

Evaluación de la sensibilidad de la técnica de inspección *Time Of Flight Diffraction TOFD* en muestras con discontinuidades ideales inducidas por mecanizado.

Maria Fernanda Vera Daza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Carlos Andrés Galán Pinilla

Ph.D. en Ingeniería de Materiales

Codirectora

Ana María Pérez Ceballos

Ph.D. en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios por darme las habilidades y conocimientos para estar donde estoy, también haberme dado las fuerzas para continuar hasta el final.

A mis padres Marisol y Cesar, por ser el principal apoyo y motivo para lograr esta meta, también por brindarme sus consejos.

A mis primos Juliana y Luis por brindarme motivación y aclarar mis dudas en ciertas partes del proceso.

A mis amigos de la universidad y personas importantes en mi vida por su constante apoyo emocional, paciencia y por hacer este camino más agradable.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Universidad Industrial de Santander, por permitirme ser parte de ella y poder culminar esta meta de formarme profesionalmente.

Agradezco principalmente a mi director Carlos Andrés Galán Pinilla, por su compromiso, apoyo, disposición y guía durante el desarrollo de este proyecto. A mi codirectora, Ana María Pérez Ceballos quien también acompañó en este proceso y estuvo dispuesta a ayudar y resolver problemas.

A los técnicos de laboratorio que me guiaron a lo largo de mi proceso formativo y en el desarrollo del proyecto, en especial a Oscar Martínez Ramírez por su colaboración.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, por brindar su conocimiento y guía en el proceso académico y profesional de cada estudiante.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Marco Teórico.....	16
1.1 Generalidades de Ensayos No Destructivos	16
1.2 END por Ultrasonido	16
1.3 END por Ultrasonido <i>Time Of Flight Diffraction (TOFD)</i> : Principio físico.....	17
1.4 Formación de imágenes del sistema de inspección <i>TOFD</i>	18
2. Objetivos	20
2.1 Objetivo General	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
3. Metodología	21
3.1. Etapa 1: Realizar la revisión bibliográfica.....	21
3.2 Etapa 2: Elaborar las muestras de estudio.....	22
3.2.1 Actividad 1: Realizar el diseño del bloque patrón con las respectivas especificaciones.	24
3.2.2 Actividad 2: Fabricar el bloque patrón de acuerdo con el diseño.....	26
3.3 Etapa 3: Establecer un método de inspección para TOFD en el equipo Olympus OmniScan MX2	27
3.3.1 Actividad 1: Realizar la calibración del equipo con diferentes configuraciones.	27
3.3.2 Actividad 2: Establecer y verificar un método de calibración.	29
3.4 Etapa 4: Mediciones de las discontinuidades mediante la técnica TOFD	30
4. Resultados	31
4.1 Diseño de la muestra o bloque de estudio con discontinuidades artificiales	31

EVALUAR LA SENSIBILIDAD DE LA TÉCNICA TOFD

	5
4.2 Medición de las discontinuidades tipo barreno.....	34
4.3 Calibración del equipo y dimensionamiento de las discontinuidades.	36
4.4 Mediciones de las discontinuidades mediante la técnica TOFD	39
5. Conclusiones	50
6. Recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	52
Apéndices.....	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Normas Utilizadas en el proyecto.	22
Tabla 2. Factores para el diseño de experimentos.	23
Tabla 3. Información sobre el diseño factorial de múltiples niveles.	23
Tabla 4. Barridos del diseño de experimentos.	24
Tabla 5. Dimensiones del bloque y las discontinuidades.	32
Tabla 6. Medidas para el diseño de las discontinuidades tipo barreno.	32
Tabla 7. Mediciones realizadas con el microscopio Hirox KH-7700.	35
Tabla 8. Variables de calibración.	37
Tabla 9. Datos suministrados por el Olympus OmniScan mediante la técnica TOFD.	44
Tabla 10. Número de datos por fuera del rango de cada discontinuidad.	47
Tabla 11. Porcentaje de variación entre la media y el valor de referencia.	48
Tabla 12. Diseño de experimentos aleatorizado completo.	57
Tabla 13. Datos recolectados del OmniScan mediante TOFD.	63
Tabla 14. Medidas de tendencia central de la profundidad de la discontinuidad.	65
Tabla 15. Medidas de tendencia central del diámetro de la discontinuidad.	65
Tabla 16. Tabla resumida de factores.	66

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de la técnica TOFD.	18
Figura 2. Imágenes de señales A-scan y B-scan	19
Figura 3. Metodología del proyecto.....	21
Figura 4. Equipo Olympus OmniScan MX2.....	28
Figura 5. Kit HST-X04 de Olympus.....	29
Figura 6. Ejemplificación de la toma de dimensiones en la discontinuidad trabajada.	30
Figura 7. Diseño del bloque con sus medidas.....	33
Figura 8. Resultado final del bloque con sus caras.....	33
Figura 9. Bloque de Acero diseñado y mecanizado.....	34
Figura 10. Microscopio Hirox KH-7700.	34
Figura 11. Mediciones de las discontinuidades en el bloque con el microscopio Hirox KH-7700.	36
Figura 12. Imagen de la calibración del barrido parte 1.	38
Figura 13. Dimensionamiento de la discontinuidad correspondiente a la parte 2.	39
Figura 14. Discontinuidad uno con planes de inspección diferentes en el B-scan.	40
Figura 15. Discontinuidad dos, con planes de inspección diferentes en el B-scan.....	40
Figura 16. Discontinuidad uno con planes de inspección diferentes en el A-scan.	41
Figura 17. Discontinuidad dos con planes de inspección diferentes en el A-scan.	42
Figura 18. Interfaz del A-scan y B-scan de la discontinuidad uno.	43
Figura 19. Diagrama de Pareto de la profundidad y diámetro de la discontinuidad uno.....	46

Figura 20. Procedimiento seguido para la calibración del equipo en base al bloque diseñado ...	58
Figura 21. Imágenes de la inspección para cada discontinuidad ángulo 70°.....	59
Figura 22. Imágenes de la inspección para cada discontinuidad ángulo 60°.....	61
Figura 23. Reporte del Olympus OmniScan MX2.....	62
Figura 24. Diagramas de Pareto completos de la profundidad.	67
Figura 25. Diagramas de Pareto para el diámetro.....	68

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Diseño de experimentos aleatorizado.	57
Apéndice B. Procedimiento de calibración del equipo	58
Apéndice C. Imágenes de la Interfaz del OmniScan.	59
Apéndice D. Reporte del Olympus.	62
Apéndice E. Datos recolectados de cada barrido realizado.	63
Apéndice F. Medidas de tendencia central para el diámetro de cada discontinuidad.....	65
Apéndice G. Diagrama de Pareto.....	66

Glosario

A-scan: Es el diseño de pantalla de forma de onda, en donde se visualiza la amplitud del eco en el eje vertical y el tiempo de tránsito en el eje horizontal los cuales son trazados en una cuadrícula simple con el eje vertical que representa la amplitud, y el eje horizontal, el tiempo (Olympus, 2022).

B-scan: Es la imagen producida de cuando los datos recopilados de una inspección ultrasónica donde se visualiza una vista transversal del componente.

Calibración: La calibración significa utilizar un estándar de medición, para determinar la relación entre el valor mostrado por el instrumento de medición y el valor verdadero. (Keyence, 2023)

Codificador (*encoder*): Es un dispositivo que genera pulsos, donde convierte la longitud del objeto en impulsos eléctricos.

Discontinuidades: Se definen por lo general como “una interrupción en la estructura física o configuración de una pieza bajo examen” la cual puede o no, estar en detrimento para lo que fue construido o diseñado. (Emilio, 2019) (ASTM INTERNATIONAL, 2023)

Frecuencia: Es el número de oscilaciones de la partícula vibrante por segundo o se puede decir también que es el número de ciclos de una onda por unidad de tiempo. (Decodifica Imágenes Enviadas desde la ISS, s.f.)

Mecanizado: El mecanizado es el conjunto de procesos industriales (corte, marcado, prensado, agujereado, etc.) realizados en una pieza de materia prima (generalmente metálica, pero también puede ser de cerámica, madera o plástico, entre otros) para darle una forma y tamaño final deseados limando el material sobrante de forma controlada. (Planes, 2016)

Sensibilidad: Es la relación entre la amplitud del impulso de excitación y aquella del eco recibido a partir del objetivo determinado (Olympus, sf).

Transductor: Es la parte que emite y recibe las señales de onda ultrasónica que proporcionan la información que se requiere cuando se buscan discontinuidades o se miden los espesores de un material. (Paulina & Edwin, sf)

Zapatas: Las zapatas (suelas) están diseñadas para efectuar escaneos manuales. Son bloques de plástico, como el rexolite, planos que se usan para acoplar la energía acústica (y para proteger la parte frontal de la sonda de rasguños o abrasión) en escaneos lineales rectos como, también, en escaneos angulares con ondas longitudinales de ángulo bajo para la técnica *TOFD* (Olympus, sf).

