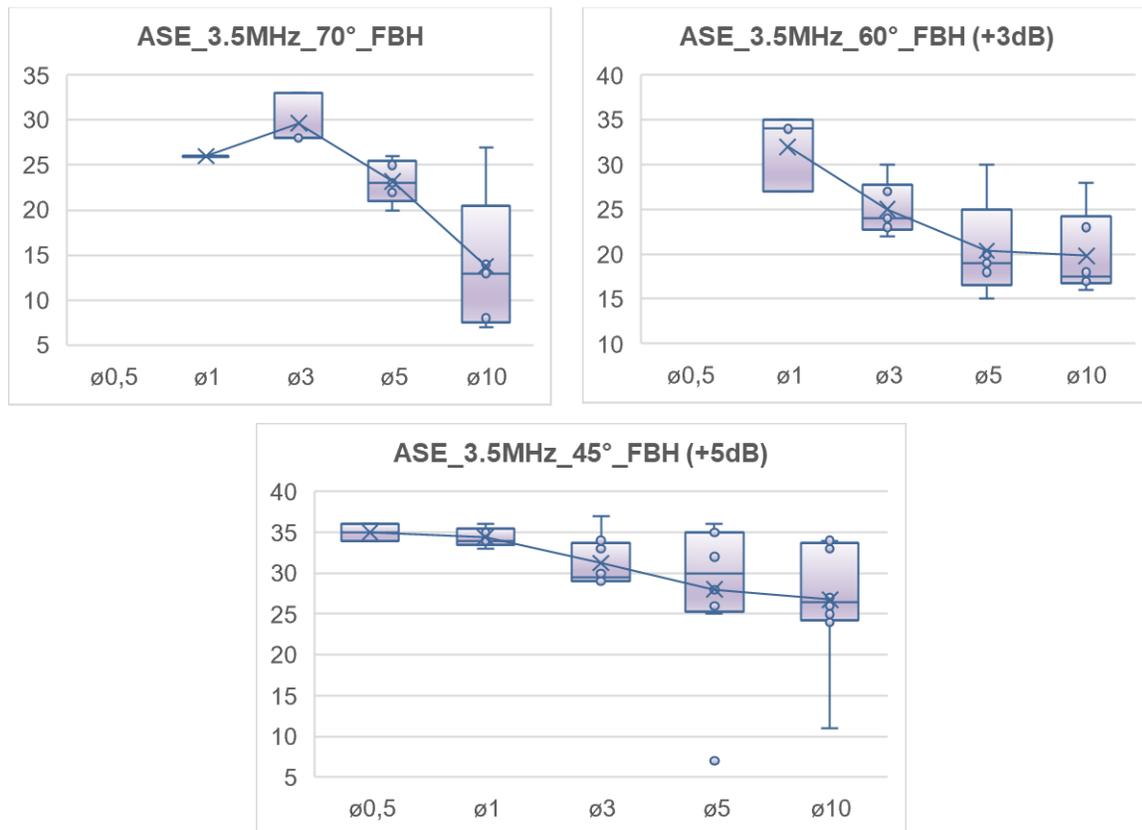
### 4.3.2 Capacidad de evaluación de las discontinuidades del procedimiento

#### 4.3.2.1 Dispersión y variabilidad de los datos

La **Figura 4-29** (aplicable a reflectores FBH) muestra que el valor medio de  $d$  obtenido para los reflectores FBH, examinados con  $45^\circ$ , es relativamente similar para varios de los tamaños de reflector y tiende a ser mayor que 25 dB (Clase D). Además existe una leve tendencia a que se disminuya el valor del *índice de la indicación* con el aumento en el tamaño del reflector cuando se emplean ángulos de  $60^\circ$  y  $70^\circ$ .

Ninguno de los tamaños de los reflectores FBH examinados con los tres ángulos generó un valor medio para  $d$  menor a 8dB (que lo habilitaría para que se clasificara como una discontinuidad severa para la estructura). Esta tendencia indica que una discontinuidad similar a un FBH (como por ejemplo una falta de fusión) sería considerada, en la mayoría de los casos, como inocua para la estructura.

**Figura 4-29:** Índice de la indicación vs. diámetro del reflector FBH ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $70^\circ$ ).



También existe una alta dispersión (véase también la **Tabla 4-14**), en la mayoría de los datos obtenidos para el reflector FBH, (desviación estándar mayor a 1.5 dB); sin embargo esta dispersión es un poco menor que la obtenida con el palpador AWS. El rango en el que se mueven los valores de  $d$ , en este caso, fue un poco más estrecho (de menos de 22dB) que los del palpador AWS. También se dieron menos valores atípicos.

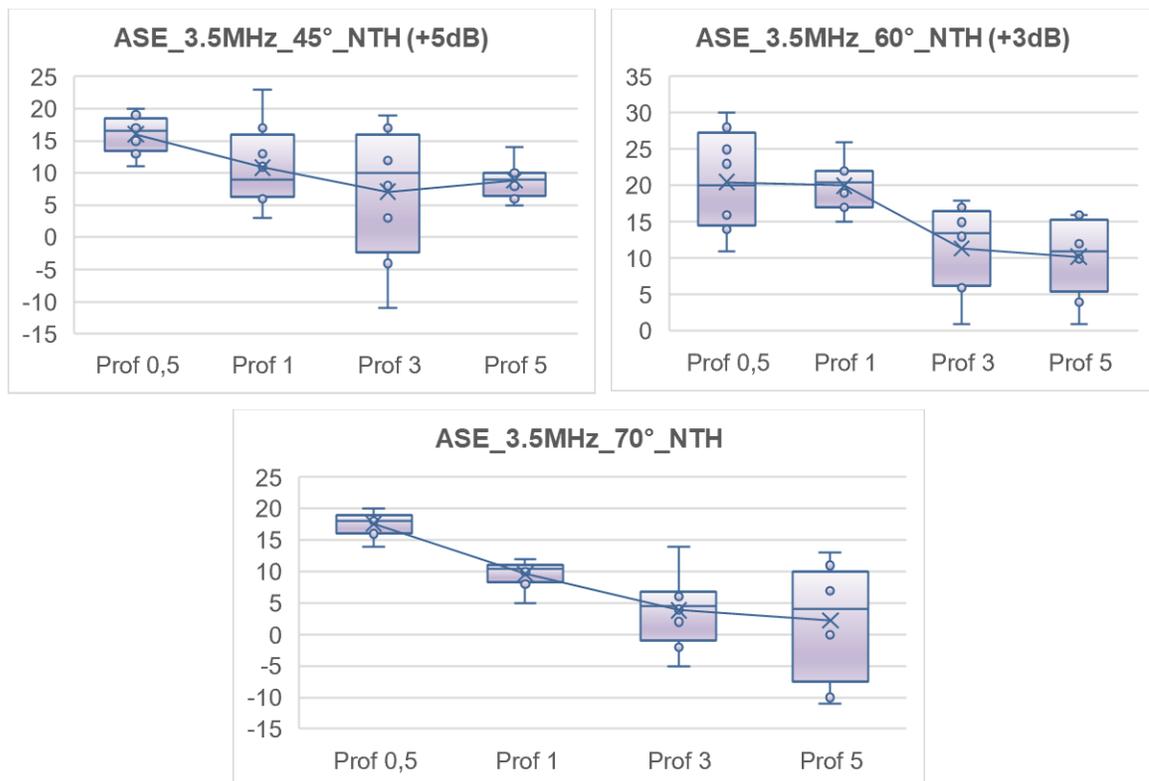
Además, los reflectores FBH de 0.5 mm no pudieron ser detectados con ángulos de 60° y 70°. Para un ángulo de 45° los reflectores de 0.5 mm no fueron detectados en seis de las ocho observaciones realizadas.

**Tabla 4-14:** Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores FBH.

PALP	TAMAÑO	MED±DESVT (σ) <sub>70°</sub>	MED±DESVT (σ) <sub>60°</sub>	MED±DESVT (σ) <sub>45°</sub>
<b>ASE_3.5MHz</b>	φ0.5 mm	No detectado	No detectado	35.0± 1.4 dB
	φ1 mm	26.0± 0 dB	32.0± 4.4 dB	34.4 ± 1.1 dB
	φ3 mm	29.7 ± 2.9 dB	25.0± 3.0 dB	31.3± 3.3 dB
	φ5 mm	23.2 ± 2.4 dB	20.4 ± 5.7 dB	28.0 ± 9.5 dB
	φ10 mm	13.8 ± 8.0 dB	19.8± 4.7 dB	26.8 ± 7.6 dB

La **Figura 4-30** que el valor medio de *d* obtenido para los reflectores NTH examinados con 45° cambia (tiende a ser más pequeño y negativo) con el aumento en la profundidad del reflector hasta los 3 mm, y esta tendencia se pierde con la profundidad de 5 mm. Para los ángulos de 60° y 70° se observa algo similar, aunque es más marcado para 70°.

**Figura 4-30:** Índice de la indicación vs. profundidad del reflector NTH (45°, 60° y 70°).



En el examen de los reflectores NTH se observa que para ángulos de 60° y 70° existe una mejor tendencia a que el valor de índice de la indicación disminuya con el aumento en la profundidad del reflector, lo cual es más notorio con el ángulo de 70°. También se observa

una alta dispersión en los datos obtenidos para el índice de la indicación en este tipo de reflector (véase la **Tabla 4-15**); la cuales genera imprecisiones a la hora de evaluar los reflectores artificiales o las discontinuidades naturales en el interior de la soldaduras, ya que permite que este adopte las cuatro clases (A, B, C o D) sin importar su profundidad.

**Tabla 4-15:** Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores NTH.

PALP	TAMAÑO	MED±DESVT ( $\sigma$ )_70°	MED±DESVT ( $\sigma$ )_60°	MED±DESVT ( $\sigma$ )_45°
ASE_3.5MHz	Prof. 0.5 mm	17.6 ± 2.1 dB	20.5 ± 6.9 dB	16.0 ± 3.0 dB
	Prof. 1 mm	9.6 ± 2.3 dB	20.0 ± 3.6 dB	10.9 ± 1.1 dB
	Prof. 3 mm	3.9 ± 5.8 dB	11.4 ± 6.0 dB	7.1 ± 10.5 dB
	Prof. 5 mm	2.3 ± 9.0 dB	10.3 ± 5.4 dB	8.9 ± 2.7 dB

La **Figura 4-31** muestra que el valor medio de  $d$  obtenido para los reflectores SDH (ubicados en el 50% del espesor y en 80% del espesor) tiende a disminuir con el aumento en el tamaño del reflector (altura) para  $\phi 3$  mm y  $\phi 5$  mm, los cuales tienen un tamaño mayor que el reflector de referencia.

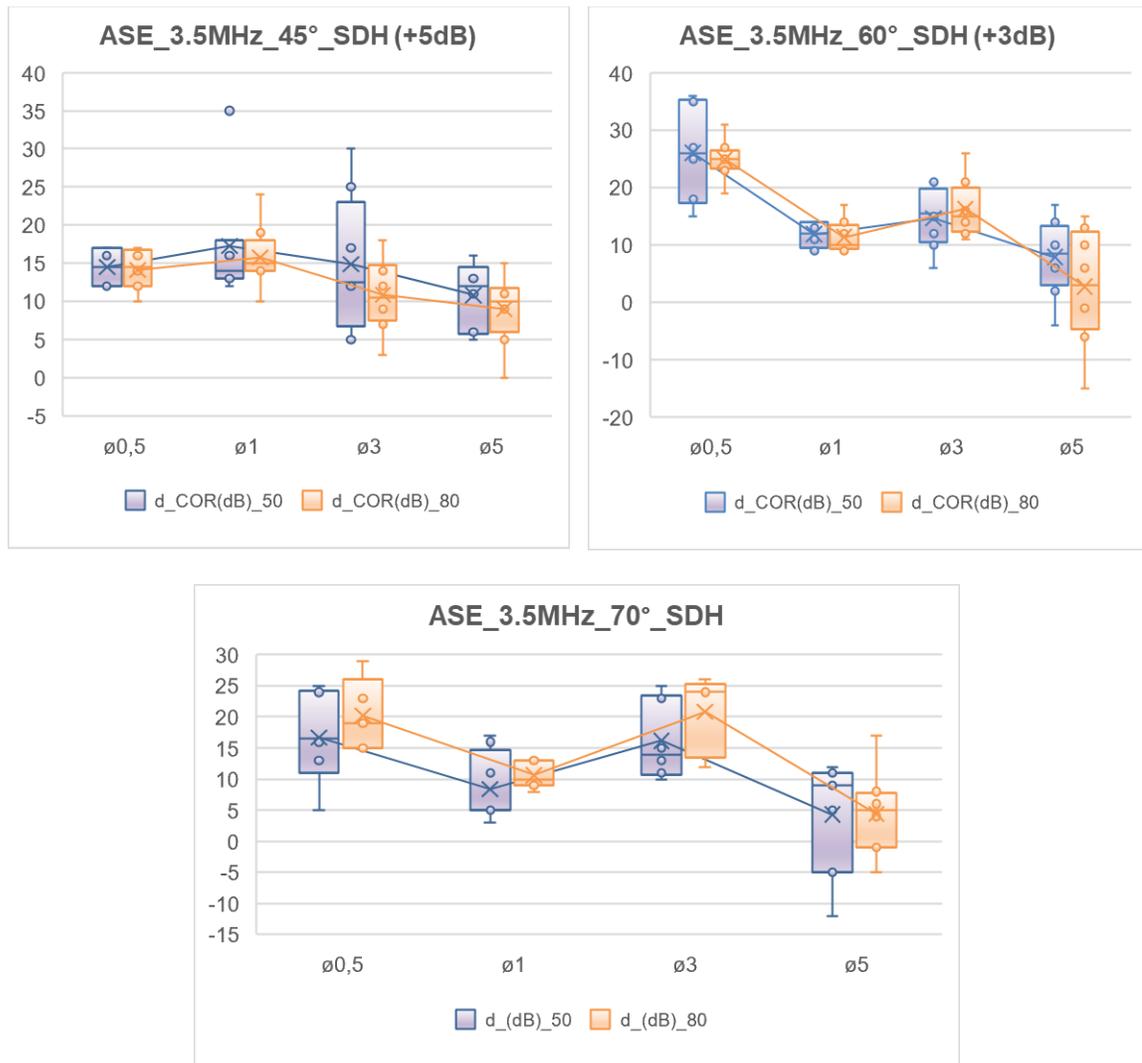
Tamaños de reflectores menores que el nivel de referencia también exponen esta tendencia aunque solo con ángulos de 60° y 70°; para 45° el nivel de indicación medio para 0.5 mm y 1 mm es similar. En el paso de 1 mm a 3 mm, la tendencia a que el índice de la indicación aumente desaparece con ángulos de 60° y 70°.

En el examen de los reflectores SDH se observa una mejor tendencia a que los reflectores de  $\phi 5$  mm se clasifiquen como A, es decir discontinuidades dañinas para la estructura. La dispersión de los datos, determinado con la desviación estándar, está entre 2.1 mm y 12.1 mm (véase la **Tabla 4-16**). Esta dispersión es un poco menor que la obtenida con el palpador AWS, sin embargo expone los mismos problemas que se han indicado previamente y es que se habilita que el reflector de clasifique en las cuatro clases y por tanto sea muy difícil establecer de forma consistente su severidad.

**Tabla 4-16:** Promedio y desviación estándar del índice de la indicación reflectores SDH con ASE.

REFLECTOR	TAMAÑO	MED±DESVT ( $\sigma$ )_70°	MED±DESVT ( $\sigma$ )_60°	MED±DESVT ( $\sigma$ )_45°
SDH_50	$\phi 0.5$ mm	16.7 ± 7.4 dB	26.0 ± 8.6 dB	14.5 ± 2.4 dB
	$\phi 1$ mm	8.4 ± 5.5 dB	11.9 ± 2.2 dB	17.3 ± 8.1 dB
	$\phi 3$ mm	16.2 ± 6.3 dB	14.6 ± 5.2 dB	14.9 ± 8.9 dB
	$\phi 5$ mm	4.3 ± 9.6 dB	7.9 ± 7.6 dB	10.8 ± 4.7 dB
SDH_80	$\phi 0.5$ mm	20.2 ± 5.9 dB	24.9 ± 3.4 dB	14.1 ± 2.6 dB
	$\phi 1$ mm	10.6 ± 2.1 dB	11.4 ± 2.8 dB	15.8 ± 4.1 dB
	$\phi 3$ mm	20.8 ± 6.1 dB	16.3 ± 5.1 dB	10.9 ± 4.8 dB
	$\phi 5$ mm	6.3 ± 7.2 dB	4.6 ± 12.1 dB	9.4 ± 5.0 dB

**Figura 4-31:** Índice de la indicación vs. diámetro del reflector SDH (45°, 60° y 70°).



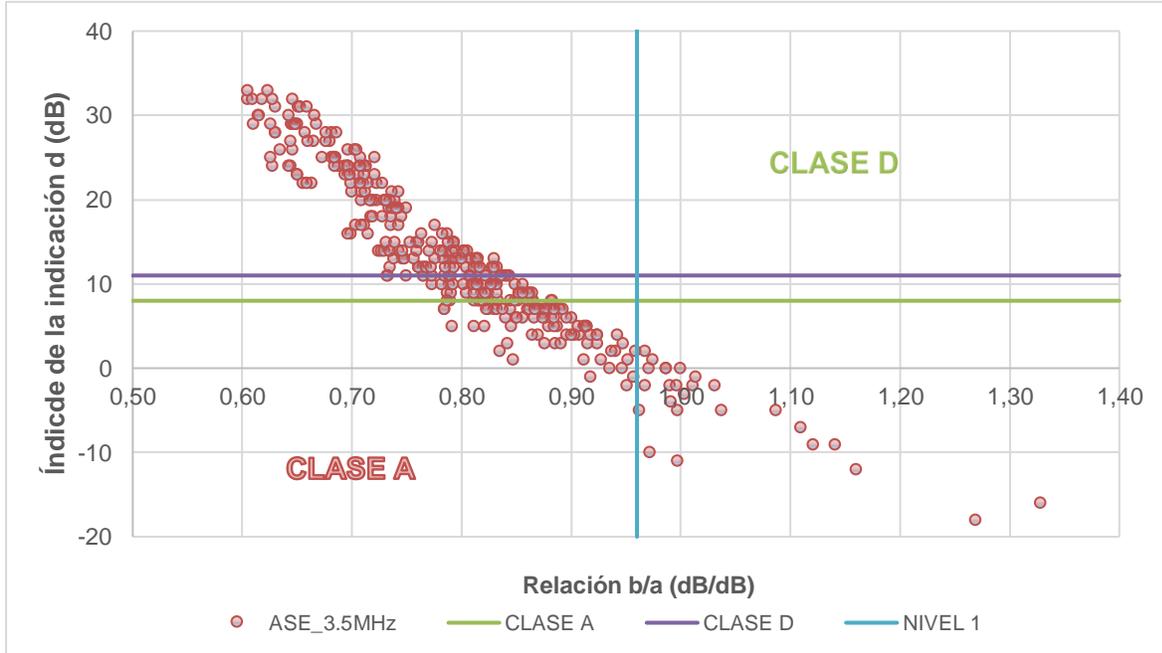
**4.3.2.2 Relación Nivel de referencia/ Nivel de la indicación (b/a)**

En la **Figura 4-32** se presenta la relación entre el *índice de la indicación* y el parámetro b/a sólo para el palpador ASE\_3.5 MHz. Este parámetro pretende mostrar cuáles reflectores artificiales presentaron respuestas mayores o menores que el nivel de referencia b del reflector SDH (ø1.5 mm y 25 mm de largo). Se consideraron acústicamente mayores cuando la relación b/a  $\geq 0.96$ . En esta gráfica los *índices de la indicación* d, obtenidos con ángulos de 60° y 45° no fueron corregidos con +3dB y +5dB, como se hizo con en las gráficas del numeral 4.2.2.1, pues no era necesario para el análisis, pues no se requería una clasificación particular de los valores en una clase de severidad.