Resumen

Título: Evaluación de la sensibilidad de la técnica de inspección *Time Of Flight Diffraction TOFD* en muestras con discontinuidades ideales inducidas por mecanizado*

Autor: Maria Fernanda Vera Daza**

Palabras Clave: Ensayos No Destructivos, Discontinuidades, *Time Of Flight Diffraction*, Calibración, Sensibilidad, Ultrasonido, Mecanizado.

Descripción: En este trabajo de grado se presenta una metodología en donde se realizó la evaluación de la sensibilidad de la técnica de inspección *Time Of Flight Diffraction TOFD* en muestras con discontinuidades ideales inducidas por mecanizado en un acero ASTM A36 al carbono. El objetivo se abordó diseñando y fabricando un bloque con dos caras (muestras) con discontinuidades ideales tipo barreno lateral con diferentes profundidades y ubicaciones, las cuales fueron mecanizadas por electroerosión por penetración (EDM). Una vez obtenido el bloque y establecido el procedimiento de calibración del equipo Omniscan MX2 se realizaron mediciones en laboratorio según el diseño de experimentos factorial multinivel propuesto con diferentes planes de inspección que incluyeron el cambio de los factores de interés en el presente trabajo, donde dichos planes de inspección se ejecutaron de forma aleatoria. Como resultado se logró dimensionar y ubicar las discontinuidades con el equipo. Una vez interpretadas las imágenes, guardados los datos y obtenidos los resultados de los informes del OmniScan se realizó un análisis estadístico donde se demostró que factores afectan en mayor medida la sensibilidad en el dimensionamiento de las discontinuidades. También se observó cuantos datos de los barridos realizados estuvieron fuera del rango establecido y el porcentaje de variación en la detección de las discontinuidades respecto a los valores de referencia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. PhD. en Ingeniería de Materiales. Codirectora: Ana María Pérez Ceballos. PhD. en Ingeniería.

Abstract

Title: Evaluation of the sensitivity of the *Time Of Flight Diffraction TOFD* inspection technique in samples with ideal machining-induced discontinuities*

Author(s): Maria Fernanda Vera Daza**

Key Words: Non-destructive testing, Discontinuities, *Time Of Flight diffraction*, Calibration, Sensitivity, Ultrasound, Machining.

Description: In this degree work, a methodology is presented in which the sensitivity evaluation of the Time Of Flight Diffraction TOFD inspection technique was performed on samples with ideal discontinuities induced by machining in an ASTM A36 carbon steel. The objective was approached by designing and manufacturing a block with two faces (samples) with ideal side-hole type discontinuities with different depths and locations, which were machined by die sinking electrical discharge machining (EDM). Once the block was obtained and the calibration procedure of the Omniscan MX2 equipment was established, laboratory measurements were performed according to the proposed multilevel factorial design of experiments with different inspection plans that included the change of the factors of interest in this work, where these inspection plans were randomly executed. As a result, the discontinuities were sized and located with the equipment. Once the images were interpreted, the data were saved and the results of the OmniScan reports were obtained, a statistical analysis was performed where it was shown which factors affect the sensitivity in the sizing of the discontinuities to a greater extent. It was also observed how many data of the sweeps performed were out of the established range and the percentage of variation in the detection of discontinuities with respect to the reference values.

* Degree Work

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. PhD. en Ingeniería de Materiales. Codirectora: Ana María Pérez Ceballos. PhD. en Ingeniería.

Introducción

Los ingenieros metalúrgicos se destacan, entre otras, por sus conocimientos acerca de los metales y sus aleaciones, de su obtención, el procesado y fabricación, de su comportamiento y el posible deterioro en servicio. Es por esto, que en muchas de estas aplicaciones es necesario garantizar su calidad e integridad para que su operación sea segura. Para dar solución a estas exigencias, se recurre a la aplicación de múltiples Ensayos No Destructivos (END), los cuales permiten detectar y caracterizar diferentes tipos de daños o discontinuidades oportunamente, sin que los elementos examinados reciban alteraciones de forma permanente en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales (Santos De La Cruz et al., 2014). Una de las técnicas avanzadas de inspección en los END es el *Time Of Flight Diffraction* (TOFD, por sus siglas en inglés), la cual se aplica principalmente en la inspección de piezas soldadas, tuberías, placas y contenedores (Olympus, 2022). Al ser comparada con otras técnicas presenta una mayor velocidad de escaneo para la detección de discontinuidades internas (Carillo, 2021), además de esto, permite determinar la altura de la discontinuidad, así como su localización, la cual no depende de la orientación de las discontinuidades presentes. Pese a su funcionalidad, el uso de TOFD está condicionado a variables como el ángulo del haz difractado, la profundidad, las dimensiones y posición de las discontinuidades encontradas con la técnica (Mayworm et al., 2021), entre otras variables, las cuales pueden reducir o aumentar la sensibilidad al realizar su caracterización dimensional y de localización; sumado a esto, hay limitaciones relacionadas con la inspección de espesores menores a 12 mm (BIRRING, 2020). Además, la calibración es un reto debido a la poca información sintetizada que se tiene para realizarla. Por este motivo, en este proyecto de grado se buscó establecer planes de inspección con la técnica TOFD implementada con el equipo Olympus

Omniscan MX2 y utilizando discontinuidades ideales conocidas, planteando la pregunta de investigación: ¿Es posible evaluar el efecto estadístico de algunas variables de inspección sobre la sensibilidad de la técnica *TOFD* aplicada en muestras con discontinuidades inducidas? Para resolver la pregunta, se planteó realizar una serie de experimentos que permitieran estimar la sensibilidad de la técnica utilizando un bloque diseñado y fabricado con discontinuidades ideales de dimensiones conocidas al ser inducidas por un mecanizado de electroerosión (EDM).

1. Marco Teórico

1.1 Generalidades de Ensayos No Destructivos

Los Ensayos No Destructivos (*END*) tienen como una de las principales funciones examinar el estado de diferentes tipos de materiales sin que estos lleguen a recibir alteraciones permanentes en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y dimensionales (Ferrer-Dalmau, 2017). Cuando la inspección se lleva a cabo en el proceso de fabricación se busca confirmar la calidad de las piezas y que cumplan con la normativa necesaria para su puesta en funcionamiento. Durante el servicio los componentes se someten a inspecciones programadas periódicamente para determinar si pueden seguir en servicio de manera segura. Para una adecuada ejecución de este tipo de ensayos es necesario el uso de secuencias de calibración y estándares usados como referencia para comparar y asegurar los resultados obtenidos. Entre las principales entidades que presentan normas o códigos de fabricación se encuentran ASME, ASTM, AWS y API, entre otros. (Rodríguez, 2012).

1.2 END por Ultrasonido

Los END por ultrasonido o pruebas UT (por sus siglas en inglés), son usados para conocer internamiento o el volumen de un material o una estructura, ya sea una pieza fundida, soldada o conformada, donde se pueden llegar a presentar discontinuidades. Estas anomalías se pueden evaluar dependiendo, entre otras, de la trayectoria de propagación de las ondas, entregando información acerca de la forma, tamaño y orientación de la discontinuidad debido a la resistencia que opone ésta al paso de la onda (Santos De La Cruz et al., 2014).

Para el método ultrasónico se utilizan frecuencias que se encuentran comúnmente en el rango de 500 KHz a 20 MHz, siendo común en el *TOFD* entre 5 y 10 MHz, así como instrumentos

que transmiten ondas en intervalos de frecuencia determinados. En diversas aplicaciones industriales este ensayo es aplicado en materiales metálicos, plásticos, cerámicos y compuestos, siendo un ensayo no recomendado en productos de madera y papel (Non Destructive Testing – Ultrasonic Testing, 2022).

1.3 END por Ultrasonido *Time Of Flight Diffraction (TOFD)*: Principio físico

El *TOFD* es una técnica ultrasónica de END la cual se propuso por primera vez en 1977 (Merazi- Meksen et al., 2014), y era destinada principalmente para examinar e inspeccionar soldaduras con cordones circunferenciales y axiales. Esta técnica es el resultado de la necesidad de dimensionar el tamaño real de las discontinuidades y puede ejecutarse tanto de manera manual como de manera automatizada (Olympus, 2022).