En la **Figura 4-32** se puede ver que, la mayoría de los reflectores artificiales detectados (más del 80%), mostraron una respuesta “acústicamente menor” ( $b/a < 0.96$ ) que la del nivel de referencia; muy pocos reflectores mostraron respuestas acústicamente mayores

( $b/a \geq 0.96$ ) y estos se pueden visualizar en la **Tabla 4-17**. Un total de 26 datos tuvieron un  $b/a \geq 0.96$ , además, cerca del 20% de estos datos corresponden a reflectores examinados en segunda pierna.

**Figura 4-32:** Relación  $b/a$  versus el índice de la indicación  $d$  para el experimento 1.



**Tabla 4-17:** Reflectores con relaciones  $b/a \geq 0.96$  obtenidas con el palpador ASE del Experimento 2.

REFL	ANG.	TAMAÑO	OBSER	b/a	a_(dB)	d_(dB)
NTH	70°	Prof. 3 mm	1	1.00	66.1	-5
		Prof. 5 mm	2	0.97, 1.00	71.7, 69.9	-10, -11
	60°	Prof. 3 mm	1	0.99	59.3	-2
		Prof. 5 mm	1	1.00	58.9	-2
	45°	Prof. 1 mm	1	0.97	61.9	-2
		Prof. 3 mm	3	1.01, 1.33, 1.14	52.5, 45.1, 52.9	-2, -16, -9
Prof. 5 mm		2	0.97, 0.97	61.5	0, 1	
SDH_50	70°	φ 5 mm	2	1.16, 1.04	57.5, 64.3	-12, -5
	60°	φ 5 mm	2	1.11, 1.01	58.7, 59.7	-7, -1
	45°	φ 3 mm	1	0.99	60.7	0
		φ 5 mm	1	1.00	59.9	0
SDH_80	70°	φ 5 mm	4	0.96, 0.96	69.7, 69.3	-1, -5
	60°	φ 5 mm	4	1.12, 0.99, 1.27, 1.00	58.1, 65.7, 51.3, 60.3	-9, -4, -18, -3

REFL	ANG.	TAMAÑO	OBSER	b/a	a_(dB)	d_(dB)
	45°	φ 3 mm	2	0.99, 1.09	60.7, 55.1	0, -5
		φ 5 mm	2	1.03, 0.96	58.1, 62.5	-2, 2
<b>FBH</b>	45°	φ 5 mm	1	0.97	61.9	2

A partir de los datos de la **Tabla 4-17** se observó que:

- Aunque se nota una tendencia a que reflectores de más de 3 mm de altura (SDH y NTH) generen una respuesta acústica mayor al reflector de referencia SDH de φ 1.5 mm, la periodicidad con que ocurre este fenómeno es baja considerando las ocho observaciones que se hizo para cada tipo de reflector. Este fenómeno ocurrió en menos del 50% de los datos (4 de 8 observaciones). También se observaron algunos valores atípicos de 1 mm (de reflectores NTH) que generaron una respuesta acústica mayor al reflector de referencia, lo cual puede deberse más bien a imprecisiones en el punto de máxima amplitud.
- Contrario a lo que sucedió en el experimento 0, donde el palpador AWS /70° no pudo generar respuestas acústicamente mayores al nivel de referencia (valores de  $b/a \geq 0.96$ ) para entallas con alturas mayores a 3 mm, con el palpador ASE/70° esto si fue posible, aunque en una baja frecuencia.

Para lograr valores  $b/a \geq 0.96$ , el mínimo valor del nivel de la indicación requerido fue de 1dB, este valor habilita al reflector para que se clasifique como "A", si se consideran los criterios de aceptación para 70° y una condición de esfuerzos de tracción. En vista de que se obtuvieron probabilidades menores al 50% para lograr que un reflector de más de 3 mm genere una respuesta acústicamente mayor que el nivel de referencia, es posible indicar que, sin importar el tipo de palpador que se emplee (ROUND, AWS o ASE), el *índice de la indicación* no es un parámetro confiable y seguro para establecer la altura de la discontinuidad y por tanto su severidad en la estructura.

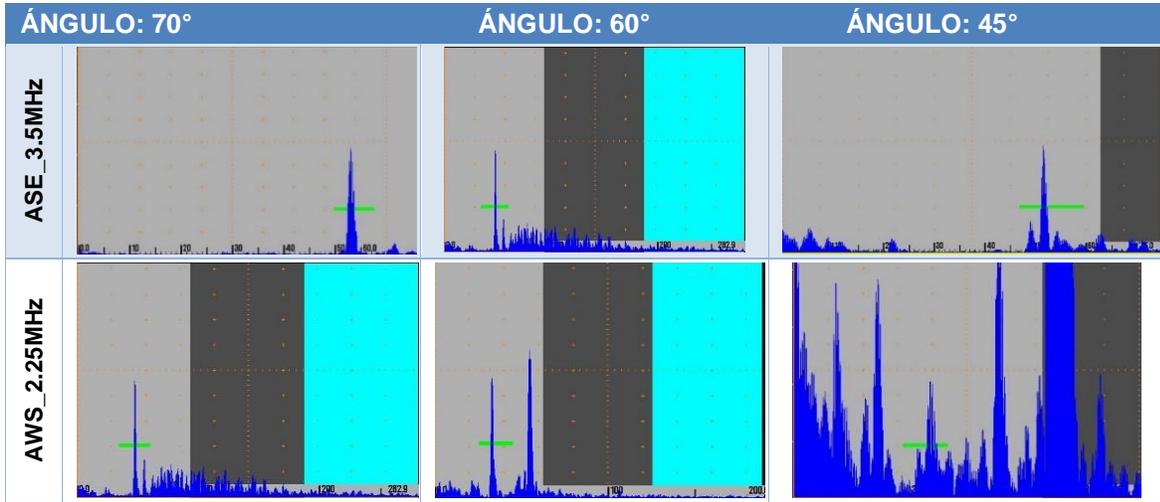
### 4.3.3 Forma del eco de los reflectores artificiales

En la **Tabla 4-18**, **Tabla 4-19**, **Tabla 4-20** se presentan algunas imágenes obtenidas para los tres tipos de reflectores, de un tamaño de 5 mm examinados con los tres ángulos y los dos transductores empleados en el experimento 2 (AWS y aserrado de 3.5MHz). El eje horizontal de las figuras corresponde a la distancia a la cual se registró la señal en milímetros, y el eje vertical al % en la altura del eco.

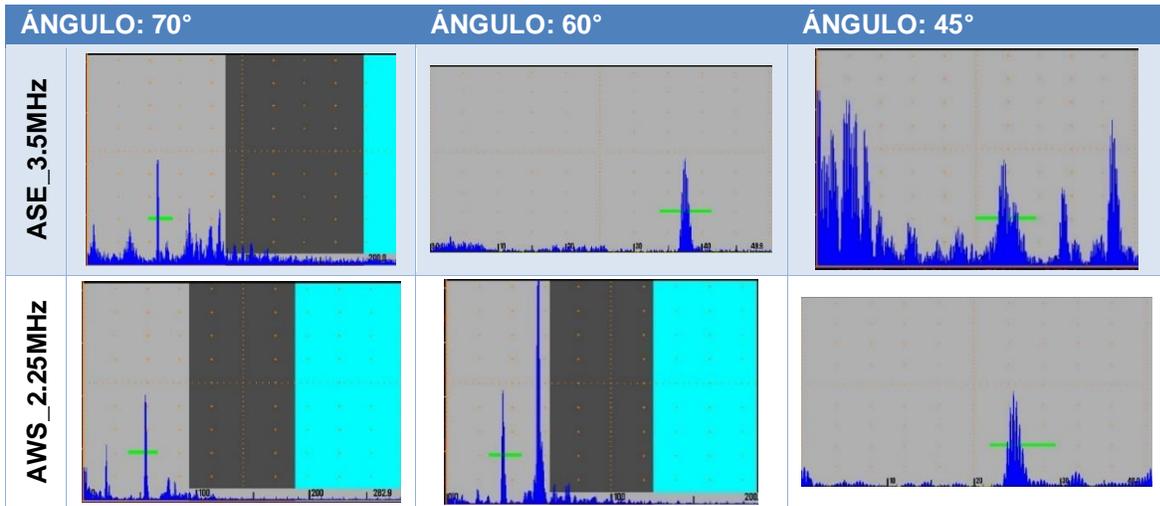
Cuando se comparan las respuestas para los tres ángulos de incidencia y los dos tipos de transductores se pueden notar algunas diferencias muy leves en los ecos del reflector SDH de φ5 mm que se hacen más anchos con ángulos de 45°. Sin embargo tales diferencias no son lo suficientemente determinantes o significativas para permitir que este parámetro defina inequívocamente el tipo de reflector para cada transductor y ángulo de incidencia. De manera similar sucede para los ecos del reflector FBH y NTH.

No fue posible establecer una correlación entre la forma del eco con el tipo y tamaño de los reflectores artificiales utilizados en este estudio.

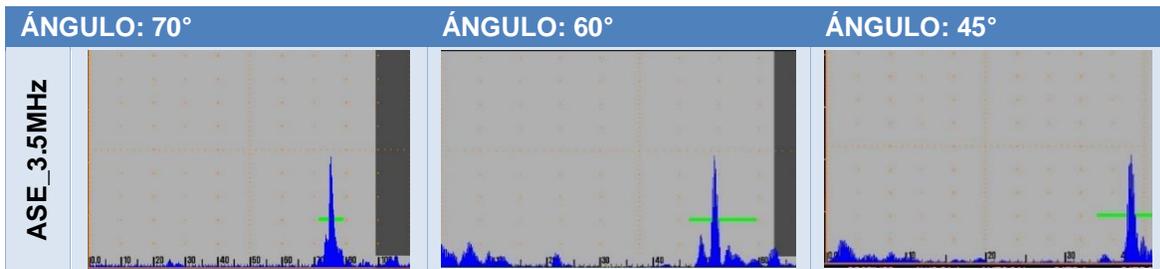
**Tabla 4-18:** Forma del eco reflector SDH-5 mm.

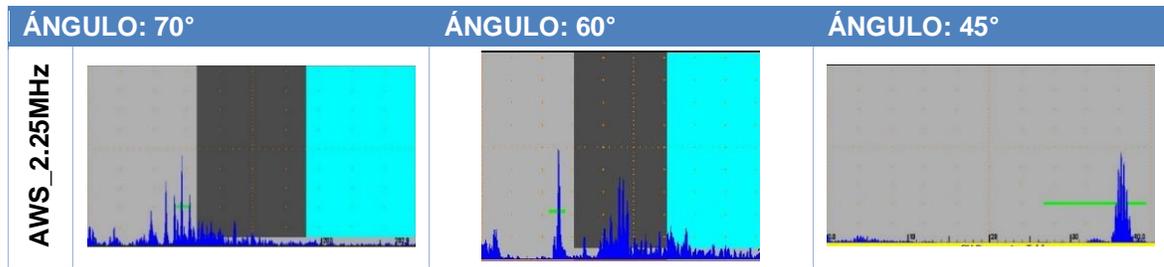


**Tabla 4-19:** Forma del eco reflector FBH-5 mm.



**Tabla 4-20:** Forma del eco reflector NTH-5 mm.





#### 4.4 COMPARACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS 0, 1 Y 2

En esta parte de la investigación se hace una evaluación de todos los datos obtenidos en los Experimentos “0”, “1” y “2”, que corresponden a un total de 1224 observaciones (sin incluir los datos del reflector FBH\_L), de las cuales 408 corresponden a las verificaciones con el palpador AWS\_2.25; 408 a las verificaciones con el palpador ASE\_3.5 y 408 a las verificaciones con el palpador ROUN\_2.25 (considerando ocho mediciones para cada tamaño y tipo de reflector: dos niveles de escaneo, dos distancias reflector-palpador y dos réplicas).

Debido a la gran cantidad de variables utilizadas, los gráficos de esta sección se levantaron, después del procesamiento de los datos, mediante las librerías Seaborn y Matplotlib del lenguaje de programación PYTHON (versión 3.9), tal y como se mencionó en la metodología experimental. Debido a que permitían realizar comparaciones en simultáneo de una forma más rápida.

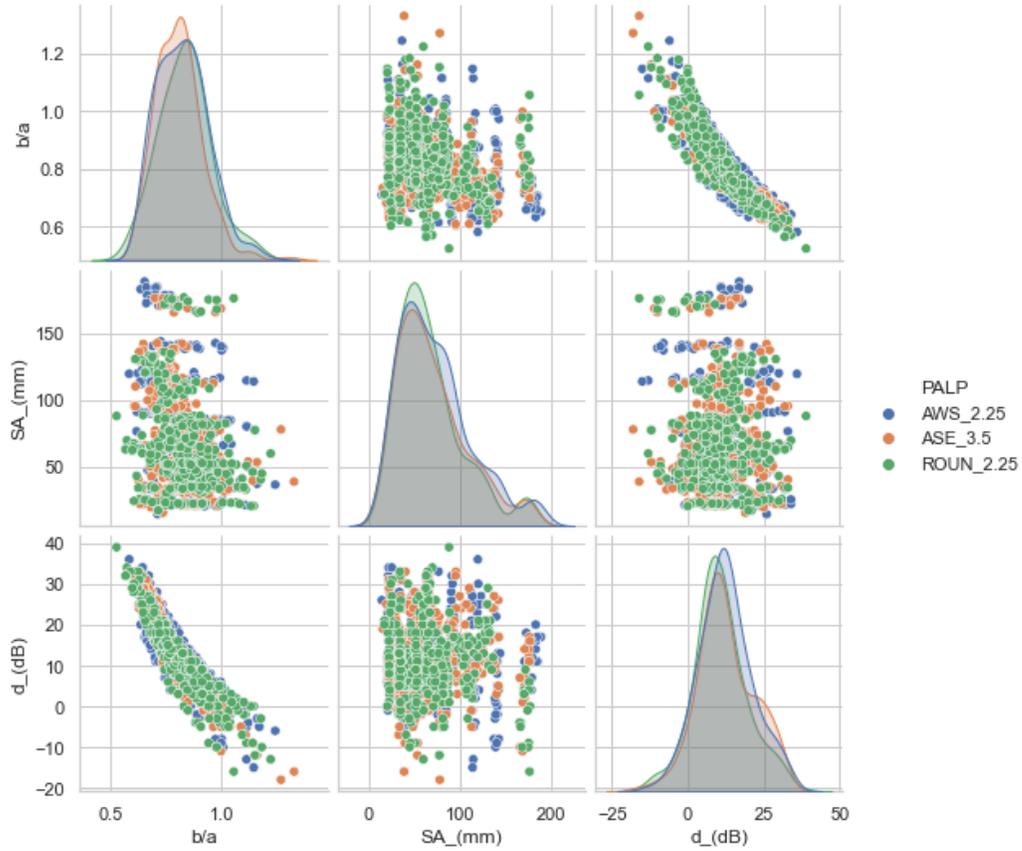
##### 4.4.1 Incidencia del palpador en la capacidad de detección y evaluación

La **Figura 4-33** muestra una matriz de diagramas que relaciona las variables distancia del sonido (SA), el índice de la indicación “d” en dB y la relación b/a (dB/dB) tratada en los análisis de capacidad de evaluación de cada experimento. Esta matriz, muestra gráficos de densidad de los datos (de kernel) para las variables b/a, SA (distancia del sonido) y d (índice de la indicación), ubicados en la diagonal principal (que va desde el vértice superior derecho hasta el inferior izquierdo) y gráficos de dispersión en las otras casillas para la combinación de las variables analizadas y agrupados por tipo de palpador.

En la referida figura también se evidencia que no existe una tendencia marcada a que los datos varíen con el cambio en el tipo de palpador (AWS, ROUND y ASERRADO), al menos no, de forma general. Esto se puede ver, como ejemplo, en el gráfico de “d vs. d” (vértice inferior izquierdo) que muestra que el índice de la indicación tiene una distribución casi normal para los tres tipos de palpadores, con una forma muy similar, y que, además, alcanza valores promedios, medias, medianas y desviaciones estándar bastante similares.

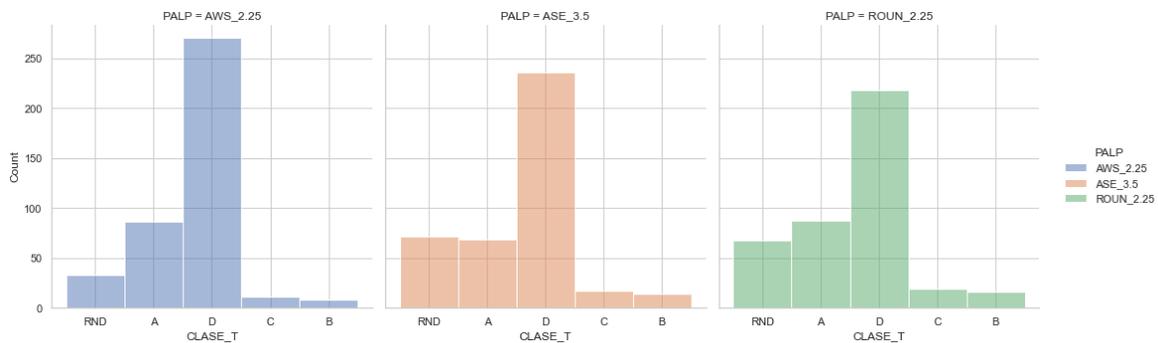
En consecuencia la variación en el tipo de palpador no parece mejorar ni empeorar la capacidad de evaluación de los reflectores (índice de la indicación) del método de ultrasonido establecido por la AWS. De lo anterior, es posible suponer que un cambio en el tipo de palpador podría ser aceptable, si se evalúan bien las necesidades de los componentes que se vayan a examinar y se determinan criterios de aceptación adecuados.

**Figura 4-33:** Matriz de datos para las variables SA, d y b/a y los tres palpadores.



En relación con la capacidad de detección de los tres palpadores, la **Figura 4-34** presenta los histogramas de la clasificación de los reflectores para los tres tipos de palpadores empleados en el estudio. En los histogramas es posible ver que el palpador AWS presenta la mejor capacidad de detección (menor número de RNDs), seguido del palpador ROUND\_2.25 MHz y, por último, del palpador ASE\_3.5 MHz. Puede notarse también que la mayoría de los reflectores detectados con los tres palpadores se clasifican como D (menores y aceptables), seguidos de la clase A (grandes y rechazables); las clases B y C son muy pocas.

**Figura 4-34:** Capacidad de detección tipo de palpador.



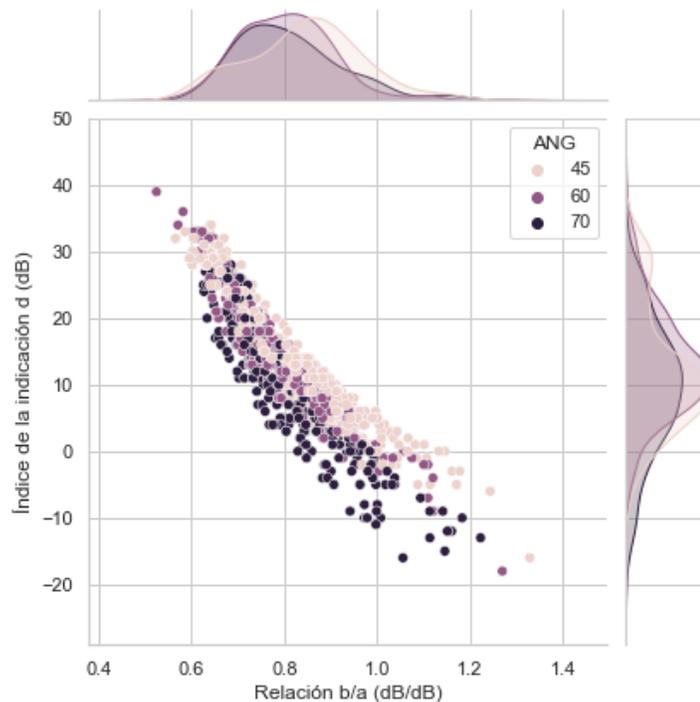
La mayor capacidad de detección del palpador AWS estándar se puede deber al tamaño y forma del cristal, que producen un haz ultrasónico angular que parece ser ideal para las distancias con las que se examinan típicamente los espesores de fabricación empleados en la industria de los puentes metálicos.

#### 4.4.2 El ángulo y su incidencia en la capacidad de evaluación y detección

La **Figura 4-35** muestra un diagrama de dispersión para el índice de la indicación  $d$  (dB) vs. la relación  $b/a$  (dB/dB), para los tres ángulos de incidencia empleados en la investigación (acá se incluyen los datos obtenidos para los tres tipos de palpadores). También se muestran los diagramas de densidad para esas dos variables arriba y a la derecha del gráfico de dispersión. Vale la pena anotar que en este caso se usaron los valores de “ $d$ ” sin corrección, es decir para los datos obtenidos con ángulos de  $45^\circ$  y  $60^\circ$  no se aumentó el índice de la indicación en 3 dB y 5dB. Por lo que estos datos corresponden a la respuesta real obtenida en el examen.

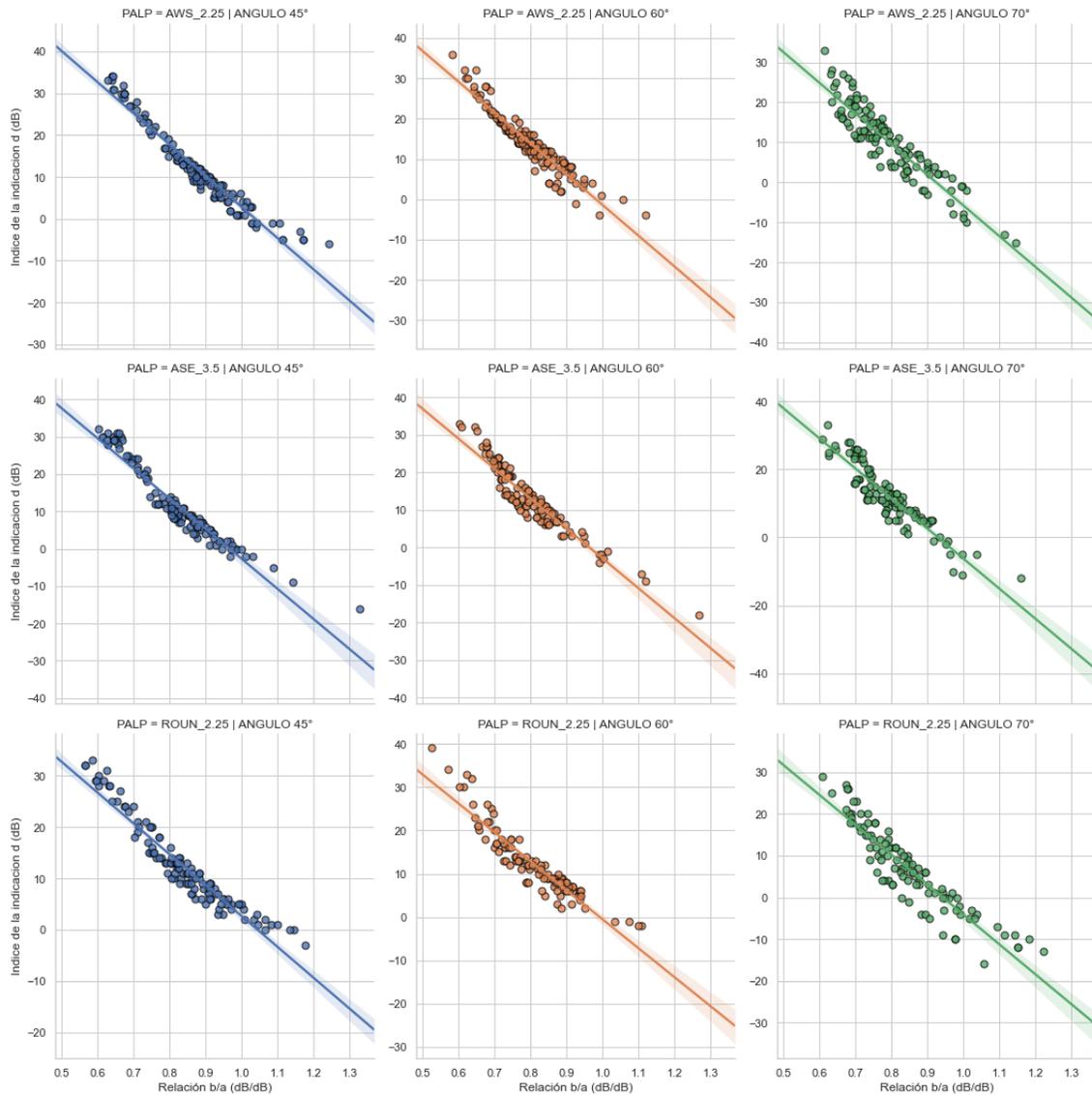
De esta figura es posible ver que la distribución de los datos obtenidos para todos los reflectores usados en este estudio con un ángulo de incidencia de  $70^\circ$  presenten un índice de la indicación un poco más bajo que los obtenidos con  $60^\circ$  y  $45^\circ$ . De hecho, es posible ver que los valores de “ $d$ ” son mayores para  $45^\circ$ , seguidos de los datos de  $60^\circ$  unos decibeles más abajo y, finalmente, los de  $70^\circ$ . Además las distribuciones de los datos considerando esta clasificación (ángulo de incidencia) son igualmente diferentes para los tres tipos de ángulos empleados.

**Figura 4-35:** Influencia del ángulo de examen en el índice de la indicación.



Con el fin de complementar el análisis de la influencia del ángulo de inspección en el procedimiento de UT, se presentan, en la **Figura 4-36**, diagramas del índice de la indicación vs. la relación b/a para cada ángulo de incidencia y tipo de palpador. Se adicionan las líneas de regresión lineal, usadas como referencia para establecer mejor cuál sería la diferencia aproximada del índice de la indicación a medida que se cambia el ángulo y el tipo de palpador.

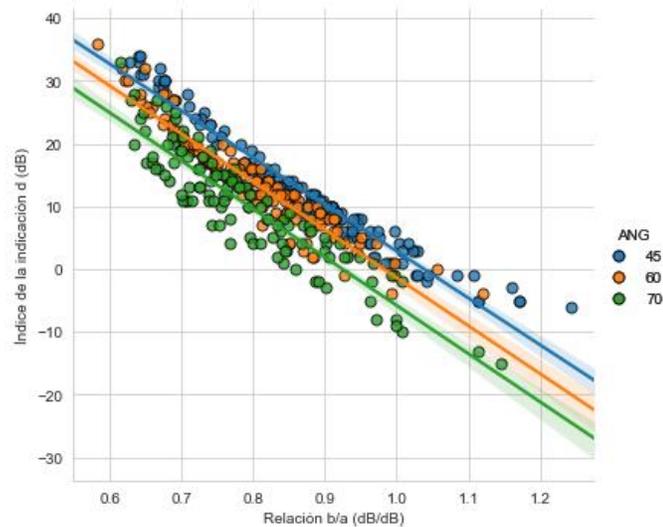
**Figura 4-36:** Diagramas de dispersión por el ángulo incidencia y tipo de palpador.



Si se analiza el caso puntual del palpador AWS\_2.25 MHz, se evidencia que existe una diferencia de unos +8 dB entre la línea de tendencia de “d” obtenida con el ángulo de 70° y la obtenida con 45°, tal como se ilustra en la **Figura 4-37**. Las líneas de tendencia entre el ángulo de 60° y el de 70°, difieren aproximadamente +4 dB, lo cual también puede ser visto en la **Figura 4-37**.

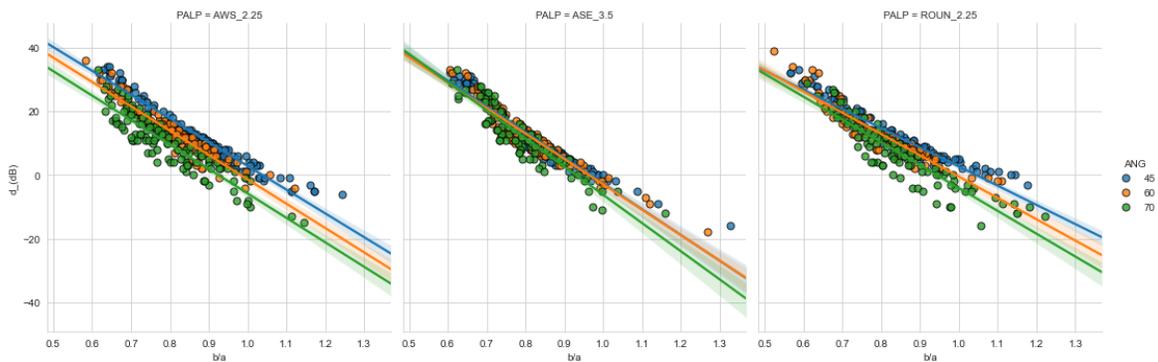
Esto muestra que los reflectores si exhiben respuestas diferenciales con el palpador AWS cuando se emplean ángulos de 70°, 60° y 45° (antes de que se realice una corrección a los datos para poder considerar una clasificación), lo cual demuestra que la aproximación de la AWS es válida, sin embargo, en este caso se observaron valores un poco más altos que los propuestos por la AWS para establecer la diferencia en la severidad (de +3dB cuando se usa 60° y +5dB cuando se usa 45° tal como se expresó en el numeral 2.1.1.3 Evaluación de la indicación). Los valores encontrados para los ángulos de 60° y 45° fueron +1dB y +3dB mayores que los establecidos por la AWS

**Figura 4-37:** Tendencia de “d” para 45°, 60° y 70° y el palpador AWS.



En la **Figura 4-38** se muestra las tres líneas de tendencia para los tres ángulos, en los tres tipos de palpadores usados en la investigación, en la que se puede ver que la tendencia expuesta por el palpador AWS no se presenta tan nítidamente en los otros dos palpadores.

**Figura 4-38:** Comparación de las líneas de tendencia de “d” para 45°, 60° y 70° con los palpadores AWS, ASE y ROUND.



El palpador ROUND es el que más se aproxima, sin embargo las diferencias en las respuestas con los diferentes ángulos son más pequeñas y tienden a ser similares a medida que la relación b/a se hace menor. Lo que podría indicar que a medida que el

reflector disminuye de tamaño, la respuesta de este, tiende a ser similar sin importar el ángulo con el que se examine.

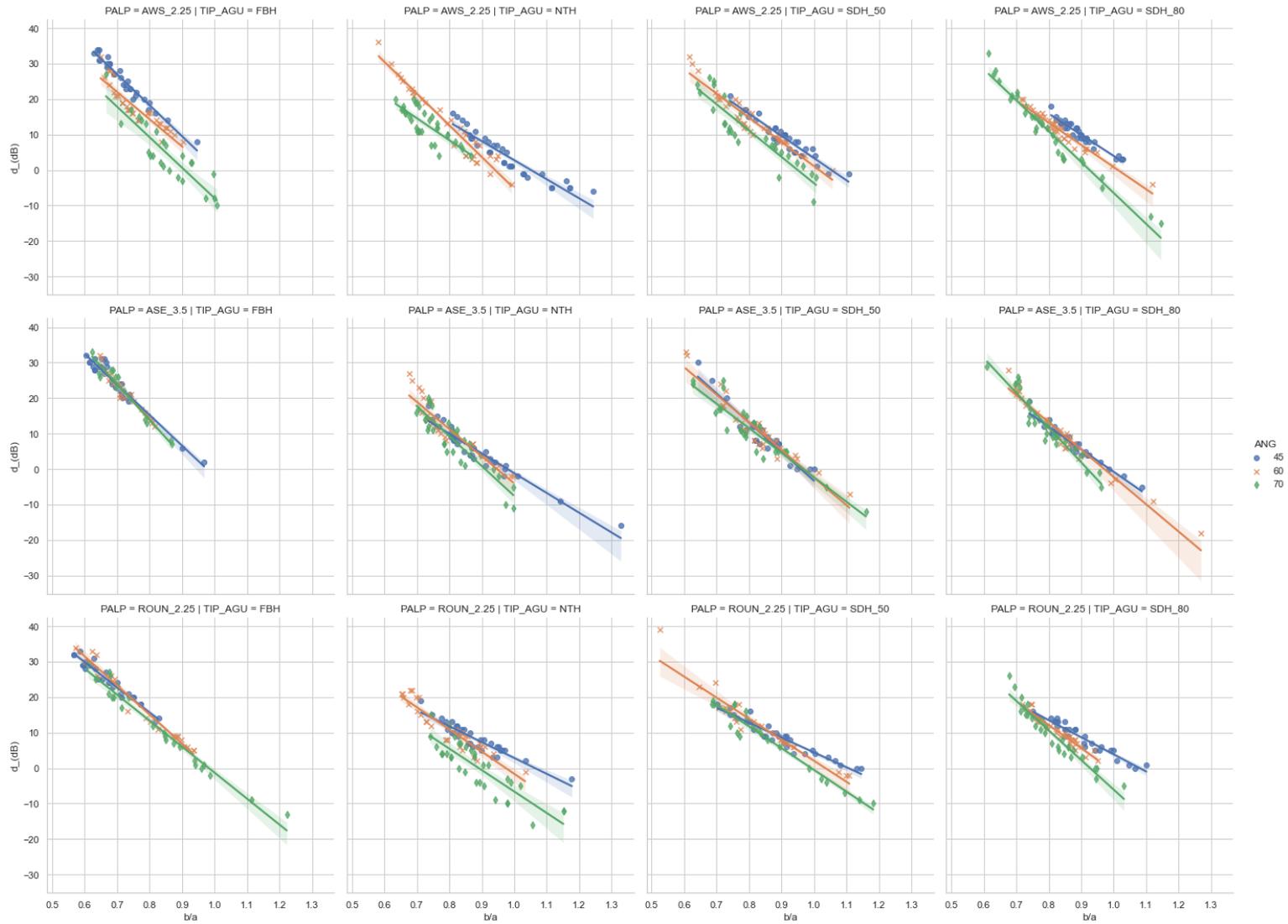
El cambio en el ángulo de incidencia en el procedimiento prescriptivo de la AWS puede llegar a ser aceptable siempre y cuando se establezcan criterios de severidad adecuados para estos ángulos. Se podría considerar los propuestos en esta investigación, los del AWS u otros obtenidos de otras investigaciones.

El cambio en el tipo de palpador no parece generar problemas en la respuestas (índice de la indicación) obtenidas con los diferentes reflectores, sin embargo lo que se nota es que las respuestas obtenidas al variar el ángulo de examen tienden a ser más similares con palpadores ASE y ROUND que cuando se usa el palpador AWS. Esto podría representar ventajas para unos pues permitiría tener más flexibilidad en el procedimiento y desventajas para otros ya que sería más complejo establecer niveles de severidad.

Como un análisis adicional de esta parte en la **Figura 4-39** se muestra la tendencia que presenta el *índice de la indicación* para cambios en el ángulo de incidencia y en el tipo de palpador para cada tipo de reflector empleado en la investigación. En esta figura, se ve que la tendencia mostrada en la **Figura 4-37** se mantiene por tipo de reflector para el palpador AWS. Para el palpador ASE, no existe una buena distinción entre las respuestas obtenidas con 45°, 60° y 70°, es decir el ángulo no influye en el índice de la indicación obtenido para determinado tipo de reflector. Para este palpador, también es posible indicar que sin importar si el reflector es planar o volumétrico las respuestas obtenidas con los tres ángulos no varían.

En el caso del palpador ROUND, solo cuando se examinan reflectores NTH y SDH (con relaciones grandes de b/a) se observa una distinción en las respuestas obtenidas con los tres ángulos de incidencia, las cuales además varían si corresponden a reflectores volumétricos o planares.