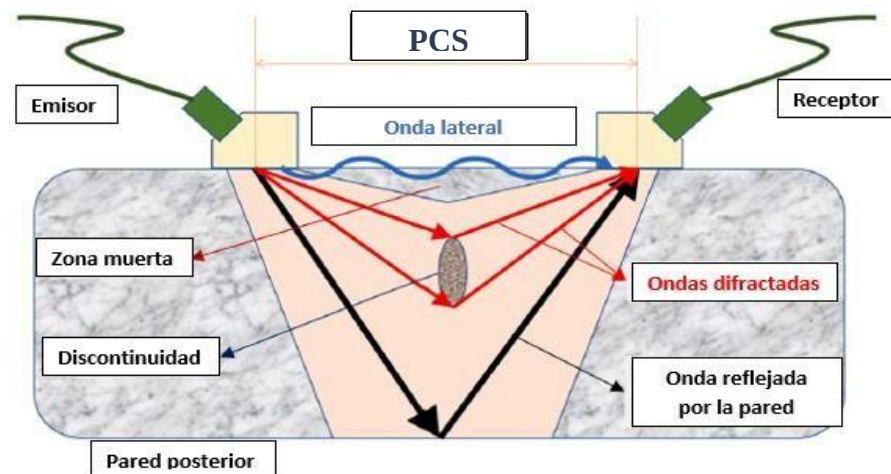
La técnica *TOFD* se basa en la ubicación de dos sondas acopladas en zapatas angulares, que se encuentran en paralelo y en la misma superficie, dichas sondas se encargan de generar un pulso ultrasónico desde el transductor transmisor (T_x) el cual es recibido por el transductor contrario o transductor receptor (R_x), las sondas cuentan con la misma frecuencia, ángulo de incidencia y tamaño. La distancia que se encuentra entre las dos sondas o transductores es un parámetro crítico y se conoce como *Probe Separation Center* (PCS, por sus siglas en inglés) y está en función del espesor del material de inspección. Por lo general, los escáneres se desplazan en paralelo a la región de interés o la zona en la cual es más probable encontrar discontinuidades (J Casagua, 2020).

En la aplicación convencional del TOFD generalmente el transductor Rx recibe dos ondas, una que se desplaza sobre la superficie frontal del material en inspección (onda lateral) y otra que se desplaza a través del material y se refleja en la parte o superficie posterior de la pieza en

inspección (onda de pared posterior), como se muestra en la Figura 1. En el momento en que el haz ultrasónico se encuentra con una discontinuidad se produce una difracción de la onda a medida que se lleva a cabo el recorrido de esta, al medir el tiempo de vuelo del pulso generado se puede calcular adecuadamente la profundidad de la discontinuidad presente, así mismo, utilizando el tiempo de vuelo de las ondas difractadas se determina el tamaño y la posición de las discontinuidades presentes en la pieza o material en inspección (Mayworm et al., 2021). A continuación, se describe el proceso para la generación de las imágenes de *TOFD*.

Figura 1.

Esquema de la técnica TOFD.



Nota: Representación esquemática de la técnica *TOFD* con ondas difractadas. Tomado y adaptado de: (Mayworm et al., 2021).

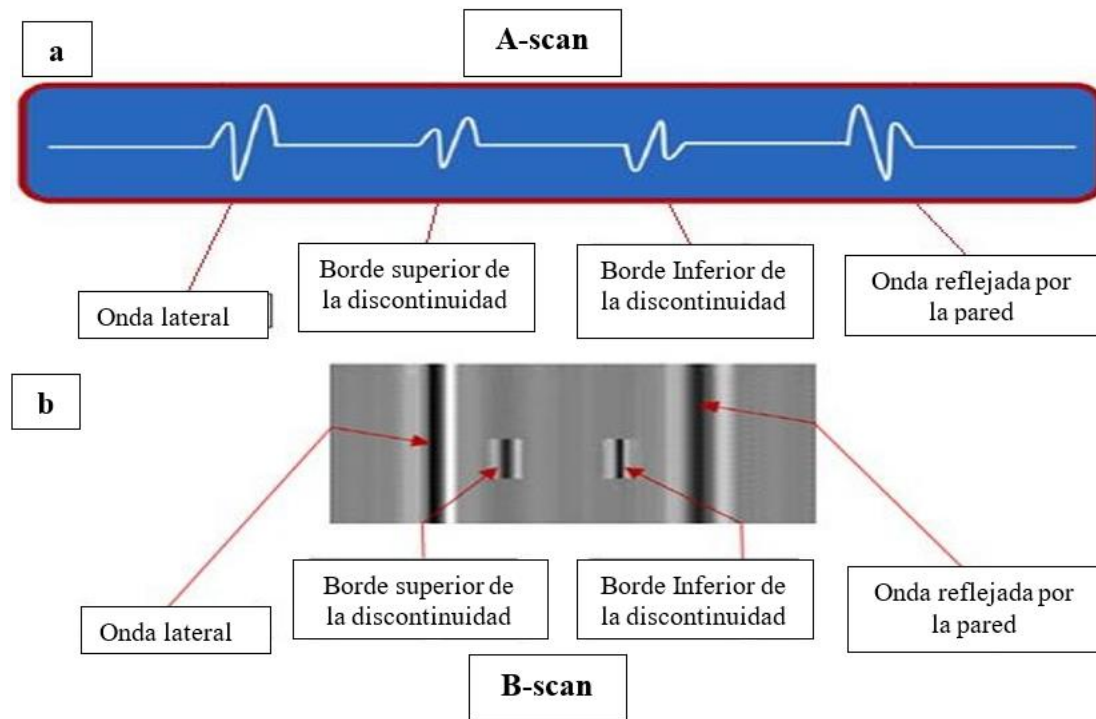
1.4 Formación de imágenes del sistema de inspección *TOFD*

En *TOFD* se usan señales A-scan (Figura 2.a) las cuales se toman y transforman en imágenes B-scan (Figura 2.b), las señales A-scan son visualizaciones de amplitud de las señales vs tiempo de vuelo de las ondas, el uso de estos puede arrojar información para la detección de

discontinuidades, permite medir espesores, la velocidad, la atenuación y la geometría del haz ultrasónico. Las señales A-scan ubicadas una junto a la otra generan una imagen B-scan, las imágenes obtenidas por este método suelen ser entregadas en una escala de colores de grises donde las señales positivas tienen tendencia al color blanco y las señales negativas al color negro, como se observa en la Figura 2.b (Mayworm et al., 2021).

Figura 2.

Imágenes de señales A-scan y B-scan



Nota. (a) Diagrama de la medición A-scan TOFD. (b) Imagen característica de una señal B-scan generada a partir de señales A-scan. Tomado y adaptado de: (Mayworm et al., 2021).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la sensibilidad de la técnica de inspección *Time Of Flight Diffraction (TOFD)* en muestras con discontinuidades ideales inducidas por mecanizado.

2.2 Objetivos Específicos

Diseñar y fabricar un bloque patrón con las discontinuidades ideales inducidas artificialmente por mecanizado para la evaluación de sensibilidad de la técnica *TOFD*.

Establecer un método de calibración para técnica *TOFD* implementado con el equipo Olympus Omniscan MX2 usando un bloque de referencia.

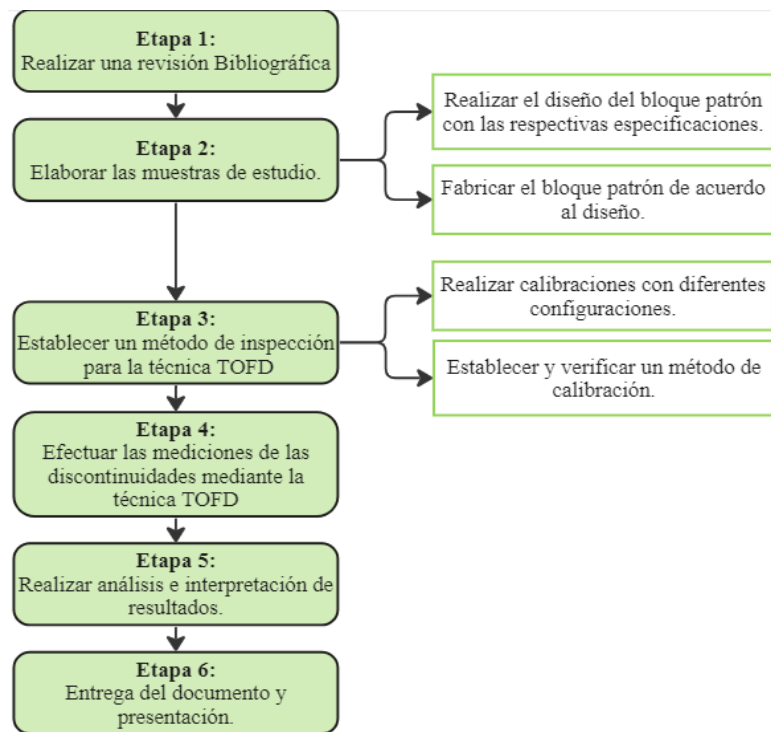
Evaluar el efecto estadístico de las variables de inspección de la técnica *TOFD* seleccionadas sobre la sensibilidad en la detección y dimensionamiento de las discontinuidades de referencia inducidas en un bloque patrón.