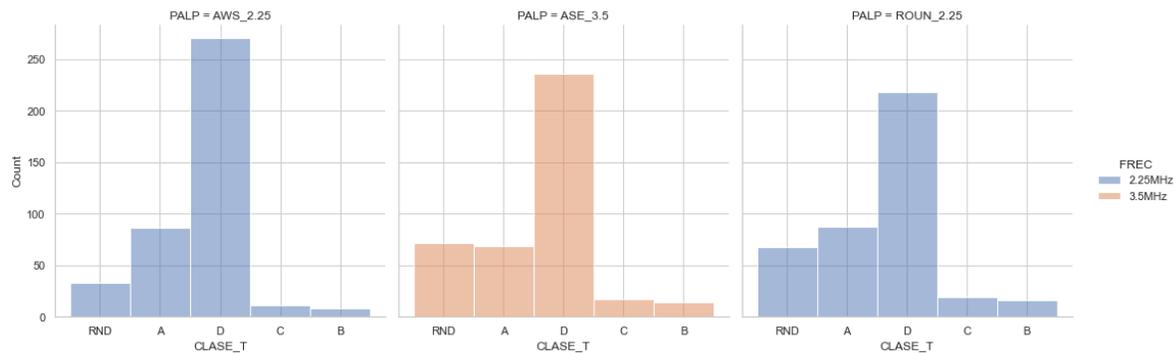
Figura 4-39: variación de los niveles de la indicación por tipo de reflector, palpador y ángulo de incidencia.



### 4.4.3 Incidencia de la frecuencia en la capacidad de detección y evaluación

Respecto a la incidencia de la frecuencia en la capacidad de detección, la **Figura 4-40** muestra un histograma de la distribución de la clasificación de los reflectores artificiales (A, B, C y D) y RNDs por tipo de palpador y frecuencia. De esta gráfica es posible ver que el aumento en la frecuencia no mejoró la capacidad de detección del procedimiento ya que esta no solo depende de la frecuencia sino también del tamaño y la geometría del cristal. Nótese que el número de RNDs con el palpador AWS\_2.25 MHz es inferior al número de RNDs con palpador ASE\_3.5 MHz.

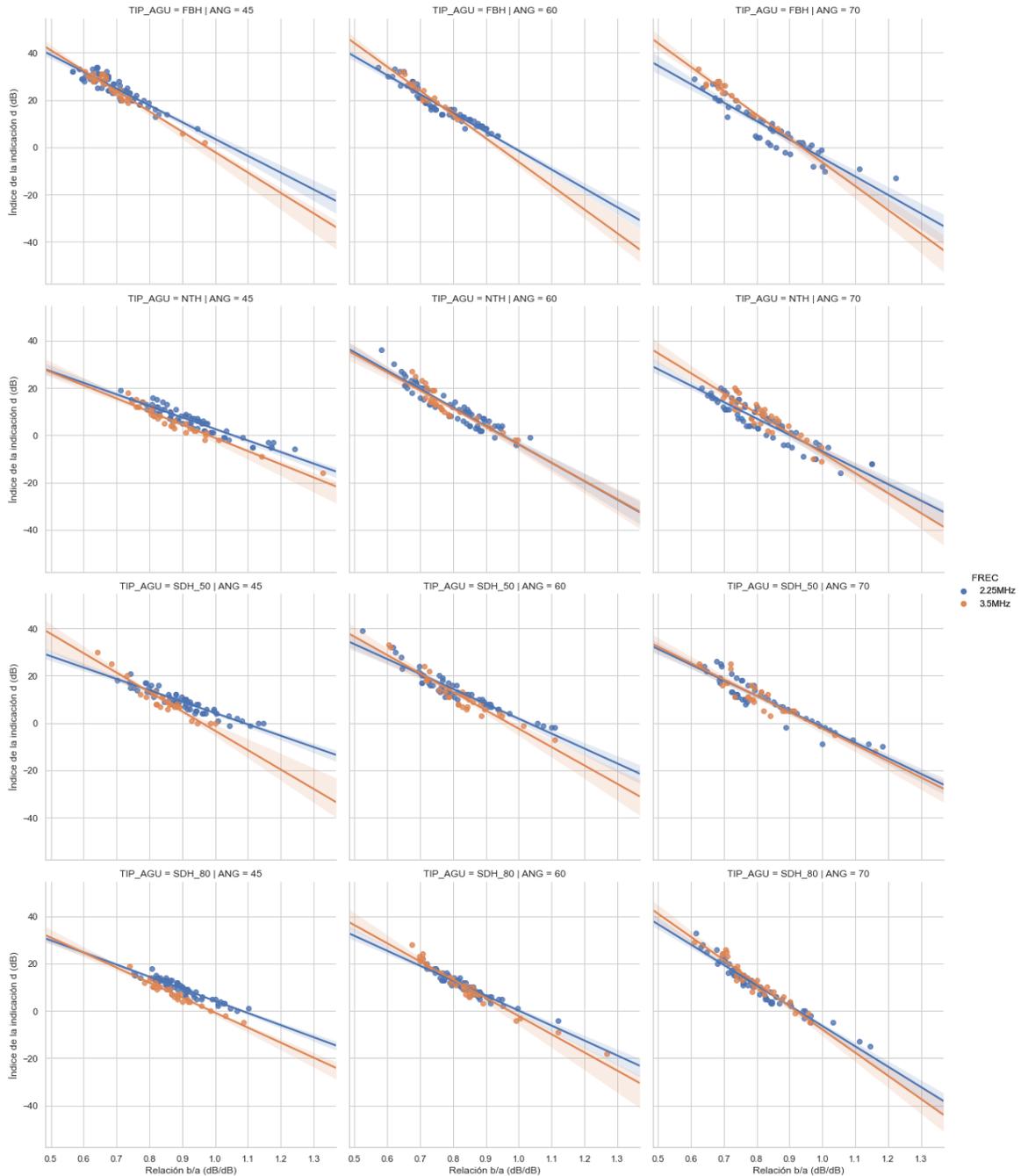
**Figura 4-40:** Histograma de detección para las dos frecuencias empleadas.



En la **Figura 4-41** se presenta una matriz de gráficas que muestra cómo cambia la respuesta del índice de la indicación vs. el parámetro  $b/a$  con el cambio en la frecuencia, para los tres ángulos de incidencia (ubicados en las filas) y los cuatro tipos de reflectores artificiales principales (ubicados en las columnas) que son FBH, NTH, SDH\_50 y SDH\_80. La matriz se incluye con el fin de mostrar, de forma general, cómo es que la frecuencia influye en la capacidad de evaluación del método para los diferentes tipos de reflectores.

En esta gráfica se puede observar que, dependiendo del valor de la relación  $b/a$ , los índices de la indicación obtenidos con frecuencia de 2.25 MHz pueden ser similares a los obtenidos con 3.5MHz, y en otros casos son diferentes. Lo que se puede observar de forma general es que, a medida que aumenta el valor  $b/a$  (menores valores de "d"), la frecuencia de 3.5 MHz tiende a generar un índice de la discontinuidad más pequeño (más severo) que el obtenido con la frecuencia de 2.25 MHz. En contadas excepciones, algunos tipos de reflectores y ángulos de examen generaron respuestas similares tanto en frecuencias de 2.25 MHz como en frecuencias de 3.5 MHz, como sucede con el reflector NTH examinado con 60°.

**Figura 4-41:** Incidencia de la frecuencia el índice la indicación vs. el parámetro b/a para cada tipo de reflector y ángulo de examen.

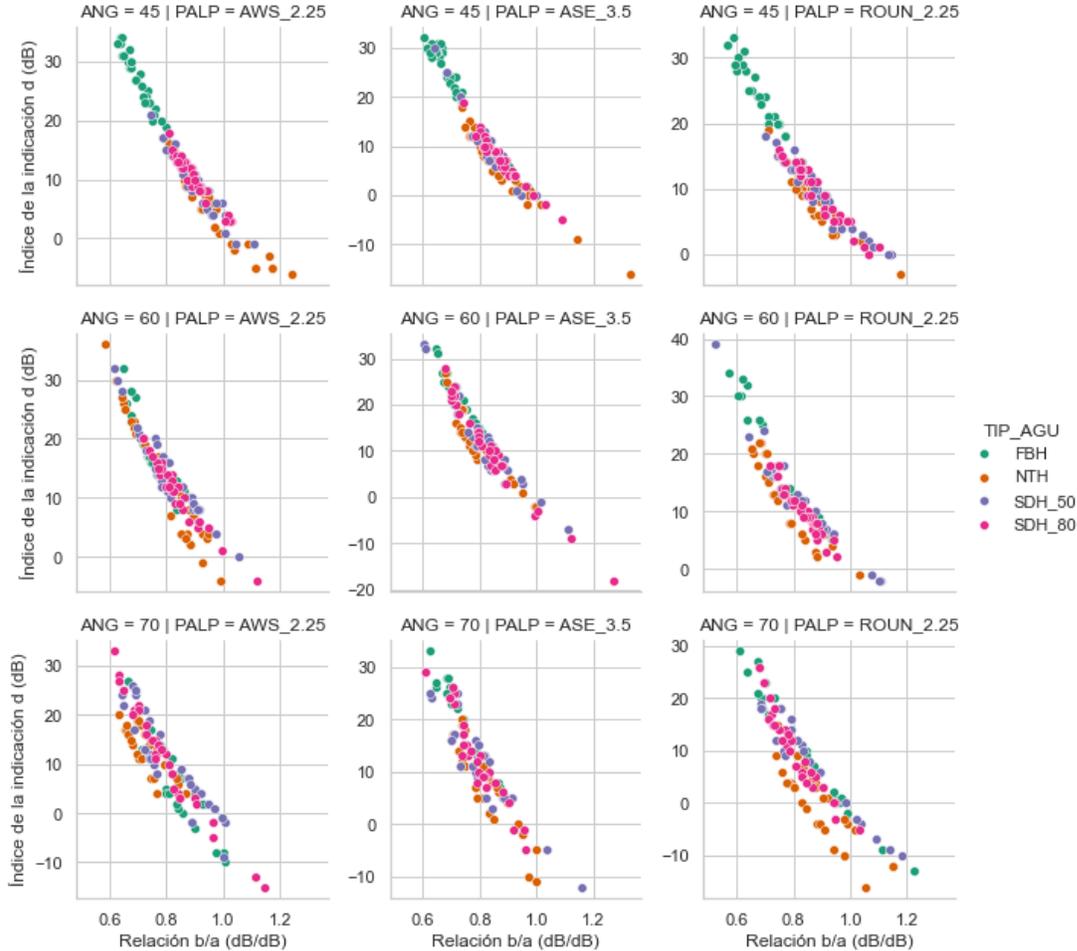


#### 4.4.4 Incidencia del tipo de reflector y tamaño en el *índice de la indicación*

La **Figura 4-42** muestra las curvas del índice de la indicación “d” vs. la relación b/a discriminados para cada tipo de reflector artificial usado en la investigación. En las filas se encuentran los gráficos variando el tipo de palpador de izquierda a derecha (AWS, ASE y

ROUND); en las columnas se muestran los gráficos variando el ángulo de incidencia de arriba abajo (45, 60 y 70°).

**Figura 4-42:** índice de la indicación versus relación b/a para cada tipo de reflector considerando los tres ángulos y tipos de palpador.



La figura anterior muestra que:

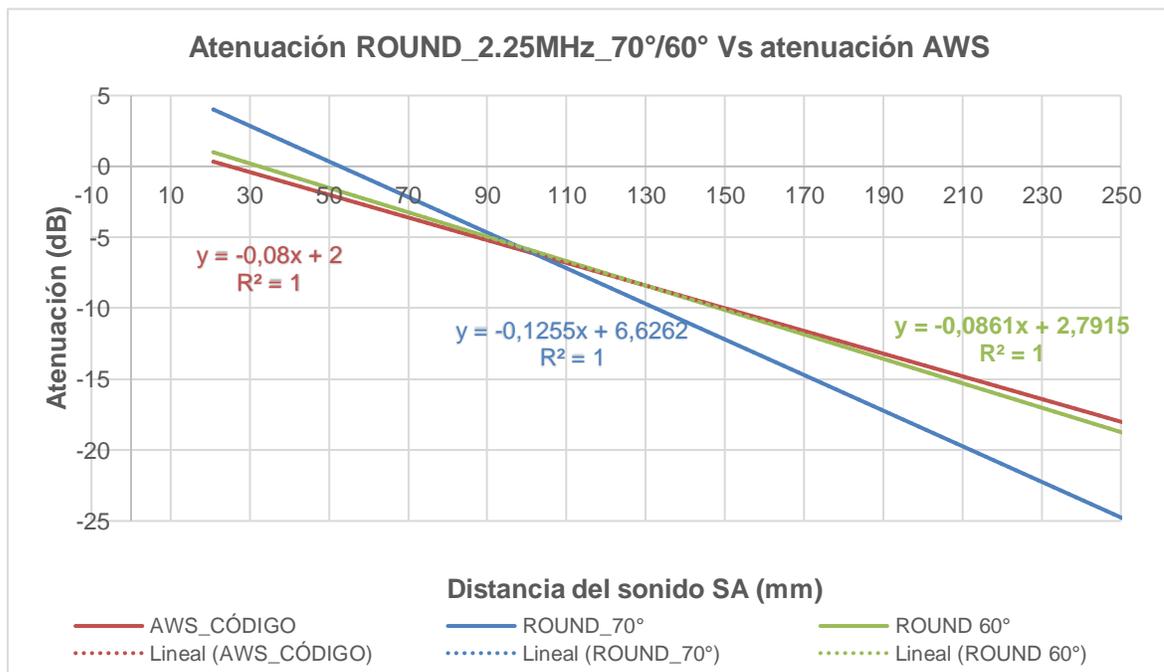
- Con ángulos de incidencia de 45°, los reflectores FBH tienden a exhibir un índice de la indicación más grande y, por tanto, menos severo que cuando se emplea un ángulo de 70°. Además con el ángulo de 45° se observa menos dispersión que con los otros ángulos de incidencia.
- Los reflectores SDH examinados en ambas posiciones a través del espesor (50% y 80%) exhiben respuestas similares por ángulo particular de examen. Sin embargo, esto tiende a cambiar con el aumento en el ángulo de incidencia así: a medida que se aumenta el ángulo la curva tiende a inclinarse un poco más (aumentar la pendiente) y aumentar el índice de la indicación (disminuir la severidad de la discontinuidad). Esto se observa para los tres tipos de palpadores.

- Las entallas o NTH exhibieron un comportamiento similar a los reflectores SDH, con algunas diferencias en el examen con palpador AWS/70°, en la que los datos (puntos naranja) se alejan un poco de la tendencia de todo el conjunto de datos.

#### 4.5 ANÁLISIS DE ATENUACIÓN CON BLOQUE

La última evaluación realizada corresponde a la verificación de la atenuación que se hizo para dos ángulos (60° y 70°) y con el palpador ROUND, para lo cual se empleó el bloque de atenuación que se presenta en el Anexo C. En la **Figura 4-43** se muestran los resultados (curva de atenuación distancia del sonido versus atenuación en dB) para el palpador ROUND con los ángulos de 60° y 70° y la curva de atenuación de la AWS (en rojo) que surge a partir de la ecuación 18 que se presentó en el numeral 2.1.1.2 Examen de las soldaduras del presente estudio.

**Figura 4-43:** Atenuación obtenida con bloque diseñado para el estudio.



De la gráfica es posible ver que sólo en el caso del ángulo de 60° se obtuvo una atenuación de 0.0861 dB/mm (2.2 dB/in), que es similar a la que indica el AWS (2dB/in). Para el ángulo de 70° la atenuación fue un poco mayor de 0.1255 dB/mm (3.2 dB/in). Estos valores, son además similares a los obtenidos en otras investigaciones tal y como se indicó en el numeral 2.2.1.4 Atenuación del sonido lineal (2 dB/in).

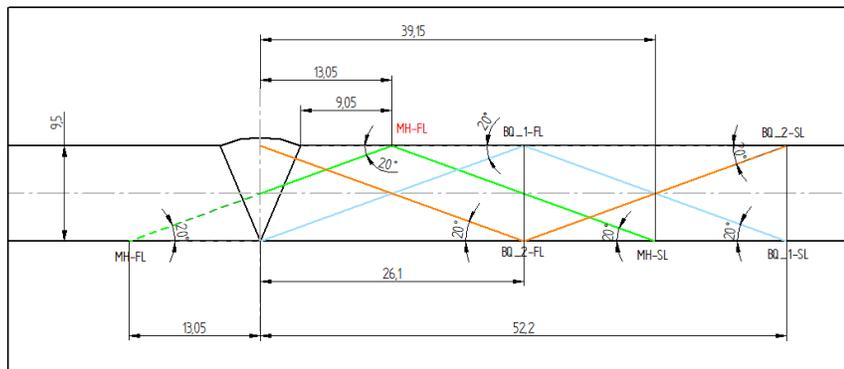
Estas diferencias implican, que tal como lo han indicado otros autores, la AWS debe replantear la forma de estimar la atenuación, pues podría llegar a ser imprecisa, más aún en vista de que sólo 3dB separan las clase A, B, C y D.

## 4.6 EXPERIMENTO CON DISCONTINUIDADES NATURALES

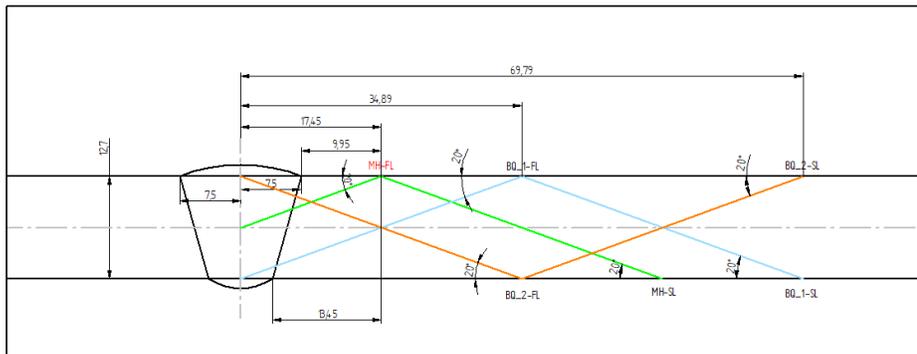
### 4.6.1 Análisis del espacio disponible

En la **Figura 4-44** y en la **Figura 4-45** se presentan dos mapas que analizan las regiones soldadas evaluadas (cuarto superior/inferior y parte central) para el cupón de 9.5 mm de espesor (designado como P3) y para el de 12,7 mm de espesor (designado como P10). Las líneas verdes muestran el recorrido del haz para el examen de la parte media de la soldadura; las líneas naranja muestran el recorrido para el cuarto superior y las líneas azul claro para el cuarto inferior (zona de la raíz).

**Figura 4-44:** Mapa del recorrido del haz ultrasónico para el cupón P3 y un ángulo de  $70^\circ$ .

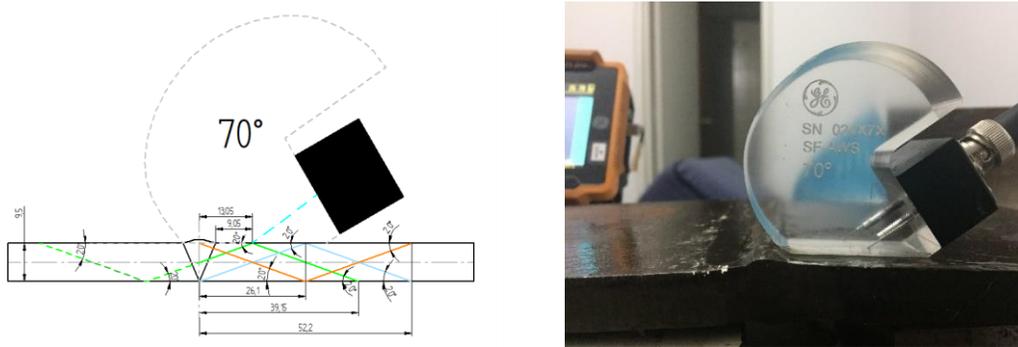


**Figura 4-45:** Mapa del recorrido del haz ultrasónico para el cupón P10 y un ángulo de  $70^\circ$ .



De este análisis fue posible ver que ninguna de las zapatas: las tipo AWS, las tipo aserradas y las del palpador miniatura, tenían un tamaño (distancia desde la salida del haz al borde de la zapata) que permitiera examinar la parte central de la soldadura, en primera pierna, sin que se requiriera la remoción del refuerzo de la soldadura. Esta distancia debía ser del orden de 9.5 mm para el ángulo de  $70^\circ$  y 4.75 mm para el ángulo de  $45^\circ$ , que serían zapatas muy pequeñas que requerirían un diseño especial. La interferencia con la zapata AWS de  $70^\circ$  se muestra en la **Figura 4-46**.

**Figura 4-46:** Interferencia tamaño de la zapata AWS en soldaduras con sobremonta (cupón P3).



### 4.6.2 Resultados de la evaluación

En la **Figura 4-47**, la **Figura 4-48** y la **Figura 4-49** se presentan las imágenes de la evaluación de las placas P3 y P10 con dos tipos de palpadores y tres ángulos de incidencia. También se muestra la forma del eco para las discontinuidades que se consideraron como defectos.

**Figura 4-47:** Placa P3 de 9.5 mm evaluada con ángulo de 60° en primera pierna y palpador AWS.



- a) Detección discontinuidad en el cuarto inferior (cerca a la raíz)
- b) Evaluación con 60°, discontinuidad en el centro (desde la raíz).

**Figura 4-48:** Placa P10 de 12,7 mm evaluada con ángulo de 70° en primera pierna y palpador AWS.

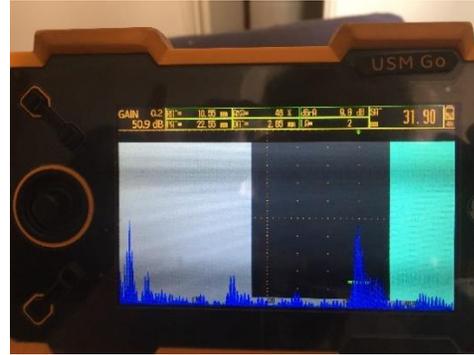


- a) Eco de la discontinuidad
- b) Ubicación de la discontinuidad

**Figura 4-49:** Placa P10 de 12,7 mm evaluada en segunda pierna con ángulo de 45° y palpador ROUND.



a) Ubicación de la discontinuidad

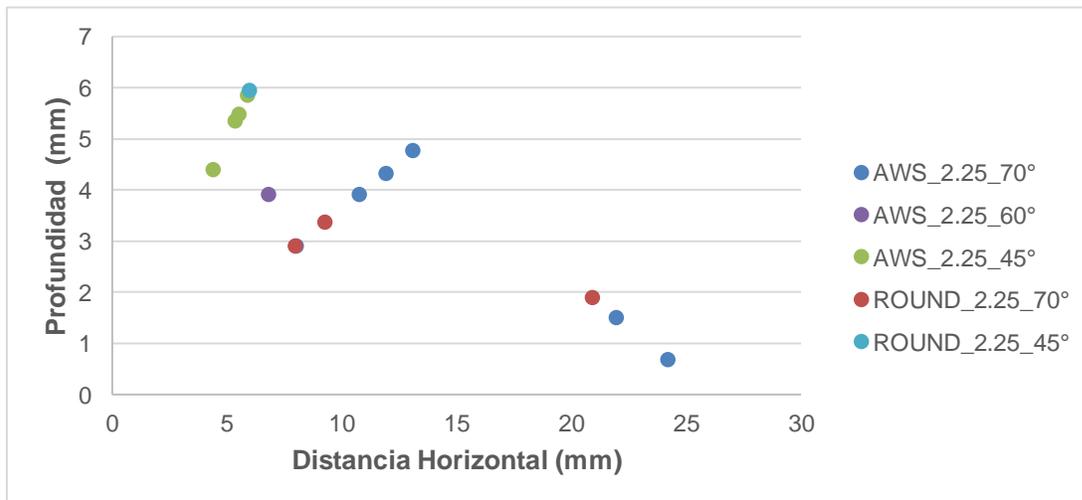


b) Señal de la discontinuidad

Las discontinuidades evaluadas en cada placa fueron inclusiones de escoria y faltas de fusión ubicadas en la parte central de la soldadura cuya longitud abarcaba casi toda la longitud de la soldadura, lo cual hizo que fuesen fácilmente detectadas.

Las soldaduras de ambas placas se examinaron por ambas caras (superior y raíz) y a ambos lados del eje de la soldadura. En la **Figura 4-50** se presenta la ubicación transversal obtenida para diferentes exploraciones realizadas con dos palpadores en la placa P3 y tres ángulos de incidencia. El eje vertical representa la posición a través del espesor (eje y) de la discontinuidad y el eje horizontal representa la distancia horizontal de la discontinuidad. Estas exploraciones generaron un mapa de la posición probable de la o las discontinuidades en lugar de una posición puntual.

**Figura 4-50:** Ubicación (transversal) de las discontinuidades de la placa P3.



De este análisis fue posible concluir que:

- 
- Las discontinuidades de ambas placas (P3 y P10) fueron ubicadas entre el cuarto inferior (raíz) y la parte central de la soldadura.
  - Las discontinuidades se clasificaron como “A”, en la mayoría de las exploraciones realizadas. Aquí no se hizo corrección cuando se hizo exploración con ángulos de 45° y 60°. La naturaleza de esta discontinuidad (longitud) y tipo (inclusión de escoria) es propicia para generar respuestas Clase A.
  - Fue posible establecer sin problemas la longitud de la discontinuidad. Sin embargo, la altura.
  - Los ecos de las discontinuidades son bastante nítidos, sin embargo no son “diferenciables”, es decir la forma del eco no define el tipo de discontinuidad.



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

#### 5.1.1 Relacionadas con la capacidad de detección

- El procedimiento de UT estándar de la AWS (ángulo de 70°, frecuencia de 2.25 MHz y cristal de 0.75"x0.75") tiene una capacidad de detección aceptable (del orden del 84% considerando 160 datos).
- Los reflectores NTH (planares) se pueden detectar con profundidades de hasta 0.5 mm, sin importar el tipo de palpador y ángulo de incidencia empleado en el examen.
- Los reflectores FBH (planares) son difíciles de detectar cuando tienen  $\phi \leq 3$  mm, lo cual depende del tipo de ángulo de incidencia y palpador empleado en el examen.
- Los reflectores SDH (volumétricos) son difíciles de detectar cuando tienen  $\phi \leq 0.5$  mm y se ubican en la parte media del espesor.
- Ángulos de incidencia menores a 70° (palpador AWS) puede mejorar la capacidad de detección.
- Sólo con un ángulo de 45° se logró mejorar la capacidad de detección (hasta en un 6%) cambiando el tamaño del cristal ( $\phi 1/2$  in) y aumentando la frecuencia (3.5MHz).
- Discontinuidades naturales tipo inclusiones de escoria que tienen una longitud mayor que el ancho del haz del palpador, tienen una alta posibilidad de ser detectadas y clasificarse como "A". Sin embargo la definición de su ubicación transversal (a través del espesor) para determinar la profundidad de excavación para su remoción es difícil de establecer. Solo es posible estimar una región probable donde se encuentra la discontinuidad.

#### 5.1.2 Relacionadas con la capacidad de evaluación

- La capacidad de evaluación del procedimiento estándar y los procedimientos modificados es muy similar, y en términos generales casi nula.
- Los valores del *índice de la indicación* obtenidos para cada reflector durante las ocho observaciones expusieron una alta variabilidad, encontrándose desviaciones estándar de hasta 16 dB. Esto hace que este parámetro sea poco confiable para establecer la criticidad de una discontinuidad en una estructura.
- Más del 80% de los reflectores artificiales detectados mostraron una respuesta "acústicamente menor" ( $b/a \leq 0.96$ ) que la del nivel de referencia. Lo que demuestra que no existe una relación entre la amplitud del eco y el tamaño del reflector.
- No se pudo establecer una relación proporcional fuerte entre el *índice de la indicación* y el tipo o tamaño (altura) del reflector; es decir que un *índice de la indicación* más pequeño (o negativo) no se corresponde, necesariamente, con un

reflector más grande (altura o área) y/o planar (FBH y NTH), como lo indica la AWS en sus asunciones.

- Sin importar el tipo de palpador que se emplee los reflectores tienden a clasificarse principalmente como “D” (discontinuidades no dañinas para la estructura con un  $d \geq 11$  dB) y luego como “A” (discontinuidades dañinas para la estructura con un  $d \leq 8$  dB), esto a pesar de que algunos de los reflectores presentan alturas tan grandes como 10 mm y longitudes de 50 mm. Estas clasificaciones concentran entre el 70-80% de los datos. Los reflectores que lograron clasificarse como “B” y “C”, se limitaron, en promedio, al 7% de los datos.
- Con el palpador estándar (AWS) se observó que los datos exhiben una diferencia de unos +8 dB entre la línea de tendencia de “d” obtenida con el palpador de 70° y la obtenida con 45° y de +4dB entre las líneas de tendencia entre el palpador de 60° y el de 70°. Esto muestra que los reflectores, pueden exhibir respuestas diferenciales cuando se emplea este palpador y diferentes ángulos de examen; además demuestra que la aproximación de la AWS es válida (+3dB y +5 dB). Sin embargo, en este caso se observaron valores un poco más altos que los propuestos por la AWS; lo que sugiere una revisión de dichos valores.
- Para un palpador diferente al estándar (ROUND) se obtuvo una atenuación de 0.1255 dB/mm (3.2 dB/in) para el ángulo de 70° y de 0.0861 dB/mm (2.2 dB/in) para el ángulo de 60°. Un valor de 1dB influye enormemente en la clasificación de las discontinuidades, por lo cual es posible notar la necesidad de que la AWS flexibilice la estimación de este parámetro, considerando por ejemplo el uso de bloques para tal fin, como el propuesto en esta investigación.
- No se observó una relación lineal proporcional entre el *índice de la indicación* y la distancia del sonido. Es decir la restricción de realizar el examen en primera pierna de la AWS, no resulta fundamentada.
- No fue posible establecer una correlación entre la forma del eco con el tipo y tamaño de los reflectores artificiales utilizados en este estudio.

### 5.1.3 Consideraciones prácticas sobre el procedimiento de UT de la AWS

Reconociendo el estado del arte evaluado en este estudio sobre el procedimiento de UT de los códigos de soldeo estructurales de la AWS y el análisis de los resultados de la investigación se pueden establecer las siguientes consideraciones que tiene relevancia técnica importante para la industria metálica:

- Sin importar el tipo de palpador y el ángulo de incidencia que se emplee el *índice de la indicación* “d” (altura de eco corregida) no resulta ser un parámetro confiable, estable y seguro para establecer la incidencia (severidad) de las discontinuidades detectadas en las soldaduras de las estructuras. No se encontró relación entre el tamaño (altura) de la discontinuidad y la altura del eco.
- Lo niveles de severidad “B” y “C” son prácticamente innecesarios (cuando el espesor evaluado es de hasta 38 mm), ya que, desde el punto de vista estadístico, tienen una baja probabilidad de obtenerse.

- Con un palpador estándar (AWS) es posible emplear ángulos de incidencia diferentes a 70°, siempre que se asuman factores de corrección del *índice de la indicación* “d” (las Tablas 6.3 y 6.4 del AWS D1.5) como los empleados por la AWS o como los encontrados en esta investigación; esto no afecta de manera significativa la capacidad de detección; por el contrario la mejora.
- El tamaño de la zapata empleada por la AWS, y por los europeos (zapata aserrada) impide el examen de la región central de las soldaduras en juntas a tope y en “T” de penetración completa, en primera pierna, para elementos de espesor menor a 25 mm.
- Debido a su mala *capacidad de evaluación*, la metodología de examen de la AWS no debería emplearse en análisis críticos de ingeniería o valoraciones de la conveniencia para el servicio de estructuras existentes.

## 5.2 RECOMENDACIONES

La AWS debería dejar de incluir este procedimiento prescriptivo en sus códigos de soldeo, y permitir que cada fabricante/diseñador desarrolle sus propios procedimientos para detectar y evaluar determinados tamaños de discontinuidades, estimados a partir de las condiciones de servicio de las estructuras y la capacidad de detección que posee sus ensayos.

Realizar estudios con software que modelen el haz de los transductores para estimar, de forma más precisa, el tamaño del campo del transductor y su relación con el tamaño de las discontinuidades (altura y longitud), y así establecer el tamaño y orientación óptima para la detección de un determinado tamaño de discontinuidad.

A partir de lo anterior, se podría realizar el diseño y desarrollo de transductores especiales para la detección de determinados tipos de discontinuidades apoyados en las necesidad particular de una estructura.

Realizar estudios para determinar que sucede con la disminución en la frecuencia del palpador y si esto puede influir en la forma como la discontinuidad se clasifica, es decir la *capacidad de evaluación* del procedimiento.

Desarrollar estudios de FFS para estimar cuales deberían ser los tamaños mínimos de las discontinuidades dañinas para la estructura, y si estos pueden ser detectados por el UT convencional.

## 6. ANEXOS

A continuación se listan los anexos que se encuentran en esta sección de información complementaria que se considera importante y útil en la investigación.

- **Anexo A:** contiene dos tablas (A-1 y A-2) que resumen los criterios de severidad del código AWS D1.1/D1.5 para componentes sometidos a tracción y sometidos a compresión. Esta tabla es una forma diferente presentar la información de las tablas 6.3 y 6.4 de los códigos.
- **Anexo B:** Se presentan los certificados de producto de dos de los tres palpadores empleados en la parte experimental de la investigación: Palpador AWS de 2.25MHz y Palpador ROUND de 2.25 MHz.
- **Anexo C:** Se presentan los planos de los cinco bloques con reflectores artificiales que fueron empleados para realizar la verificación de los cambios en la frecuencia y el tamaño del transductor.
- **Anexo D:** se presenta un pequeño registro fotográfico.



### A.Anexo A-1: Tabla de análisis nivel de indicación- Tracción

	ÁNGULO DE INCIDENCIA	ESPESOR DE LAS PIEZAS EXAMINADAS EN PULGADAS			ÁNGULO DE INCIDENCIA (°)			ESPESOR DE LAS PIEZAS EXAMINADAS EN PULGADAS				
	70°	0.3125" - 0,.75"	0.75" – 1.5"		70°	60°	45°	1.5" – 2.5"	2.5" - 4"	4" - 8 "		
GANANCIA POR ENCIMA DEL NIVEL DE REFERENCIA (DB) - INDICATION RATING	-22	CLASE A  INSPECCIÓN 70°	CLASE "A"  INSPECCIÓN 70°	GANANCIA POR ENCIMA DEL NIVEL DE REFERENCIA (DB) - INDICATION RATING	-22	-19	-17	CLASE A  INSPECCIÓN 70°, 60° Y 45°	CLASE A  INSPECCIÓN 70°, 60° Y 45°	CLASE A		
	-20				-18	-15	-18				-15	-13
	-18				-16	-13	-16				-13	-11
	-16				-14	-11	-14				-11	-9
	-14				-12	-9	-12				-9	-7
	-12				-10	-7	-10				-7	-5
	-10				-8	-5	-8				-5	-3
	-8				-6	-3	-6				-3	-1
	-6				-4	-1	-4				-1	1
	-4				-2	1	-2				1	3
	-2	-1	2		-1	2	4					
	0	1	3		0	3	5					
	1	2	4		1	4	6					
	2	3	5		2	5	7					
	3	4	6		3	6	8					
	4	5	7		4	7	9					
	5	6	8		5	8	10					
	6	7	9		6	9	11					
	7	8	10		7	10	12					
	8	9	11		8	11	13					
	9	10	12		9	12	14					
	10	11	13		10	13	15					
	11	12	14		11	14	16					
	12	13	15		12	15	17					
	13	14	16		13	16	18					
	14	15	17		14	17	19					
	16	16	18		16	19	21					
	18	18	21		18	21	23					
20	20	23	20	23	25							
22	22	25	22	25	27							
24	24	27	24	27	29							
26	26	29	26	29	31							
28	28	31	28	31	33							

### A.Anexo A-2: Tabla de análisis nivel de indicación- Compresión

	ÁNGULO DE INCIDENCIA	ESPESOR DE LAS PIEZAS EXAMINADAS EN PULGADAS			ÁNGULO DE INCIDENCIA (°)			ESPESOR DE LAS PIEZAS EXAMINADAS EN PULGADAS		
	70°	0.3125" - 0,75"	0.75" - 1.5"		70°	60°	45°	1.5" - 2.5"	2.5" - 4"	4" - 8"
GANANCIA POR ENCIMA DEL NIVEL DE REFERENCIA (DB) - INDICATION RATING	-22	CLASE A  INSPECCIÓN 70°	CLASE "A"  INSPECCIÓN 70°	GANANCIA POR ENCIMA DEL NIVEL DE REFERENCIA (DB) - INDICATION RATING	-12	-9	-7	CLASE A  INSPECCIÓN 70°, 60° Y 45°	CLASE A  INSPECCIÓN 70°, 60° Y 45°	CLASE A  INSPECCIÓN 70°, 60° Y 45°
	-20				-11	-8	-6			
	-18				-10	-7	-5			
	-16				-9	-6	-4			
	-14				-8	-5	-3			
	-12				-7	-4	-2			
	-10				-6	-3	-1			
	-8				-5	-2	0			
	-6				-4	-1	1			
	-4				-3	0	2			
	-2	-2	1		3					
	-1	-1	2		4					
	0	0	3		5					
	1	1	4		6					
	2	2	5		7					
	3	3	6		8					
	4	4	7		9					
	5	5	8		10					
	6	6	9		11					
	7	7	10		12					
	8	8	11		13					
	9	9	12		14					
	10	10	13		15					
	11	11	14		16					
	12	12	15		17					
	13	13	16		18					
	14	14	17		19					
	16	16	19		21					
18	18	21	23							
20	20	23	25							
22	22	25	27							
24	24	27	29							
26	26	29	31							
28	28	31	33							



## B.Anexo B-1: Certificado palpador AWS 2.25MHz

Measurement & Control

*Palpador AWS estandar*

Technical data					
Symbol	Description	Min Tolerance	Actual	Max Tolerance	Dimension
$f_0$	Centre frequency	2	2.27	2.5	MHz
$T_{pe}$	Echo pulse duration -20dB	1.1	1.38	1.7	$\mu$ s
$B_{-6}$	Relative bandwidth @ -6dB Arithmetic	40	52.42	60	%
$S_{rel}$	Relative pulse-echo sensitivity	-50	-49.46	-44	dB

### Certificate of Conformity

Probe type: **AWS GAMMA 2,25 MHz** *no es D*

Ident no.: 113292604

Serial no.: **SGE0110**

Spec: 113292604\_00010001

Test date: **12/20/2017**

Id.-No. 113-900-929

Reference of calibrated instruments used				
Manufacturer / Model	Serial no.	Plant no.	Cal Date	Due Date
GE-IT / USM25	791ef	1013	02/07/2017	02/07/2018
GE-IT / N30	2218	1018	09/27/2017	09/27/2018
Tektronik / TDS3030B	8031817	1050	12/20/2016	12/20/2017
GE-IT / Backwall 1.0" perspex	PX3057	3057	07/17/2017	07/17/2018

**Instrument setting** USM 25S

Pulser Power: high

Damping: high

PRF Mode: 10

Filter: 0.2 - 20 MHz

**Testblock**

Material: Plexiglas

Sound velocity: .11 in/us

Reflector: Flat

Connecting cable: 118-140-016 (C-016)

Transducer Description: **AWS GAMMA 2,25 MHz, .75" SQ**

Compliant to ASTM E1065

*D = 2.27 / 1.2 ≈ 2.0*

*High damping*

*1.7 MHz*  
*2.9 MHz*

*Bandwidth - 1.2*

RF Signal

Spectrum

GE imagination at work

50 Industrial Park Road  
Lewistown, PA 17044  
USA  
Tel: +1 717 242 0327  
Fax: +1 717 242 2606  
F +1 717 242 2606

0103-172  
Made in Slovakia  
www.ge-mcs.com

©2010 General Electric Company. All rights reserved.  
We reserve the right to technical modifications without prior notice.