3. Metodología

En la Figura 3 se encuentra la metodología que se llevó a cabo a lo largo del presente proyecto, la cual se encuentra dividida en etapas y algunas de ellas divididas en actividades, seguidamente se describe cada una de estas.

Figura 3.

Metodología del proyecto.



3.1. Etapa 1: Realizar la revisión bibliográfica

Durante el desarrollo del proyecto se llevó a cabo la revisión bibliográfica, donde por medio del material consultado, se reunió y estudio la información relevante para su desarrollo, a través de las bases de datos, artículos, libros, normas, manuales, entre otros. Se hizo énfasis en los parámetros de configuración de la técnica de inspección, la sensibilidad y probabilidad de detección de discontinuidades asociados con la técnica *Time Of Flight Diffraction*. A continuación,

en la Tabla 1 se presentan en detalle los códigos y normas donde se incluye el uso de bloques patrón para calibraciones y verificaciones y de donde se tomaron criterios para el diseño propio.

Tabla 1.

Normas Utilizadas en el proyecto.

AUTORES	TÍTULO	RESULTADOS
ASME BPVC.V - 2023	Section V Article 4 “Nonmandatory Appendix J” “Nonmandatory Appendix N”	Bloque de calibración básica alternativa. Interpretación de Difracción del tiempo de vuelo.
ASME B31.1-2022	“Power Piping”	Criterios de aceptación alternativos para ultrasonido.
ASTM E2373/E2373M – 19	“Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique”	Procedimientos, registro de datos y limitaciones.
ISO 10863:2020	“Non-destructive testing of welds – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD)”	Criterio de aceptación y rechazo.

3.2 Etapa 2: Elaborar las muestras de estudio

En esta etapa se presenta el desarrollo realizado para la elaboración del bloque patrón partiendo de la bibliografía consultada en la Etapa 1. Para tal fin se realizó un diseño de experimentos, el cual se detalla a continuación.

Se diseñó y fabricó un bloque patrón con discontinuidades tipo barreno lateral sobre las que se realizaron las mediciones dimensionales con la técnica *TOFD* empleando el equipo mencionado. Con el fin de evaluar el efecto estadístico de las variables seleccionadas del estudio bibliográfico, se realizó un diseño de experimentos factorial multinivel, lo que permitió definir la cantidad de mediciones a ejecutar. Con el estudio de las variables dimensionales del bloque patrón y las del ultrasonido *TOFD* a configurar en el plan de inspección del equipo se lograron definir los factores y variables independientes, con las cuales se realizó el diseño de experimentos. Los

factores se representaron con las letras A, B, C, D, como se presenta en la Tabla 2. En esta tabla se indica para cada factor el valor configurado en el plan de inspección de cada barrido específico y la referencia (REF.) utilizada para el análisis estadístico.

Tabla 2.

Factores para el diseño de experimentos.

FACTOR	LETRA	VALORES	REF.	FACTOR	LETRA	VALORES	REF.
Energía (V)	A	50	1	Frecuencia	B	60	1
		100	2	de		Optimum	2
		200	3	adquisición (Hz)		Auto máx.	3
Frecuencia (MHz)	C	5	1	Ángulo	D	60	1
		10	2	(°)		70	2

Nota. Variables con sus respectivas letras, valores y referencia (REF.) utilizados para realizar el diseño de experimentos.

Con los cuatro factores de estudio A, B, C y D y los respectivos valores se desarrolló la combinación aleatoria entre ellos, donde se utilizó el software *Minitab* para crear el diseño de experimentos factorial de múltiples niveles y definir los barridos a realizar sobre el bloque diseñado y elaborado. Cada factor presenta los valores para cada nivel. Por otra parte, cada medición se realizó con una réplica, con el fin de obtener un mejor resultado estadístico y el valor promedio de cada discontinuidad, el resumen del diseño de experimentos se encuentra en la Tabla 3, la cual fue generada por el software mencionado.

Tabla 3.

Información sobre el diseño factorial de múltiples niveles.

Factores	4	Réplicas	2
Barridos base	36	Total, de barridos	72

Con base en estos resultados se logró obtener el diseño de experimentos con sus respectivas combinaciones, las cuales se ejecutaron en el laboratorio en el orden según corresponde. En la Tabla 4 se indica el número de experimentos, mostrando únicamente las combinaciones para las mediciones de la 1 a la 10 de las 72, que es el número total de experimentos realizados y que combina los factores según el diseño de experimentos. En la tabla se indica la referencia para cada factor A, B, C y D, asignada según se indicaron en la Tabla 2. En el Apéndice A, se muestra el diseño de experimentos completo. A continuación, se detalla la forma como se diseñó y fabricó el bloque.

Tabla 4.

Barridos del diseño de experimentos.

FACTOR	N° experimento									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	3	3	1	2	1	1	3	3	3	2
B	3	2	3	1	3	2	3	2	1	1
C	1	1	2	1	1	2	2	1	2	1
D	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2

Nota. Ejemplo de los primeros diez barridos con su combinación aleatorizada.

3.2.1 Actividad 1: Realizar el diseño del bloque patrón con las respectivas especificaciones.

Con base en la información del diseño de experimentos mostrado en las tablas (2, 3 y 4), se realizó el diseño del bloque patrón. Para esto también se tuvo en cuenta la información consultada en el código ASME, como fue la ubicación de referencia de la discontinuidad en el bloque de calibración, ya que en la sección V se encuentra información sobre la descripción de los bloques de calibración, y señala que: “Todos los orificios deben estar ubicados en la misma cara del bloque y alineados en el centro aproximado de la cara (lado) a menos que la indicación de un reflector afecte a la indicación de otro. En estos casos, los agujeros pueden estar ubicados en caras

opuestas del bloque” (The American Society of Mechanical Engineers, 2023). Basados en la información anteriormente estudiada, se determinó que el bloque tuviera forma plana tipo placa con espesor de 12 mm. Se definió este espesor, dado que se reportan posibles limitaciones de la técnica para espesores iguales o menores a este valor (BIRRING, 2020). Para ubicar las discontinuidades tipo barreno mecanizadas, se tuvo en cuenta la separación entre ellas para facilitar su detección con el escáner de uso industrial y disponible en el laboratorio, para lo cual se estableció una longitud y ancho del bloque de 200 mm. Dichas dimensiones garantizaron la posibilidad de desplazar el escáner con los transductores de diferente ángulo de refracción con uso de un *encoder* de posicionamiento por la superficie. De esta forma se garantizó que se cubrieran las discontinuidades mecanizadas, al igual que tener espacio para las distancias PCS (*Probe Center Separation*) utilizadas entre los transductores. Para definir las dimensiones de las discontinuidades del bloque patrón se tuvieron en cuenta las especificaciones y requerimientos establecidos en el código ASME sección V artículo 4, Mandatorio apéndice III (ASME, 2017), de la norma ASTM E2373 *Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction* (ASTM, 2022) y resultados presentados en investigaciones realizadas anteriormente (Carrillo & Galán, 2021). El bloque con sus dimensiones y distribución de los barrenos se muestra en el siguiente capítulo.

Con base en los requisitos mencionados, los criterios de aceptación y rechazo para discontinuidades en soldaduras mencionados en la Tabla 1, así como también el proceso de fabricación asequible en términos de costo, disponibilidad local y objetivo de inspección, se definió la morfología y dimensiones exactas de cada discontinuidad. Adicionalmente, dado que una de las limitaciones de la técnica *TOFD* es la presencia de zonas muertas en la pared frontal y pared posterior de la pieza de estudio, se omitieron las discontinuidades mecanizadas desde las superficies superior e inferior del bloque. Con base en todo lo anterior, se diseñó el bloque con

discontinuidades tipo barreno de perforación lateral, para lo cual se tienen diferentes ubicaciones de los barrenos de igual diámetro en todos los casos.

3.2.2 Actividad 2: Fabricar el bloque patrón de acuerdo con el diseño.

Con base en el diseño del bloque de estudio se realizó el mecanizado de las discontinuidades teniendo en cuenta su forma y ubicación según la Tabla 5. Seguidamente, se consideró la medida de las discontinuidades tipo barreno de 2 mm de diámetro, como se muestra en la misma Tabla 5. Con respecto a la distancia entre barrenos se escogieron para estimar la facilidad con que el equipo podía evaluar su detección como se observa en la Tabla 6, aspectos que pueden visualizar en las Figura 7 y Figura 8 en la sección de resultados del siguiente capítulo.

Para obtener las discontinuidades tipo barreno se seleccionó el método de mecanizado por electroerosión por penetración, también conocido como mecanizado por descarga eléctrica (*EDM*) (Modern Machine Shop México, 2022), así mismo se tuvo en cuenta que el corte del bloque se realizó por oxicorte.