## B.Anexo B-2: Certificado palpador ROUND 2.25MHz

GE  
Measurement & Control

Technical data					
Symbol	Description	Min Tolerance	Actual	Max Tolerance	Dimension
$f_0$	Centre frequency		2.25	2.5	MHz
$T_{90}$	Echo pulse duration, -20dB	2	1.42	1.8	µs
$B_{-6}$	Relative bandwidth @ -6dB, Arithmetic	1.3	48.47	30	%
$S_{rel}$	Relative pulse-echo sensitivity	35	-47.77	-44	dB

### Certificate of Conformity

Probe type: MSW-QC Gamma 2,25  
 Ident no.: 113242590  
 Serial no.: SAB0133  
 Spec: 113242590\_00010001  
 Test date: 08/07/2017  
 No. 113-900-929

*Mimative angle Beam*

Reference of calibrated instruments used				
Manufacturer / Model	Serial no.	Plant no.	Cal Date	Due Date
GE-IT / N30	2218	1018	09/28/2016	09/28/2017
GE-IT / Backwall 1.0" perspex	PX3057	3057	07/17/2017	07/17/2018
GE-IT / USM25	7915f	1013	02/07/2017	02/07/2018
Tektronix / TDS3030B	BO31817	1050	12/20/2016	12/20/2017

#### Instruments setting

USM 25S

Pulser Power: high  
 Damping: high  
 PRF Mode: 10  
 Filter: 0.2 - 20 MHz

#### Testblock

Material: Plexiglas  
 Sound velocity: .11 in/µsec  
 Reflector: Flat  
 Connecting cable: 118-140-012 (C-012)

Transducer Description: MSW-QC Gamma 2,25 MHz, .50" Dia.  
 All measurements per ASTM E 1065

RF Signal

Spectrum

*1.7 MHz - 2.9 MHz*  
*center frequency*  
 $D = \frac{2.25 \text{ MHz}}{1.1 \text{ MHz}} = 2.045$   
*Bandwidth*      *High Damping*

GE imagination at work

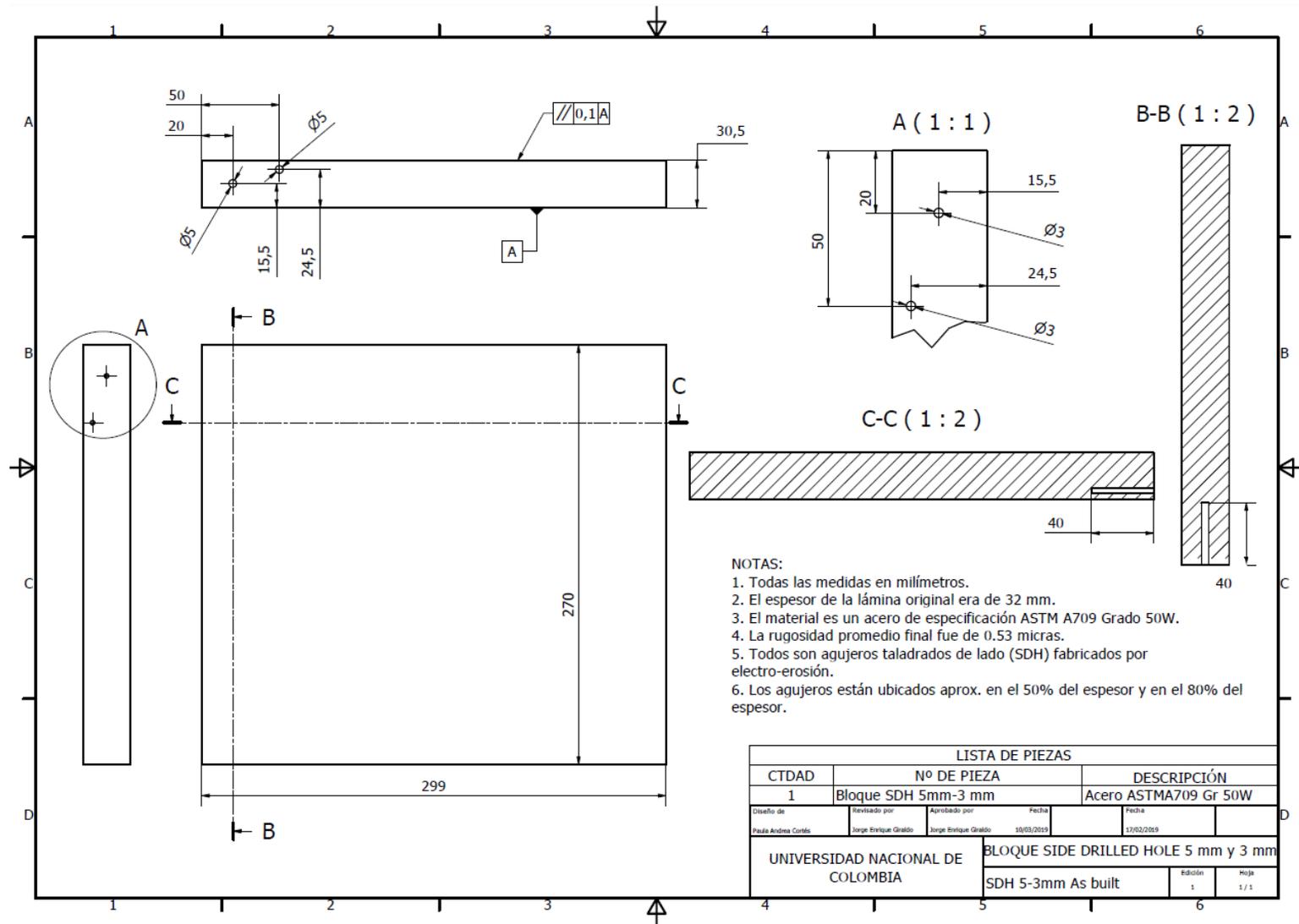
50 Industrial Park Road  
 Lewisburg, PA 17044  
 USA  
 Tel: +1 717 242 0327  
 Fax: +1 717 242 2506  
 F: +1 717 242 2505

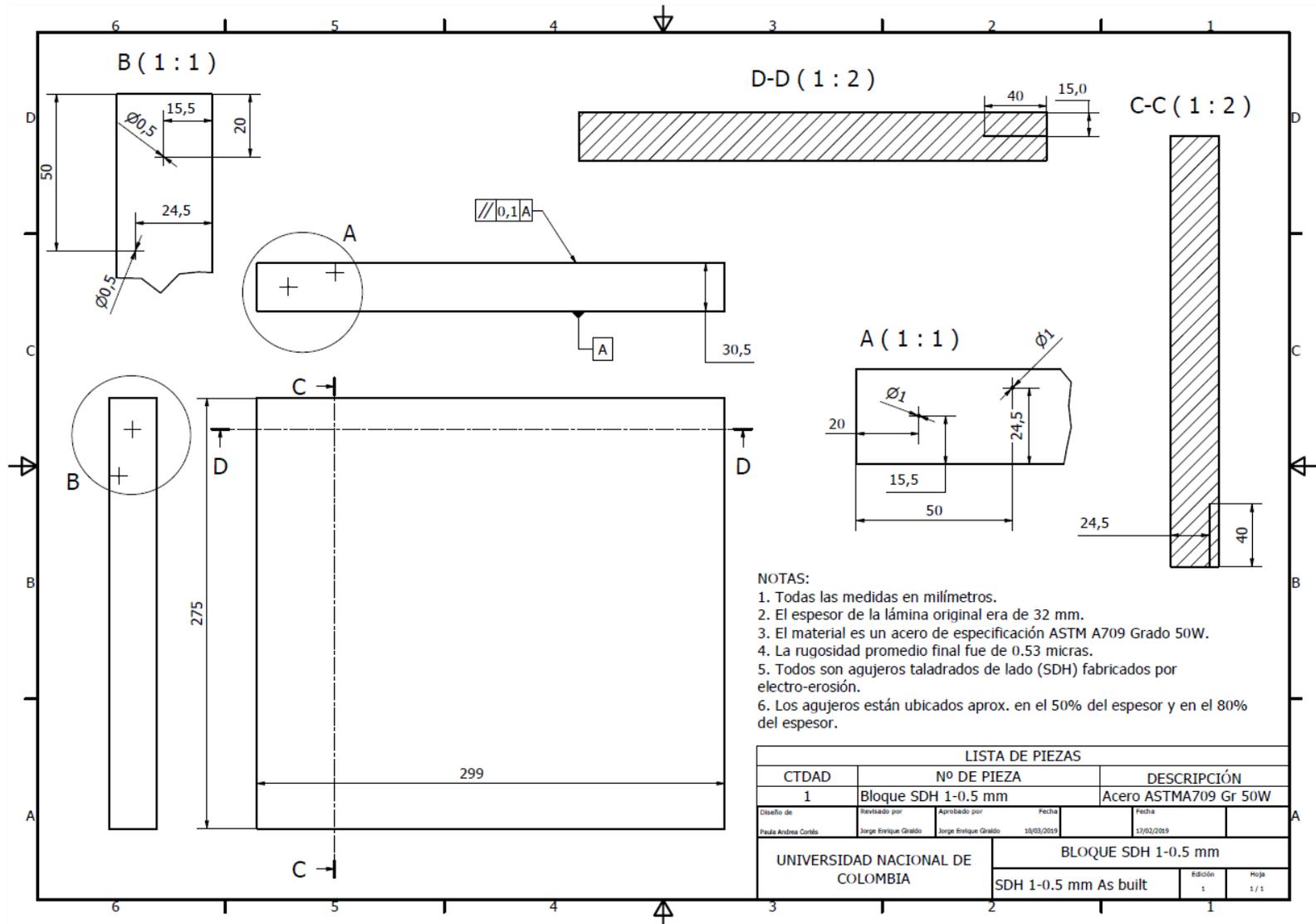
DIV.172  
 Made in Slovakia  
 www.ge-mcs.com  
 ©2010 General Electric Company. All rights reserved.  
 We reserve the right to technical modifications without prior notice.

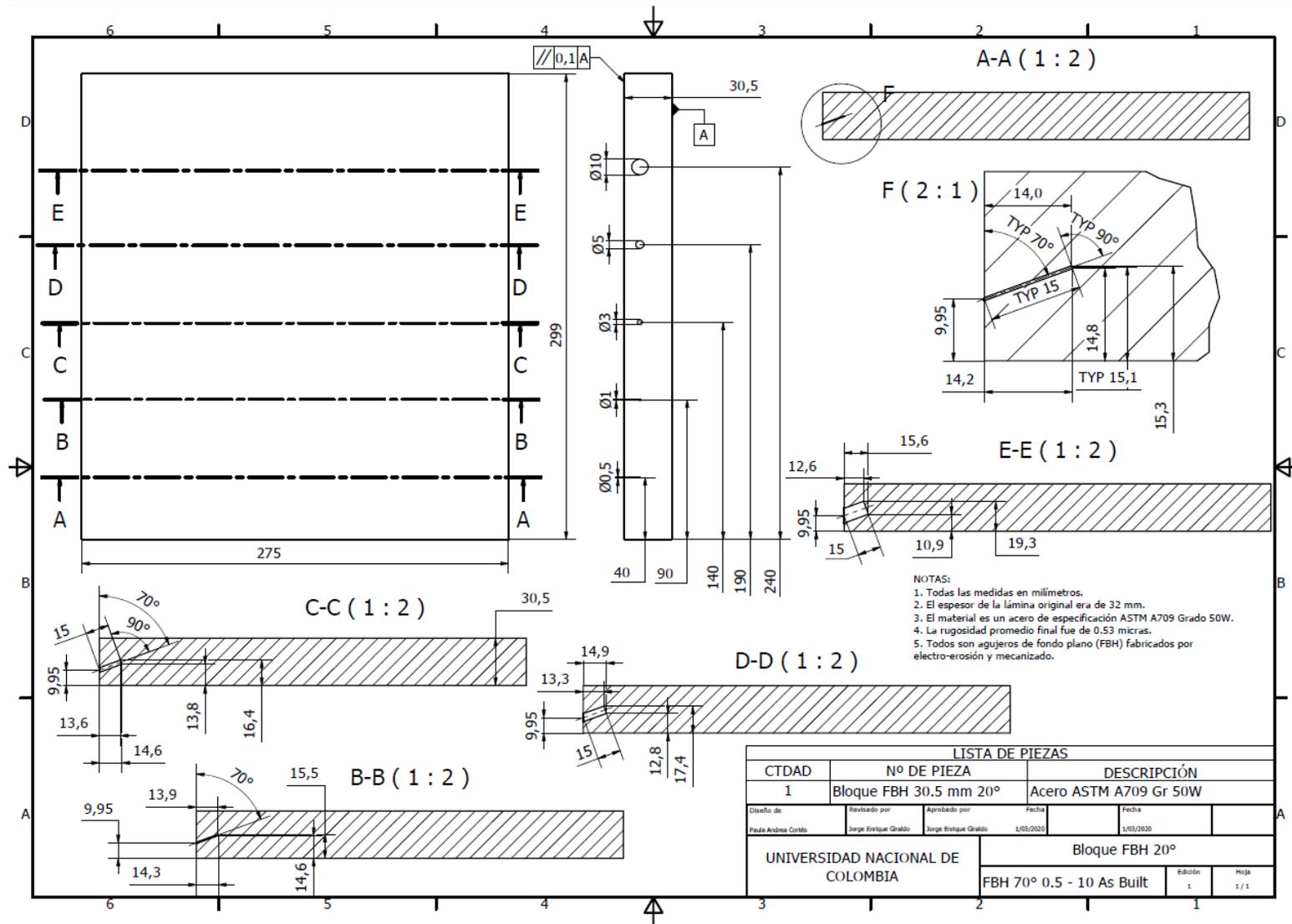
## C.Anexo C: Planos bloques patrón

Se presentan los planos de los cinco bloques con reflectores artificiales los cuales corresponden a:

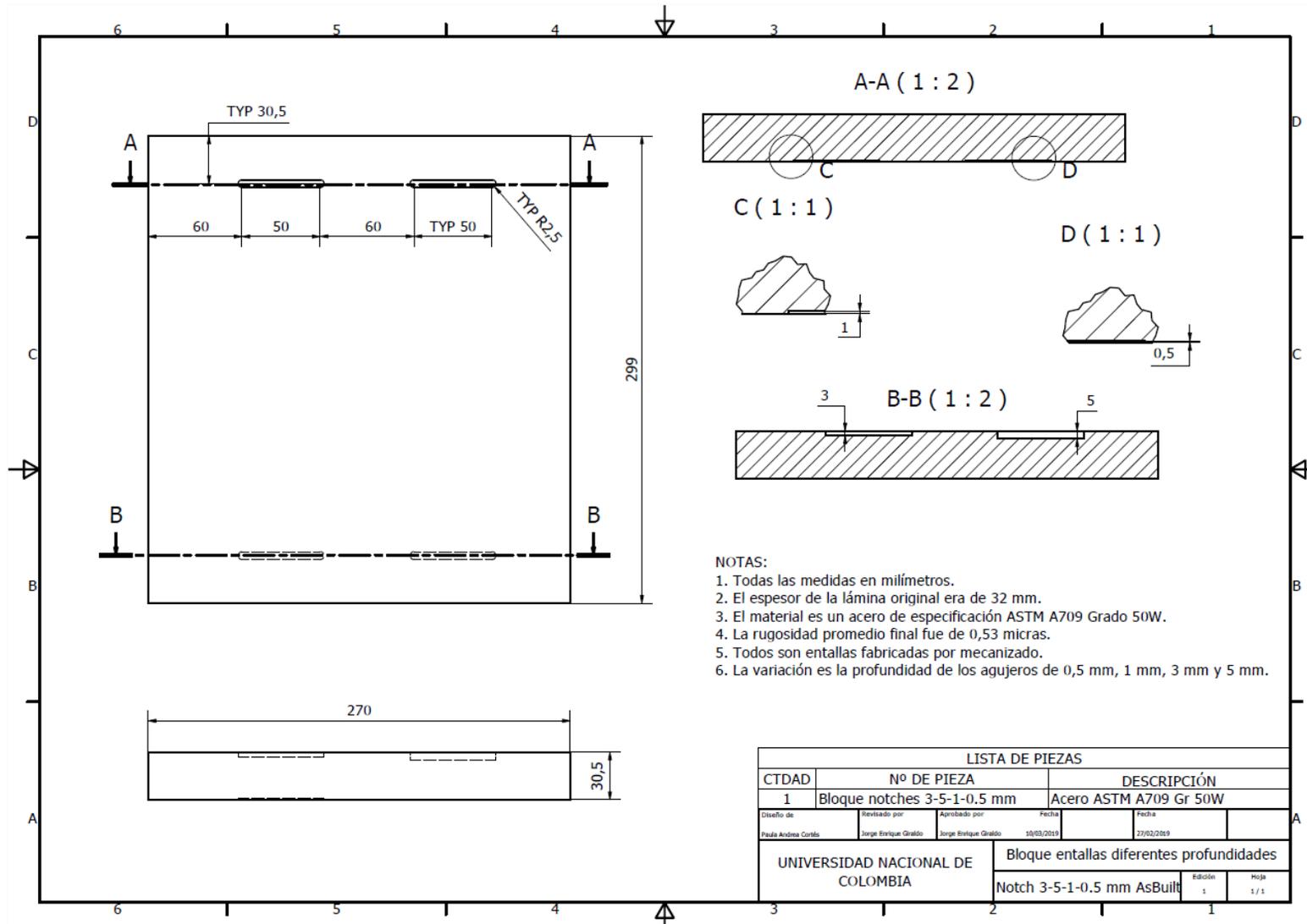
- Bloque con dos conjuntos de agujeros taladrado de lado (SDH) de 5 y 3 mm de diámetro, ubicados en el 50% y el 80% del espesor.
- Bloque con dos conjuntos agujeros taladrado de lado (SDH) de 1 y 0.5 mm de diámetro, ubicados en el 50% y el 80% del espesor.
- Bloque con cinco agujeros de fondo plano (FBH) de 0.5 mm, 1 mm, 3 mm, 5 mm y 10 mm de diámetro orientado a 20° y ubicado en el 50% del espesor del bloque.
- Bloque con cuatro entallas (NTH) de 0.5 mm, 1 mm, 3 mm y 5 mm de profundidad, de cinco milímetros de ancho y 50 mm de largo.
- Bloque con cinco agujeros de fondo plano largos de 1 mm, 3 mm y 5 mm de diámetro orientado a 20°, ubicado en el 50% del espesor del bloque y con 20 mm de largo.
- Bloque siete agujeros taladrados de lado de 1.5 mm de diámetro, ubicados a diferentes distancias con el fin de alcanzar una distancia del sonido mayor a los 100 de largo, para generar una curva de atenuación del sonido.