Discontinuidades inducidas: El proceso de electroerosión por penetración consistió en ingresar el bloque en una máquina electroerosionadora, donde se colocó un electrodo de grafito y se dispuso el bloque en un fluido en circulación, donde el electrodo cumplió la función de ser herramienta de corte, y dio como resultado el bloque (ver la Figura 9 del capítulo de resultados). Con el bloque diseñado y mecanizado se procedió a preparar la superficie de este, para poder mejorar el desplazamiento de los transductores por el bloque de manera que se facilite realizar el barrido. Para la preparación de la superficie fue necesario utilizar la grata y después en el laboratorio se lijo la superficie con lijas número 120, 320 y 600.

Tamaño de las discontinuidades: Con el fin de verificar el tamaño de las discontinuidades mecanizadas y tener un valor de referencia para comparar las mediciones realizadas con *TOFD* se

hizo una caracterización dimensional de los diámetros en superficie usando el microscopio *Hirox KH-7700*. Para obtener estas medidas fue necesario, entre otras, ubicar cada discontinuidad a cierta distancia del microscopio, enfocar y capturar la imagen para utilizar las herramientas de medición del equipo y configurar los tres cursores (ver Figura 11) que se presentan en el capítulo de resultados, y que permitieron obtener la distancia de la superficie al inicio de la discontinuidad (profundidad), y el diámetro que comprendía el inicio de la discontinuidad al final de esta.

3.3 Etapa 3: Establecer un método de inspección para TOFD en el equipo Olympus OmniScan MX2

Para la configuración del equipo se realizó una capacitación de este a partir del manual del usuario, y documentos relacionados para poder llevar a cabo su respectivo funcionamiento. Seguidamente, se procedió a realizar la calibración del Olympus OmniScan MX2 por lo que esta etapa se dividió en dos actividades: La primera corresponde a la calibración y la segunda a su verificación.

3.3.1 Actividad 1: Realizar la calibración del equipo con diferentes configuraciones.

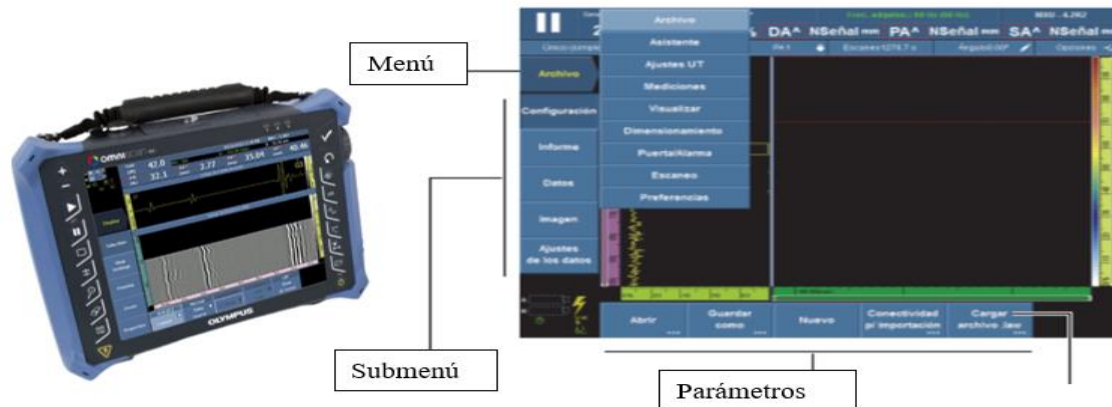
Como primer paso se realizó una caracterización de equipo, identificando los aditamentos disponibles y el uso del software. Seguidamente, se procedió a iniciar las calibraciones del equipo de acuerdo con los requisitos presentes en los códigos, normas mencionadas y el manual del equipo donde se sigue un paso a paso en un orden específico.

El equipo *Olympus OmniScan MX2* cuenta con un módulo *PA-TOFD* y conexiones respectivas para realizar dichas mediciones, el cual operó con el software *MXU 4.2*, y las datas fueron analizadas con el software de ayuda *OmniPC versión 5.13.0*. En la Figura 4 se muestra el

equipo, la distribución de los botones, menús, submenús y zona de configuración de parámetros. Seguidamente se indican los aditamentos del equipo que se pueden observar en la en la Figura 5.

Figura 4.

Equipo Olympus OmniScan MX2



Nota. (A). Equipo Olympus OmniScan MX2. (B). Componentes de la ventana del software OmniScan. Tomado y adaptado de: (Olympus, sf).

Para poder realizar la inspección *TOFD* fue necesario contar con el resto de las herramientas del kit *Olympus* como:

Sondas (Palpadores): Incluía dos sondas con una frecuencia 5 MHz y dos de 10 MHz con un diámetro de elemento de 3 mm. Referencias C543-SM y C544-SM respectivamente.

Suelas (Zapatas): Tres juegos de cuñas ST1 con pasadores de desgaste, con ángulos de inclinación de 45°, 60° y 70°. Pero por el espesor del bloque solo fueron utilizadas en este caso las de 60° y 70°, con las referencias ST1-60L-IHC y ST1-70L-IHC. Se utilizaron los ángulos anteriormente mencionados basados en el material estudiado (ASTM INTERNATIONAL, 2023) donde se recomendaba que eran los más adecuados para la técnica *TOFD*.

Adaptador: Se contaba con el cable del codificador, pero con una entrada diferente a la del equipo por lo que fue necesario un adaptador para el codificador.

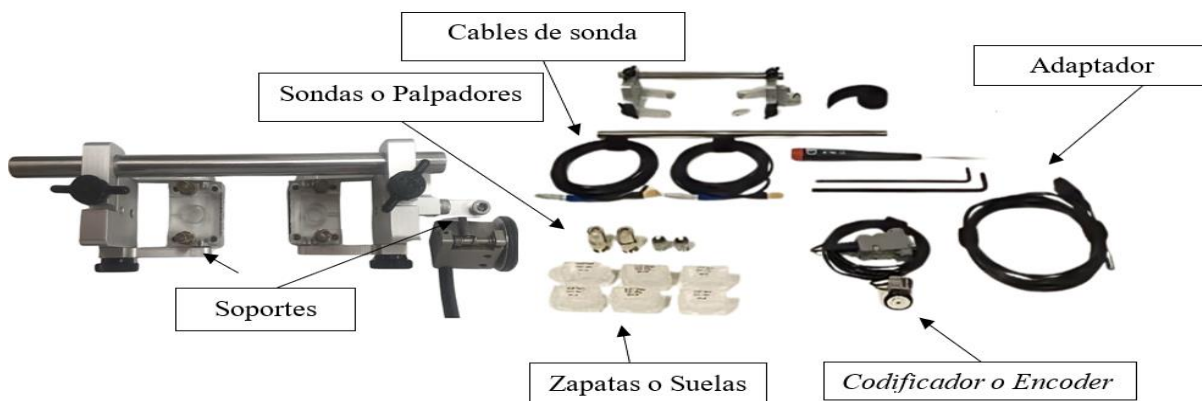
Codificador (Encoder): Contaba con una mini rueda accionado. Con una resolución de 12 pasos/mm de cuadratura.

Soportes: Para posicionamiento flexible del codificador.

Cables de sonda: Dos cables LEMO®-Microdot® de 2,5 m de largo.

Figura 5.

Kit HST-X04 de Olympus.



Nota. Kit HST-X04 TOFD de Olympus con cada uno de sus componentes. Tomado y adaptado de: (Olympus, sf).

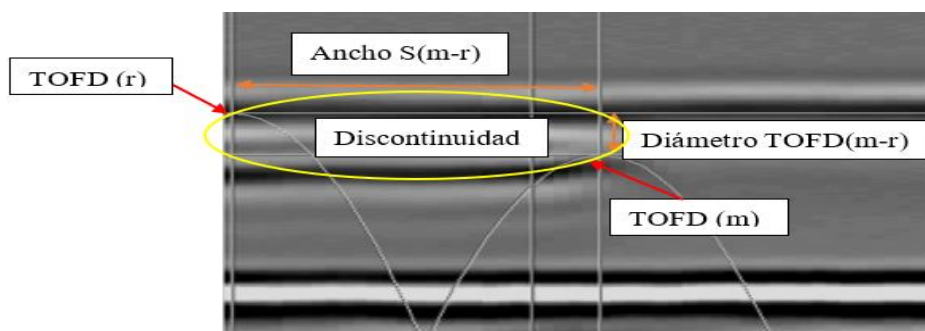
3.3.2 Actividad 2: Establecer y verificar un método de calibración.

Una vez realizada la calibración del equipo, se estableció que una manera para poder determinar que la calibración es satisfactoria, es cuando la velocidad en el material es cercana a la estándar, y el PCS es cercano o igual al proporcionado de acuerdo con la configuración que se tiene del ángulo dispuesto de la zapata y el espesor del bloque (The American Society of Mechanical Engineers, 2023). La diferencia de la velocidad en el material puede estar en un rango máximo por encima y debajo de 40 m/s y el PCS deberá estar en un rango de entre 1-2 mm como máximo de diferencia.

Dimensionamiento de los barrenos: El tamaño de la discontinuidad tipo barreno está establecido por su ancho y profundidad como se observa en la visualización *TOFD* de la Figura 6 y se detalla a continuación. Para este caso, la altura, que corresponde al diámetro del barreno, está determinada por la diferencia de la distancia vertical entre los ecos positivos y negativos, en este caso, el equipo lo proporciona como la medición $TOFD(m-r)$, y el ancho se establece como la diferencia de la distancia horizontal entre el primer borde del inicio de la discontinuidad y el ultimo borde del final de la discontinuidad donde es representada en el equipo con la medición $S(m-r)$, la profundidad se representa por $TOFD(r)$ que es donde inicia la discontinuidad, y finalmente, $TOFD(m)$ que es donde finaliza la indicación de la discontinuidad. Dicho dimensionamiento se presenta en la sección de resultados.

Figura 6.

Ejemplificación de la toma de dimensiones en la discontinuidad trabajada.



3.4 Etapa 4: Mediciones de las discontinuidades mediante la técnica TOFD

Después de la calibración del equipo con el bloque fabricado se iniciaron las pruebas de inspección para interpretar las imágenes emitidas por el equipo. Después de realizados los barridos con cada plan de inspección se evaluó la sensibilidad de la técnica, seguidamente se realizó el cambio de variables inspección según el diseño de experimentos indicado en la Etapa 2.

Con los datos proporcionados por el equipo *OmniScan MX2* se realizó un análisis estadístico, para poder estudiar el efecto de las variables de estudio sobre la sensibilidad de la técnica *TOFD* en cuanto a detección y dimensionamiento, observar que margen de variación posee y a su vez para resaltar que factores influyen en la inspección. Con los 72 barridos realizados se desarrolló la inspección de las siete (7) discontinuidades de las cuales se recolectaba la información del diámetro de la discontinuidad, tipo barreno y la profundidad a la que se encontraba en referencia a la superficie. Por lo que al final se obtuvieron 1.008 datos debido a que se tomaban en cuenta la medida de la profundidad y el diámetro de cada discontinuidad, teniendo en cuenta la réplica realizada en las mediciones. Todos los datos mencionados hicieron parte del análisis estadístico que se muestra a en la sección de resultados. Donde se tuvieron en cuenta las variables que se mencionan a continuación.

Variables (1):

Energía (V), Frecuencia de adquisición (MHz), Frecuencia (MHz), Angulo (°).

Variables (2):

Diámetro (mm), Profundidad (mm).

4. Resultados

Con base en la metodología anteriormente mencionada en este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el estudio.

4.1 Diseño de la muestra o bloque de estudio con discontinuidades artificiales

A continuación, en la Tabla 5 se presentan las dimensiones del bloque y el esquema, indicando las caras por donde se realizaron los barrenos, la distribución de estos mismos y el rango de profundidades obtenidas en el mecanizado. En la Tabla 6 se presenta la información sobre las

medidas para el diseño de los barrenos de acuerdo a la cara (1) o (2) del bloque, donde el eje X indica la distancia horizontal y el eje Y la distancia vertical a la que va a ir ubicada la discontinuidad tipo barreno en el bloque, con respecto al borde escogido del bloque para cada cara y el espesor de esta.

Tabla 5.

Dimensiones del bloque y las discontinuidades.

DIMENSIONES DEL BLOQUE	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)
	200	200	12
DIMENSIONES DE LOS BARRENOS	Diámetro (mm)	Profundidad (mm)	
	2	40-60	

Tabla 6.

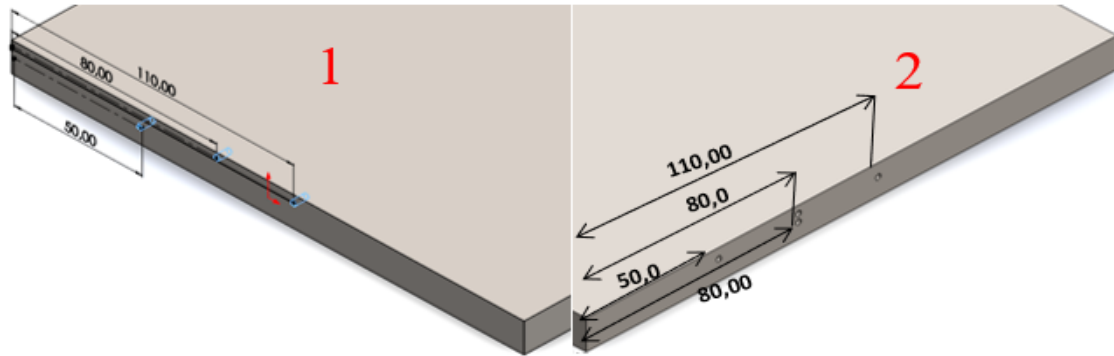
Medidas para el diseño de las discontinuidades tipo barreno.

Cara del bloque	Número De Barrenos	Eje X (mm)	Eje Y (mm)
1	1	50	6
	2	80	2
	3	110	3
2	4	50	4
	5	80	6
	6	80	3
	7	110	5

Con las dimensiones definidas se realizó el diseño del bloque en SolidWorks con sus respectivas especificaciones mencionadas en las tablas descritas anteriormente como se pueden observar en la Figura 7 y en el isométrico de la Figura 8. Para el barreno 5 y 6 se tiene la misma distancia (Y) de 80 mm dado que son dos barrenos alineados verticalmente con el fin de comprobar las mediciones con la técnica *TOFD*.

Figura 7.

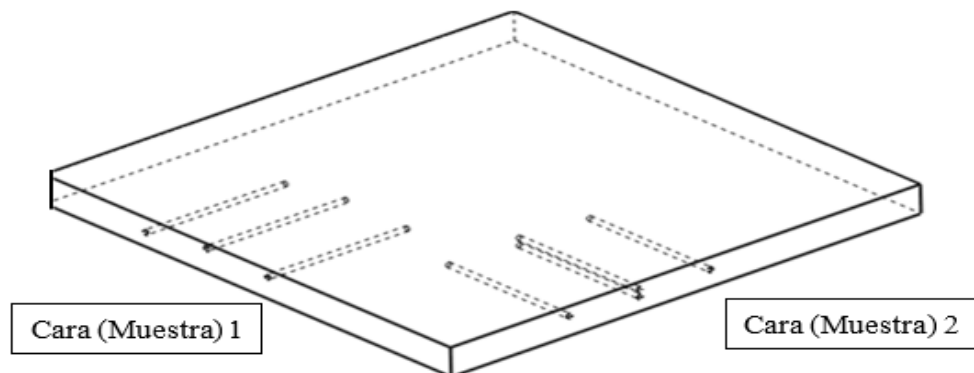
Diseño del bloque con sus medidas.



Nota. En la cara 1 del bloque se ubican los primeros tres barrenos y en la cara 2 del bloque se ubican los siguientes cuatro barrenos con sus respectivas distancias.

Figura 8.

Resultado final del bloque con sus caras.