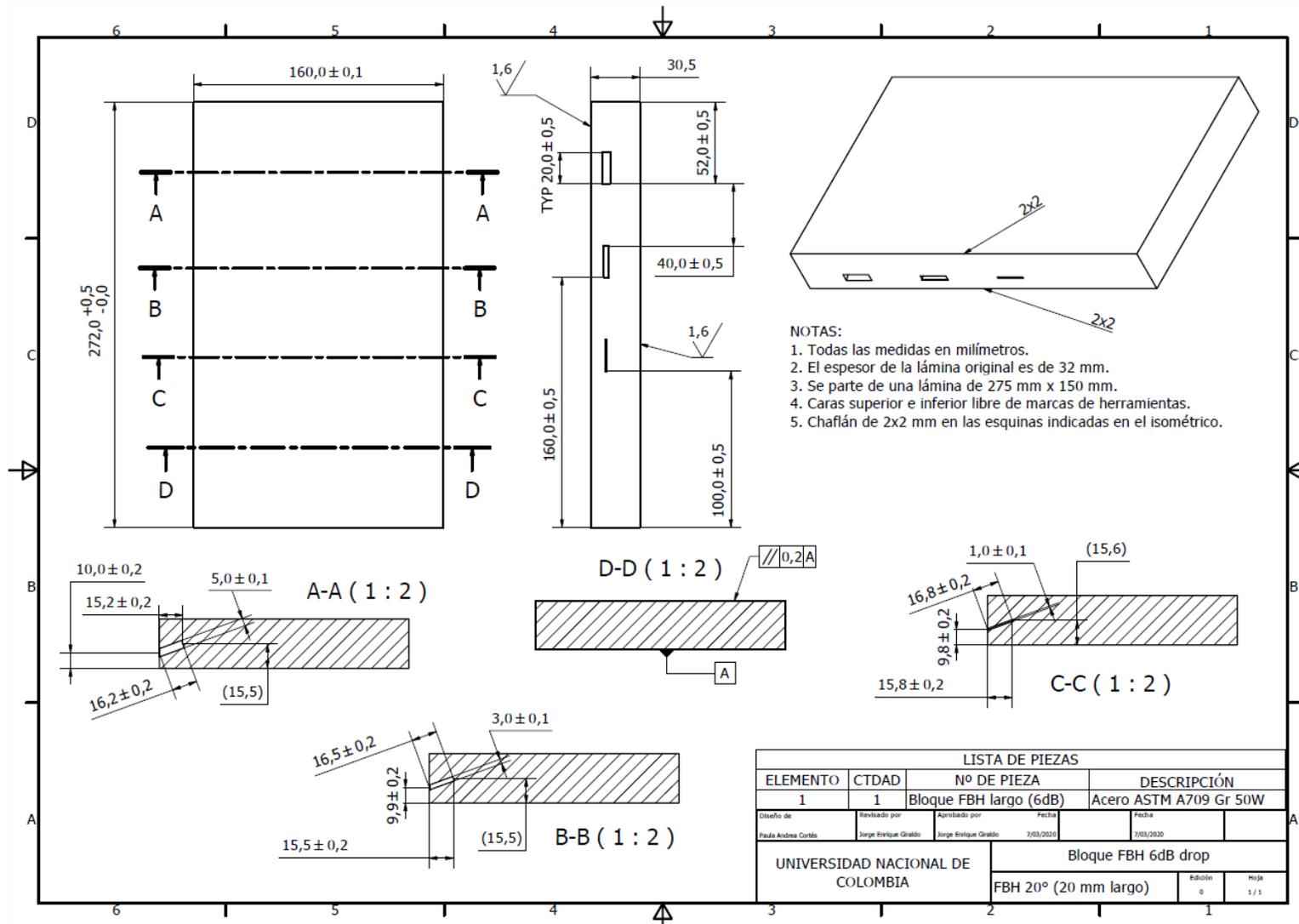


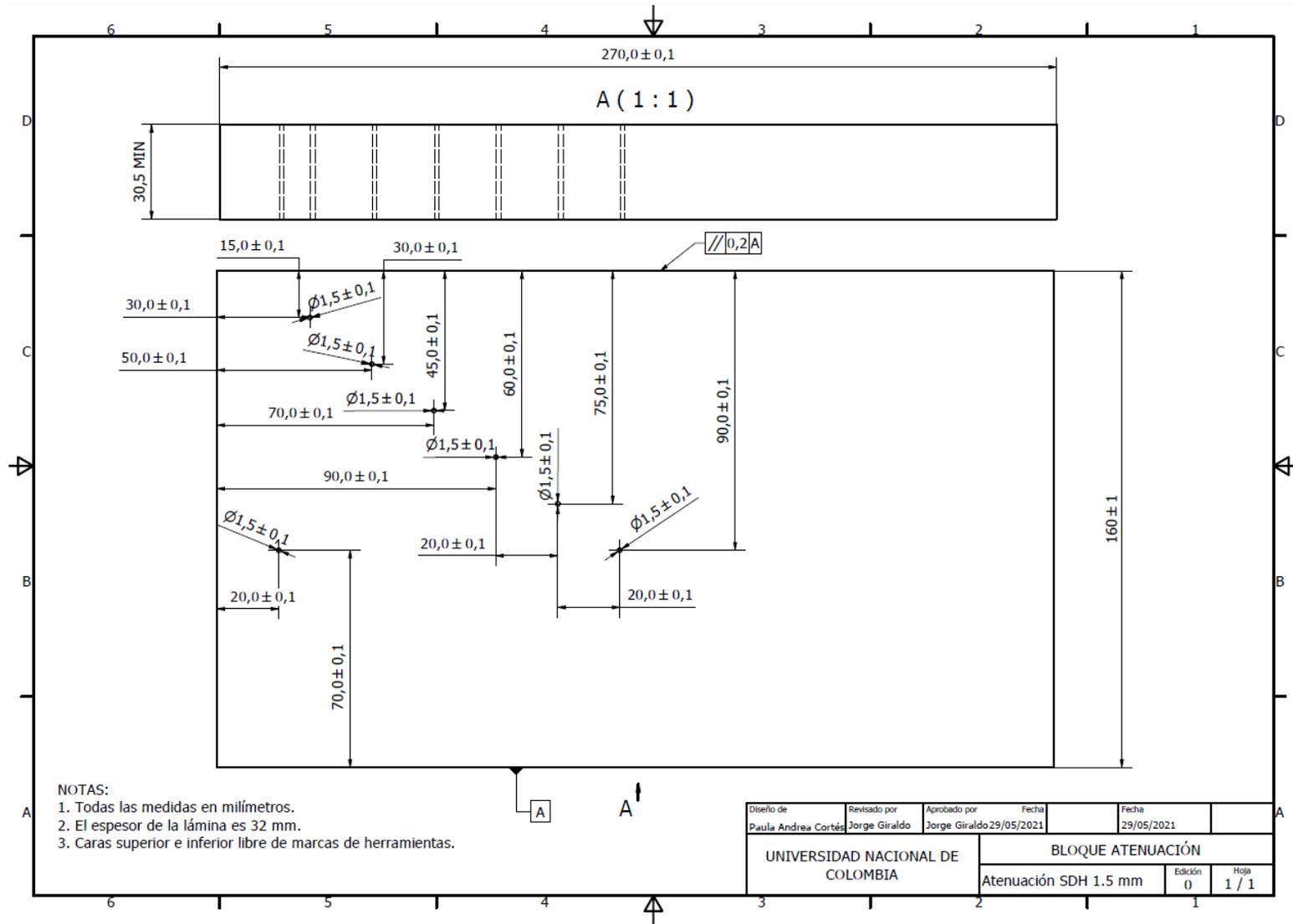




LISTA DE PIEZAS					
CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN			
1	Bloque FBH 30.5 mm 20°	Acero ASTM A709 Gr 50W			
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha		
Paulo Andres Cortés	Jorge Enrique Galindo	Jorge Enrique Galindo	1/03/2020	1/03/2020	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA			Bloque FBH 20°		
			FBH 70° 0.5 - 10 As Built	Edición 1	Hoja 1 / 1





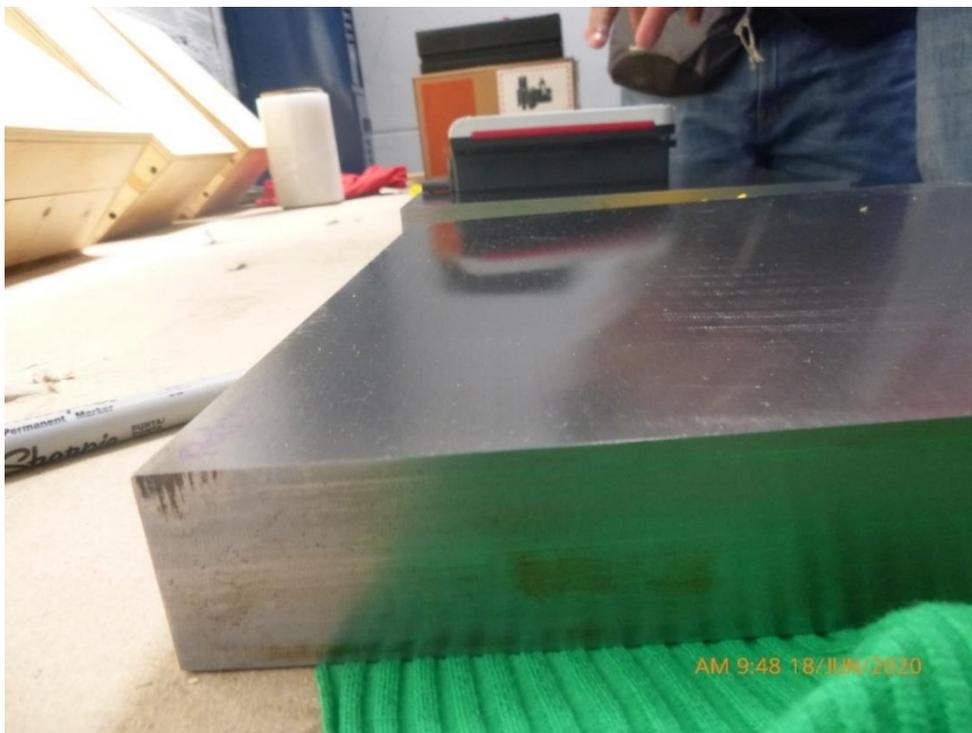




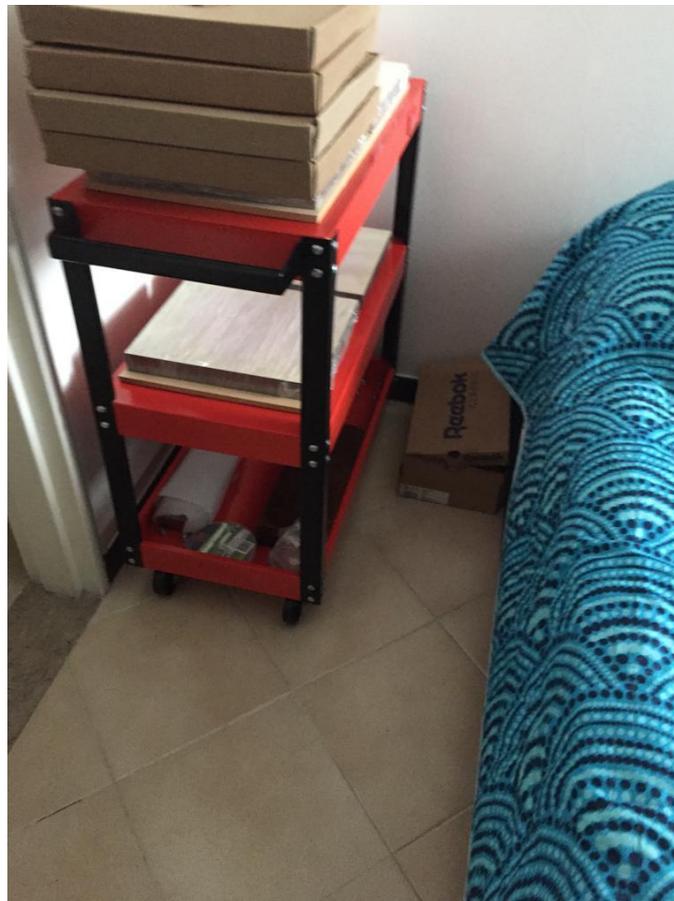
## **D.Anexo D: Imágenes de los bloques empleados en la investigación**

En el siguiente anexo se incluyen algunas imágenes de los bloques que fueron usados en esta investigación para realizar la evaluación con ultrasonido. También se muestran algunas de las fases de revisión.

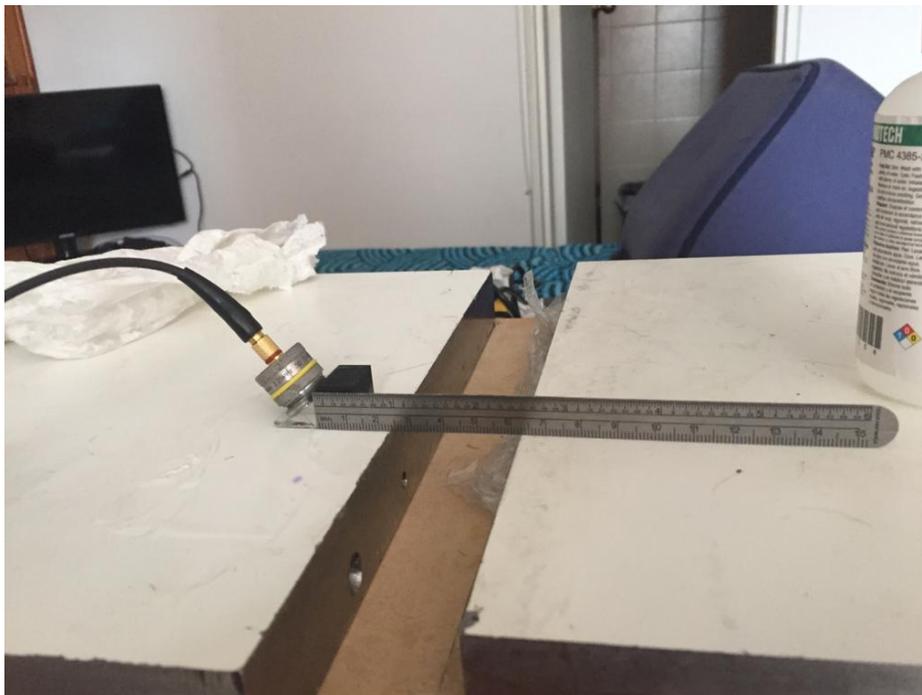
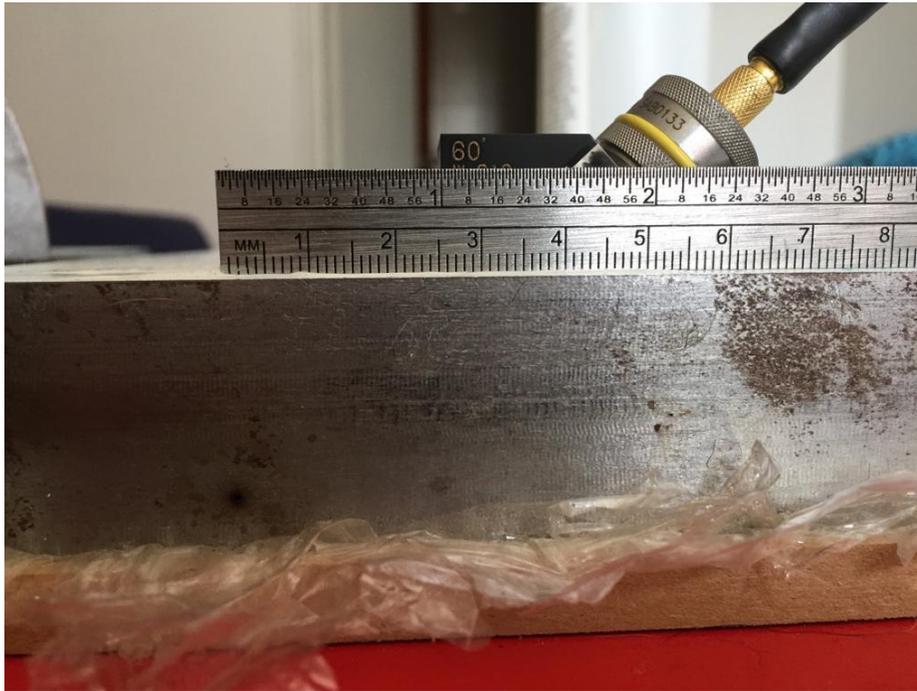
### VERIFICACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE ALGUNOS DE LOS BLOQUES



**MESA Y BLOQUES CON REFLECTORES SDF, FBH Y NTH**



### VERIFICACIÓN EN BLOQUE SDH Y FBH



## 7. TRABAJOS CITADOS

- A. Lhémercy, P. C.-T. (2000). Modeling tools for ultrasonic inspection of welds. *NDT&E International*, 499–513.
- A. Zolfaghari, D. S. (2013). Characterization of Welded Components Flaws Using an Ultrasonic Expert System Based on Static Patterns. *Key Engineering Materials*, 141-144.
- Aditya Akundi, T.-L. B. (2018). Non-Destructive Testing (NDT) and Evaluation using Ultrasonic Testing Equipment to Enhance Workforce Skillset for Modern Manufacturing. *American Society for Engineering Education*.
- Alok Prakash, N. J. (2015). Ultrasonic Simulation Studies for Sizing of Planar Flaws in Thick Carbon Steel Weld. *Indian National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation NDE 2015*. Hyderabad, India.
- Andrés, R. R., & Victor M. Acosta, E. R. (20 de Julio de 2017). Ultrasonic field generated by different airborne power ultrasonic transducers with extensive radiators. *Materials Science*. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/33b9/a9911c67f4efd843b981a3873f81091c0fd6.pdf>
- ASM. (1997). Chapter 4- Discontinuities and Imperfections. En *Weld Integrity and Performance*.
- ASM International. (2018). Fundamentals of Ultrasonic Inspection. En A. a. Bond, *ASM Handbook, Volume 17, Nondestructive Evaluation of Materials* (págs. 155-168).
- ASME Section V. (2015). *ASME B&PVC Section V*.
- ASNT. (2007). *Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 7, Ultrasonic Testing (UT)*.
- ASTM. (2013). ASTM E164 - 13 Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Weldments.
- ASTM. (2018). Standard Practice for Castings, Carbon, Low-Alloy, and Martensitic Stainless Steel, Ultrasonic Examination Thereof.
- ASTM. (s.f.). ASTM E2375 - 16 Standard Practice for Ultrasonic Testing of Wrought Products.
- ASTM E1316. (2020). Standard Terminology for Nondestructive Examinations.