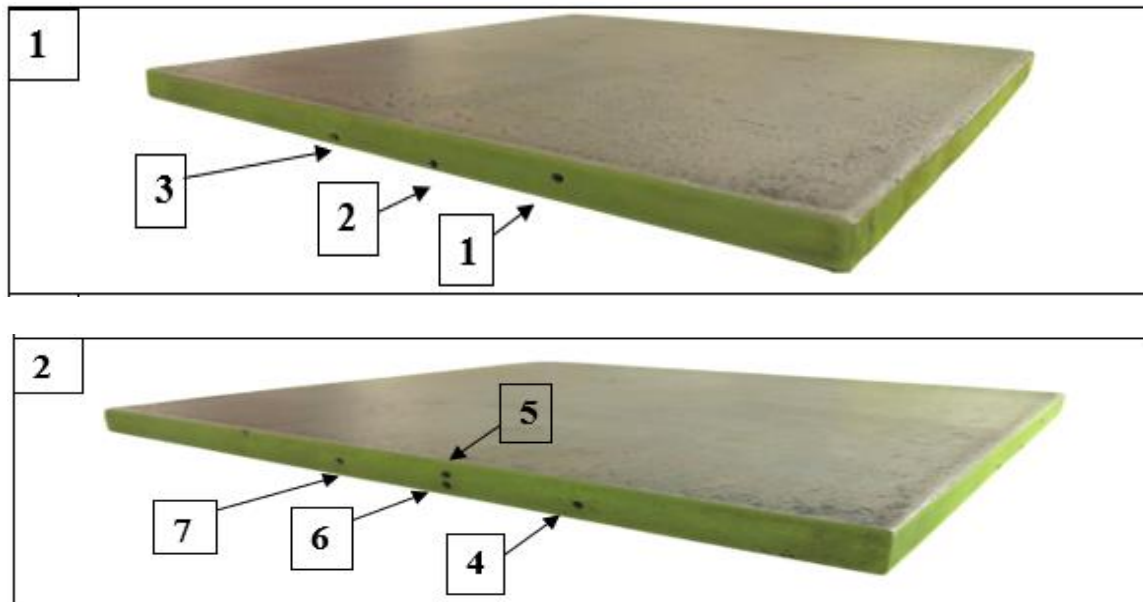


Una vez realizado el diseño se procedió con la fabricación del bloque, se requirió una placa con las medidas de la Tabla 5. Dichas medidas se consiguieron con el proceso de oxicorte que dio como resultado el bloque que se presenta en la Figura 9. Una vez obtenido el bloque con las dimensiones descritas se procede con el mecanizado que da como resultado lo que se observa en la Figura 9, donde se enumeran las discontinuidades tal y como se muestra en la imagen, así se

estipula como referencia para la medición de las discontinuidades en el microscopio y en el plan de inspección de *TOFD*.

Figura 9.

Bloque de Acero diseñado y mecanizado.



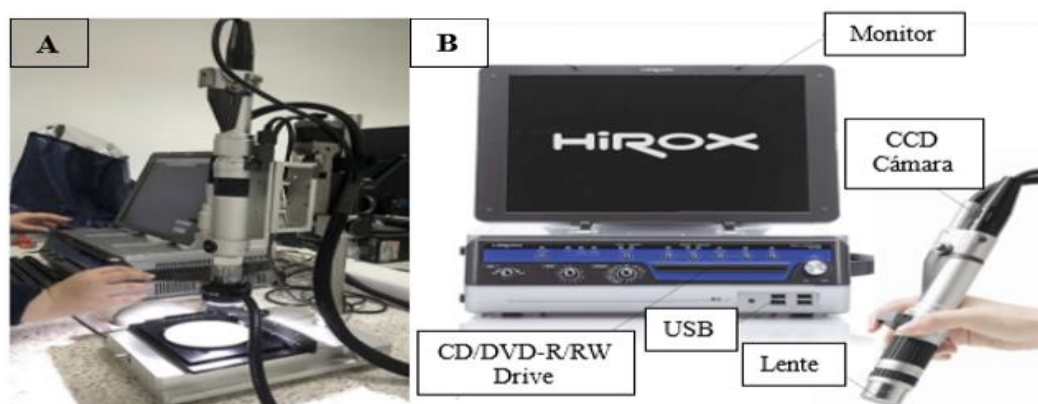
Nota. (1) Cara uno del bloque mecanizado con tres discontinuidades tipo barreno, (2) Cara dos del bloque mecanizado con cuatro discontinuidades. Los números de los barrenos van acuerdo a las medidas presentadas en la Tabla 7.

4.2 Medición de las discontinuidades tipo barreno.

Con base en que las discontinuidades pueden presentar variaciones respecto a los diámetros diseñados, se hizo uso del microscopio Hirox KH-7700 mostrado en la Figura 10, con el fin de obtener el tamaño de referencia de las discontinuidades a nivel superficial.

Figura 10.

Microscopio Hirox KH-7700.



Nota: En la figura A se observa el microscopio en el laboratorio, mientras que en la figura B se observa el KH-7700 integrado con un monitor, un disco duro, una unidad de CD/DVD-R/RW y con un software de medición 2D y 3D preinstalado. Tomado y adaptado de: (Hirox, s.f).

El microscopio proporcionó las medidas de diámetro en escala de micrómetros, por lo que se procedió a convertirlas en milímetros, para coincidir con la escala dada por el equipo Olympus. En la Tabla 7 se presentan las medidas del diámetro y profundidad de cada barreno.

Tabla 7.

Mediciones realizadas con el microscopio Hirox KH-7700.

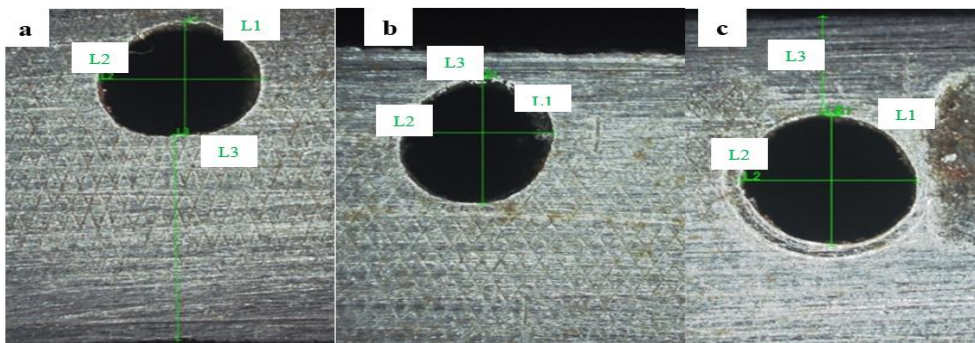
Discontinuidad	Diámetro (mm)	Profundidad (mm)	Discontinuidad	Diámetro (mm)	Profundidad (mm)
1	2,358	4,327	5	2,301	3,663
2	2,389	9,151	6	2,547	7,284
3	2,093	8,344	7	2,295	5,247
4	2,206	6,327			

Donde la distancia de la discontinuidad a la pared superior es tomada como referencia de la profundidad para poder comparar con las mediciones de los 72 planes de inspección realizados con TOFD.

En la Figura 11 (a, b y c) se muestran las compuertas de medición de las tres primeras discontinuidades (1, 2 y 3) tipo barreno de la cara 1, obteniendo la profundidad y los diámetros, donde en el microscopio se observaron algunas diferencias de tamaños. Los diámetros se tomaron con las mediciones de forma vertical y horizontal. En este sentido, L1 representa el diámetro 1 o medición vertical, L2 representa el diámetro 2 o medición horizontal, y L3 representa la medida del inicio de la discontinuidad a la pared del bloque, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11.

Mediciones de las discontinuidades en el bloque con el microscopio Hirox KH-7700.



Nota. En las imágenes se observan las mediciones de las discontinuidades, y la posición de los cursores para tomar las medidas con el microscopio Hirox KH-7700. (a). Discontinuidad uno (b). Discontinuidad dos. (c). Discontinuidad tres.

4.3 Calibración del equipo y dimensionamiento de las discontinuidades.

Una vez obtenido el bloque se procedió con el proceso de calibración del equipo. En la Tabla 8 se observan algunas de las variables de referencia que debía arrojar el equipo con el fin de tener la calibración completa. Con la información del espesor del bloque y el ángulo de la zapata utilizado el equipo automáticamente arrojaba el valor PCS, así como las zapatas o suelas suministraban la información del retardo de suela, y el tipo de material utilizado en el bloque nos

daba la velocidad. Lo mencionado anteriormente debía ser cercano a los valores que se presentan en la Tabla 8, de lo contrario se seguía configurando y repitiendo el ejercicio en el equipo hasta obtener a los valores que se presentan.

Tabla 8.

Variables de calibración.

Variables a Calibrar	Valores	Unidades
Velocidad	5890	m/s
Retardo de suela	5-7	µm
PCS	60°: 27,7 70°: 43,9	mm

Nota. Variables a tener en cuenta para calibrar el equipo con sus respectivos valores estándar.

Después de tener en cuenta estas variables, se completó la calibración del equipo, donde seguidamente se estableció el procedimiento a seguir para todos los parámetros. Como resultado del estudio realizado en el presente trabajo se presenta en el Apéndice B el flujograma de la Figura 20, donde se muestra el paso a paso global requerido para poder realizar una medición.