- ASTM E164. (2019). Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Weldments. *Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Weldments*.
- AWS. (2000). *B1.11 Guide for the visual inspection of welds*. Miami, Florida.
- AWS. (2009). *AWS B1.10M/B1.10 Guide for the Nondestructive Examination of Welds*. Miami, FL 33126: American Welding Society.
- AWS. (2015). *D1.1: 2015 Structural Welding Code*.
- AWS. (22 de febrero de 2020). *AWS.org*. Obtenido de *AWS.org*: <https://www.aws.org/about/page/aws-100>
- AWS A3.0. (2010). *A3.0M/A3.0 Standard Welding terms and definitions; including terms for adhesive bonding, brazing, soldering, thermal cutting and thermal spraying*. Florida: AWS.
- AWS D1.1. (1972). AWS D1.1-72. En AWS. Miami.
- AWS D1.1. (1983). *Structural Welding Code Steel*. Miami: American Welding Society.
- AWS D1.5. (2015). *AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2010 BRIDGE WELDING CODE*. AWS.
- B. Kato, K. M. (1976). Estimation of weld defects through ultrasonic testing. *Welding Journal*, 946-953.
- BALDEV RAJ, T. J. (1995). Non-destructive testing and evaluation for structural integrity. *Salhana*, 5-38.
- Bastien, P. (1968). Difficulties in the ultrasonic evaluation of defect size. *Non-destructive testing*, 147-151.
- Bastien, P. (1977). The possibilities and limitations of ultrasonics in the non-destructive testing of steel. *NDT International*, 297-305.
- Berke, M. (s.f.). *Nondestructive Material Testing with Ultrasonics- Introduction to the Basics Principles*.
- BINDT. (23 de Octubre de 2021). <https://www.bindt.org/What-is-NDT/Index-of-acronyms/S/SDH-and-FBH/>. Obtenido de <https://www.bindt.org/What-is-NDT/Index-of-acronyms/S/SDH-and-FBH/>.
- BIRRING, A. S. (2020). Ultrasonic Angle Beam Calibration - Notches and Side Drilled Holes . *NDT.NET*, 6.
- Bond, A. I. (1979). Interaction of a compressional impulse with a slot normal to the surface of an elastic half space-II. *Geophys. J. R. astr. Soc* 65, 75-90.

- BSC, U.S. Department of Transportation, BPR. (1968). *Ultrasonic Testing Inspection for Butt Welds in Highway & Railway Bridges*. U.S Government printing office.
- Chien-Ping Chiou, F. J. (2017). Model-based software for simulating ultrasonic pulse/echo inspections of metal components. *43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*.
- Ciorau, P. (2011). Comparison between -6dB and -12dB amplitude drop techniques for length sizing. *e-Journal of Nondestructive Testing (NDT) ISSN 1435-4934 (NDT.net Journal)*.
- D. Shahriari, A. Z. (2011). Determination of Flaw Type and Location Using an Expert Module in Ultrasonic Nondestructive Testing for Weld Inspection. *AIP Conference Proceedings 1315*, (pág. 825).
- daselsistemas. (25 de Agosto de 2021). Obtenido de <https://www.daselsistemas.com/en/h2020/conventional-ut/384-ultrasonic-field>
- Deutsch, P. D.-I. (s.f.). *ndt.net*. Obtenido de <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn378/idn378.htm>
- E. Rodríguez, F. F. (2003). Effect of surface roughness in ultrasonic testing (Pulse-echo by direct contact) in AISI/SAE 4340 steel samples. *NDT.net*.
- Ermolov, I. N. (2004). Progress in the Theory of Ultrasonic Flaw Detection. Problems and Prospects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 655–678.
- FHWA. (2005). *HWA–HRT–04–124 Laboratory and Field Testing of Automated Ultrasonic Testing (AUT) Systems for Steel Highway Bridges*.
- FHWA. (2014). *HRT-14-074 Development of Phased-Array Ultrasonic Testing Acceptability Criteria (Phase I)*.
- Ford, J. F. (1981). Review of Traditional Design Codes and their Relevance in Relation to Fracture [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 131-143.
- Fuchs, J. (15 de noviembre de 2020). *Techblog*. Obtenido de Ultrasonics – Transducers – What is “Q”? : <https://techblog.ctgclean.com/2012/01/ultrasonics-transducers-what-is-q/>
- George Athanasopoulos, P. P. (June 2000). Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 19, Issue 4*, , 277-288.

- Ginzel, E. (25 de Agosto de 2021). Obtenido de <https://www.ndt.net/article/v06n09/ginzel/ginzel.htm>
- Ginzel, E. A. (2014). Misconceptions about NDT Workmanship Acceptance Criteria for Quality Control. *The e-Journal of Nondestructive Testing*.
- H. Wirdelius, G. P. (2012). Simulation based validation of the detection capacity of an ultrasonic inspection procedure. *International Journal of Fatigue*, 23–29.
- H. Wüstenberg, A. E. (15 de noviembre de 2020). *NDTnet*. Obtenido de Limiting Factors for Crack Detection by Ultrasonic Investigation: [https://www.ndt.net/article/0198/wues\\_lim/wues\\_lim.htm#:~:text=The%20three%20major%20groups%20which,physical%20properties%20of%20the%20crack](https://www.ndt.net/article/0198/wues_lim/wues_lim.htm#:~:text=The%20three%20major%20groups%20which,physical%20properties%20of%20the%20crack)
- Halmshaw, R. (1996). *Introduction to the non-destructive Testing of Welded Joints*. Woodhead Publishing.
- Hanxin Chen, S. Y. (2014). Simulation of Ultrasonic detection of Natural Defects in Weld with Finite Element Analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 1590-1593.
- Hill, G. E. (1984). Application of probabilistic analysis to assess the relative severity of crack-like weld defects. *Civ. Engng Syst*, 160-167.
- Holloway, P. (2017). Structural UT: Variables affecting attenuation and Review of the 2 dB per inch Model. *CINDE Journal*, 6-11.
- Holloway, P. (1 de Enero de 2021). *hollowayndt*. Obtenido de The shortcomings of the 6dB drop method for ultrasonic flaw length sizing: <http://www.hollowayndt.com/news/2018/10/22/the-shortcomings-of-the-6db-drop-method-for-ultrasonic-flaw-length-sizing>
- IAEA. (1999). *Training course series No. 10- Ultrasonic Testing of Materials at level 2*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (3 de Octubre de 2021). *inis.iaea.org*. Obtenido de [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/19/100/19100874.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/19/100/19100874.pdf)
- INTA. (Segunda Edición). *Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de la calidad de los materiales*. INTA.
- INVIAS. (2015). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP14*. Bogotá.
- İŞLEYİCİ, U. (2005). THESIS. *EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON ULTRASONIC TESTING*.
- ISO. (2012). *ISO 16828:2012 Non-destructive testing - Ultrasonic testing - Time-of-flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities*.

- ISO. (2017). ISO 17640:2017 Non-destructive testing of welds -- Ultrasonic testing -- Techniques, testing levels, and assessment.
- ISO. (2017). ISO 5577 Nondestructive testing-Ultrasonic testing- Vocabulary. *Nondestructive testing-Ultrasonic testing- Vocabulary*.
- J. Krautkrämer, C. (1959). Determination of the size of defects by the ultrasonic impulse echo method. *British Journal of Applied Physics*, 240-246.
- J. M. A. Rebello, A. A. (2007). Reliability of the Ultrasonic Technique Applied to Detection of Pipe weld defects. *American Institute of Physics*, 1839-1846.
- J. M. Coffey, G. O. (1979). The Future of Ultrasonic Examination in Engineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 285-298.
- J. Zhang, A. B. (2010). The characterization of crack-like defects using ultrasonic images. *American Institute of physics*, 895-902.
- Jalinoos, P. H. (2010). NDE of Steel Bridges: Fatigue Crack Detection and Monitoring. *Structural Materials Technology 2010*.
- José A. Arango Ossa, A. R. (1988). Tesis de pregrado. *Inspección ultrasónica de soldadura a tope en platinas de acero*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- K. Manjula, K. V. (2014). Weld Flaw Detection using various Ultrasonic techniques: A review. *Journal of Applied Sciences*, 1529-1535.
- K. Sudheera, N. M. (2013). Automated weld defect classification from ultrasonic signals using statistical moments normal distribution curves of Wavelet co-efficient. *International Conference on Advanced Electronic Systems* (págs. 24-28). IEEE.
- Khaled Youssef Elbanna, B. M. (9 de febrero de 2020). <https://clinicalimagingscience.org>. Obtenido de <https://clinicalimagingscience.org>: <https://clinicalimagingscience.org/bilateral-renal-lymphangiectasia-radiological-findings-by-ultrasound-computed-tomography-and-magnetic-resonance-imaging/>
- Krautkrämer, J. K. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- L. Hörchens, X. D. (2013). Ultrasonic imaging of welds using boundary reflections. *American Institute of Physics*, 1051-1058.
- Lester W. Schmerr, J. ., (2013). ULTRASONIC FLAW SIZING – AN OVERVIEW. *American Institute of Physics*, 1817-1824.

- Lester W. Schmerr, J. A. (1989). The Scattering Response of a Flat-Bottom Hole. En *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (págs. 95-101). La Jolla ,CA: Springer-Verlag US.
- Lester W. Schmerr, J. J. (1987). Development of an expert system for ultrasonic flaw classification. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol 6 A*.
- Looten, D. W. (2014). Evaluating the variables that impact ultrasonic testing. Missouri.
- M Consonni, D. H. (2014). Production of joints welds with realistic defects. *Welding International, 535-546*.
- M. P. Souza, R. M. (2009). Detection of lack of fusion weld defects by radiography. *American Institute of Physics, 1174-1181*.
- Maddox, B. H. (1963). The identification of weld defects by ultrasonic methods. *Ultrasonics, 189-193*.
- Mathers, G. (2 de Abril de 2020). <https://www.twi-global.com>. Obtenido de <https://www.twi-global.com>: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ultrasonic-examination-part-1-127>
- Mathers, G. (16 de noviembre de 2020). [saiw.co.za](http://saiw.co.za). Obtenido de JOB KNOWLEDGE 127 Ultrasonic Examination Part 1: <https://www.saiw.co.za/job-knowledge-127/>
- McNab, I. a. (1997). Automated parameter extraction for ultrasonic flaw analysis. *IEE Proc, 93-99*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismoresistente NSR-10*.
- Min-jae Jung, B.-c. P.-h.-c. (2018). PAUT-based defect detection method for submarine pressure hulls. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 153-169*.
- Murphy, R. (1987). *Ultrasonic defect-sizing using decibel drop methods Volume I: Text*.
- Nathalie Kopp, D. C. (1999). Automated characterization of weld defects detected by ultrasonic non—destructive testing. *SPIE, 655-662*.
- NDT net*. (19 de Julio de 2020). Obtenido de Nondestructive Material Testing with Ultrasonics: <https://www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke2.htm>
- Obraz, J. (1978). Dynamic evaluation of flaw size in ultrasonic testing of steel plates. *Ultrasonics, 218-222*.

- Ogilvy, J. (1989). Model for the ultrasonic inspection of rough defects. *Ultrasonics*, 69-79.
- Ogilvy, J. (1993). Model for predicting ultrasonic pulse-echo probability of detection. *NDT&E International*, 19-29.
- Olav Forli, K. O. (1999). *NT TECHN REPORT 427 GUIDELINES FOR DEVELOPMENT OF NDE ACCEPTANCE CRITERIA*. Oslo: Nordic Innovation Centre.
- Olsson, D. A. (1966). Ultrasonic Testing of Structural Welds. *48th Annual Meeting* (págs. 46-52). Highway Research Board.
- Olympus. (9 de Enero de 2020). <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/ultrasonic-transducer-technical-notes/>. Obtenido de <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/ultrasonic-transducer-technical-notes/>: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/ultrasonic-transducer-technical-notes/>
- Ono, K. (2020). A Comprehensive Report on Ultrasonic Attenuation of Engineering Materials, Including Metals, Ceramics, Polymers, Fiber-Reinforced Composites, Wood, and Rocks. *Appl. Sci.* 2020.
- Österberg, H. W. (2000). *Study of defect characteristics essential for NDT Testing Methods ET, UT and RT*. Sweden: SKI.
- Paul Holloway, A. C. (2017). Adapting CSA W59 ultrasonic inspections for use with distance-amplitude techniques. *NDT in Canada 2017 Conference*. Quebec.
- Paul Holloway, A. C. (2018). Distance-Amplitude Techniques and their Adaptation to Structural Steel Weld Inspection. *WELDING JOURNAL*, 38-47.
- Pietro Burrascano, S. C. (2015). *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems Industrial Application Issues*. Springer.
- Posakony, G. J. (1986). Experimental Analysis of ultrasonic Responses from Artificial Defects. *Materials Evaluation* 44, 1567-1572.
- Punjani, L. B. (1984). Review of some recent advances in quantitative ultrasonic NDT. *IEE PROCEEDINGS*, 265-274.
- R.L. Hockey, E. G. (1991). The Effect of equipment bandwidth and center frequency changes on ultrasonic reliability: are models too conservative? *review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Vol 10B*, 2251-2258.
- Raphaella H. F. Murta, F. d. (2018). Welding Defect Classification from Simulated Ultrasonic Signals. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1-10.

- Ripling, P. B. (1990). *Acceptance criteria for steel bridge welds*. Washington D. C: National cooperative Highway Research program.
- Robert E. Shaw Jr., P. M. (2002). Ultrasonic Testing Procedures, Technician Skills, and Qualifications. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, 62-67.
- Robert J. Connor, C. J. (2019). *Acceptance Criteria of Complete Joint Penetration Steel Bridge Welds Evaluated Using Enhanced Ultrasonic Methods*. Washington D. C: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM.
- Rumsey, J. C. (1960). Interpretation of ultrasonic echo amplitude. *BRITISH JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 25-29.
- Ryan, R. M. (2017). Is That Flaw Really There? *Ultrasonics for Nondestructive Testing 2017*.
- S. V. Ranganayakulu, S. G. (2017). Characterization of Weldments Defects through Non Destructive Evaluation Techniques. *Indian Journal of Science and Technology*, 1-9.
- S. Williams, P. M. (1985). Statistical aspects of defect evaluation using ultrasonics. *NDT INTERNATIONAL*, 123-131.
- Schlengermann, U. (1996). Characterization of Reflectors by Ultrasonic Methods. *The Echo*, 33-35.
- Shenefelt, G. A. (1971). Ultrasonic Testing Requirements of the AWS 1969 Building Code and Bridge Specifications. *Welding Journal*, 342-349.
- Song, S.-J. (1991). Ultrasonic flaw classification and sizing. Iowa State University Digital Repository.
- T. J. Jessop, P. J. (1981). *Report 242 - Ultrasonic Measurement of weld flaw Size*. Washington D.C: Transportation research Board.
- Tennakoon, T. (2010). Analysis software to interpret defects in ultrasonic testing. *International Journal of Structural integrity*, 85-93.
- Tennakoon, T. (15 de marzo de 2010). Characterization of weld defects in single V-butt welded mild steel plates using ultrasonic A-scan technique. *Tesis de Mestría*. Sri Lanka: University of Moratuwa.
- The British Institute of Nondestructive Testing*. (s.f.). Obtenido de <https://www.bindt.org/What-is-NDT/Ultrasonic-advanced-methods/>
- Thompson, R. B. (1983). Quantitative Ultrasonic Nondestructive evaluation Methods. *Journal of Applied Mechanics* 50, 1191-1201.

- Tomonori Kimura, S. W. (2010). Simulation of Ultrasonic Fields and Echoes Obtained Using Angle Beam Transducer by Hybrid FDTD Method. *E-Journal of Advanced Maintenance Vol.# (2010)*.
- Tutzschky, G. (1987). Detection of defects in ultrasonic weld testing. *WELDING INTERNATIONAL*, 380-382.
- VEQTER. (27 de Agosto de 2021). *The Ultrasound stress measurement technique is the only portable, non-destructive, through-thickness stress measurement technique and it is applicable to a wide range of materials*. Obtenido de <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/ultrasound>
- Virkkunen, M. K. (2011). Crack Characteristics and Their Importance to NDE. *J Nondestruct Eval*, 143–157.
- Visser Consultancy Limited. (2002). *POD/POS curves for non-destructive examination*. weybridge: HSE BOOKS.
- W.W. Sanders, J. a. (1966). *Study of inspection methos and quality control for welded highway structures*. Urbana, Illinois: University of Illinois.
- Wolf KLEINERT, Y. O. (2010). <http://www.ndt.net/forum/thread.php?forenID=1&rootID=8596#>. Obtenido de <http://www.ndt.net/forum/thread.php?forenID=1&rootID=8596#>.
- Woo, D. J. (s.f.). *History of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. Obtenido de <http://www.ob-ultrasound.net/sperry.html>