Después de lograr la calibración del equipo es necesario realizar el procedimiento para el dimensionamiento de la discontinuidad, fue necesario dividir en dos partes las operaciones a seguir, parte 1 y 2, las cuales son descritas a continuación y se observan en la Figura 12 y 13:

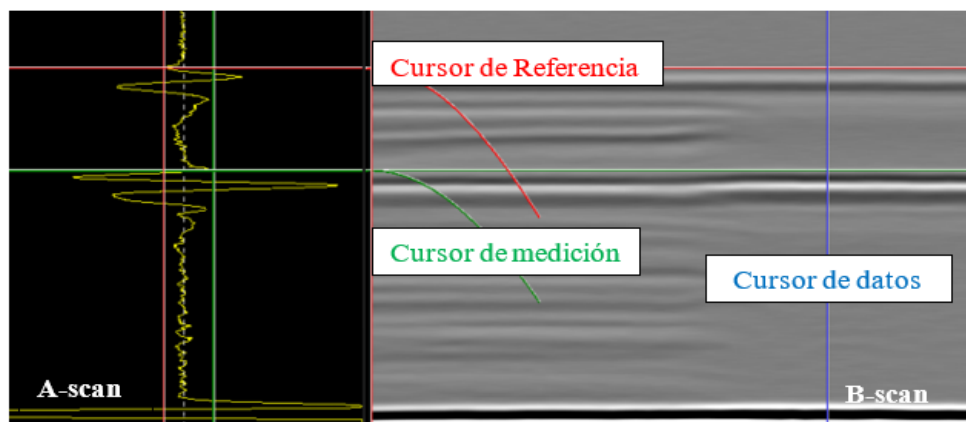
Parte 1: Medición con el equipo calibrado

1. Realizar el barrido.
2. Pausar el equipo después de realizar el barrido sin mover o separar el escáner.
3. Dar clic derecho en el B-Scan (Zona gris) – Seleccionar “Ajuste del cursor de datos” se presenta de color azul – Ubicarlo donde no haya alteración de la imagen (Discontinuidad).

4. Dar clic derecho en el A-Scan – Seleccionar “Ajustar cursor referencia” que se presenta de un color rojo – Ubicar el cursor en el primer eco negativo de la onda lateral.
5. Dar clic derecho en el A-Scan – Seleccionar “Ajuste cursor medición” que se presenta de un color verde – Ubicar el cursor en el primer eco positivo de la onda reflejada por la pared (pared posterior).
6. Dar clic derecho en la zona gris (B-Scan) – Seleccionar “Retardo de suela & PCS”.

Figura 12.

Imagen de la calibración del barrido parte 1.



Parte 2: Dimensionamiento de la discontinuidad

Una vez ya realizada la parte 1, procedimos a realizar las siguientes operaciones:

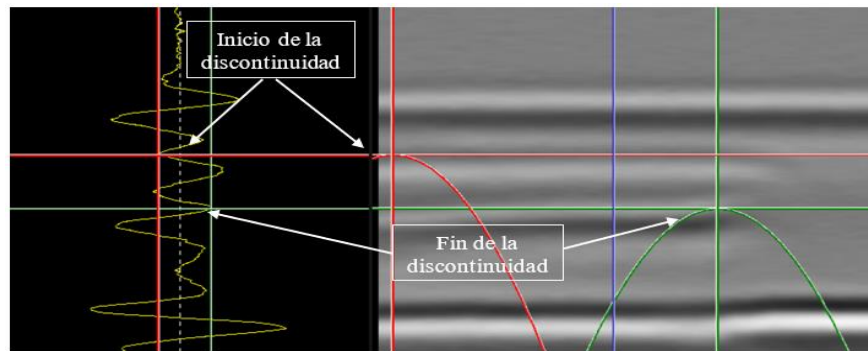
1. Observar con detenimiento el B-Scan.
2. Ubicar el cursor “Ajustar cursor referencia” (Rojo), en el inicio de la discontinuidad en la zona cercana a la onda lateral.
3. Ubicar el cursor “Ajuste cursor medición” (Verde), en la zona cercana a la pared posterior y final de la discontinuidad.

4. Desplazamos el cursor “Ajuste del cursor de datos” entre los dos cursores anteriormente mencionados y observamos el cambio de la señal en el A-Scan para terminar de ubicar los cursores.
5. El cursor “Ajuste del cursor de datos” se ubica en la amplitud más alta, y terminamos de corregir la ubicación de los cursores.

El procedimiento anteriormente descrito se puede observar en la siguiente figura.

Figura 13.

Dimensionamiento de la discontinuidad correspondiente a la parte 2.



4.4 Mediciones de las discontinuidades mediante la técnica TOFD

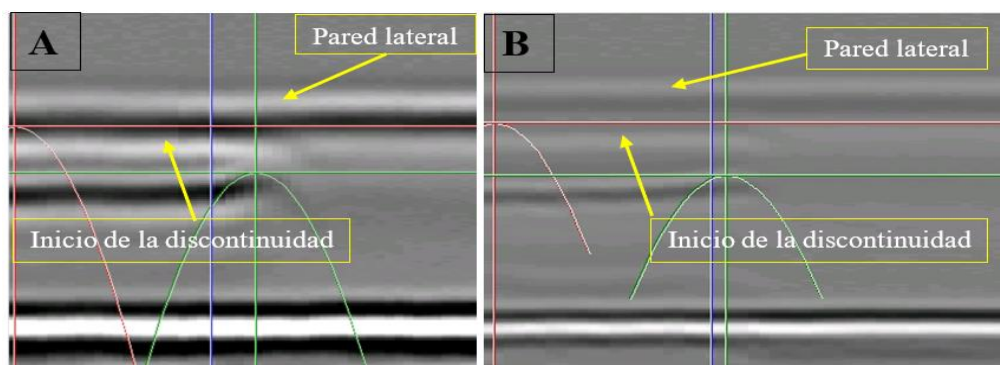
Una vez ya finalizada la etapa anterior se inicia con las datas de las discontinuidades tipo barreno del bloque donde de los 72 barridos realizados se obtuvieron los 1.008 datos con los planes de inspección de la técnica de *Time Of Flight Diffraction*. Se hallaron algunas discontinuidades que presentaron cierta relevancia en la toma de datos debido a que se encontraban en diferentes zonas o posiciones del bloque.

En la Figura 14 se observa la discontinuidad uno (1) con diferentes configuraciones en la visualización del B-scan, en la parte A se observa con más nitidez, pero a su vez no se logra diferenciar la pared lateral de la parte superior de la discontinuidad, ya que la discontinuidad se

encuentra cercana a la superficie del bloque. La distancia a la superficie del bloque es de 4,3 mm por lo que puede haber cierta diferencia o error respecto a la toma de datos de esta discontinuidad con el valor de referencia. En la parte B, al contrario de lo que sucede con la imagen A, se observa con claridad desde donde empieza la discontinuidad. Como resultado de los factores que se configuraron, las imágenes se presentan con una ganancia (dB) diferente, por lo que se tuvo que ajustar los niveles en el equipo para poder observar mejor el resultado en cuanto a contraste.

Figura 14.

Discontinuidad uno con planes de inspección diferentes en el B-scan.

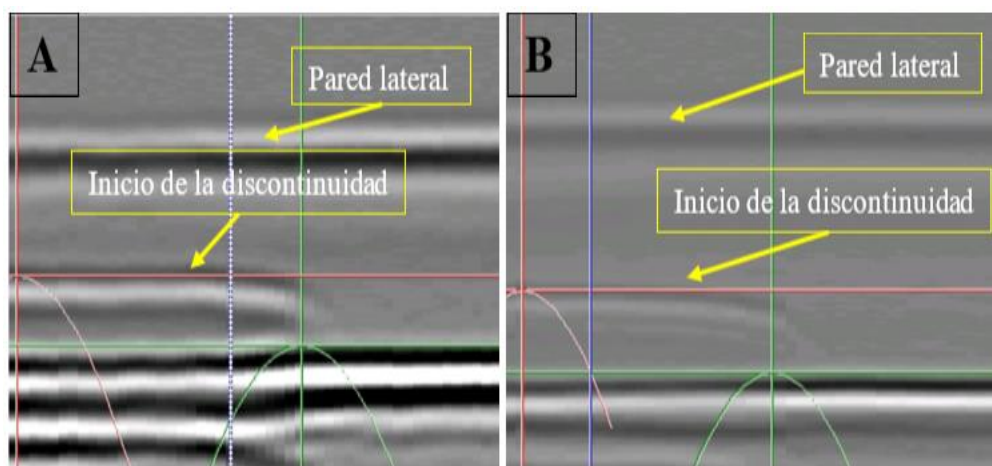


Nota. Comparación de dos diferentes configuraciones de la discontinuidad uno en el B-scan. En la figura A se presenta la configuración Energía: 200V, Frecuencia de adquisición (*Acq Rate*): 60MHz, Frecuencia: 5MHz, Angulo: 70°. En la figura B se presenta la configuración Energía: 200V, Frecuencia de adquisición (*Acq Rate*): Optimum MHz, Frecuencia: 5MHz, Angulo: 60°.

En la Figura 15 se observa la discontinuidad dos (2) en ambas imágenes, ésta en comparación con la discontinuidad uno (1) se encuentra cercana a la onda reflejada por la pared posterior, y con respecto a la configuración de factores es la misma que la anterior, y como resultado, se observó el mismo contraste que las de la Figura 14.

Figura 15.

Discontinuidad dos, con planes de inspección diferentes en el B-scan.



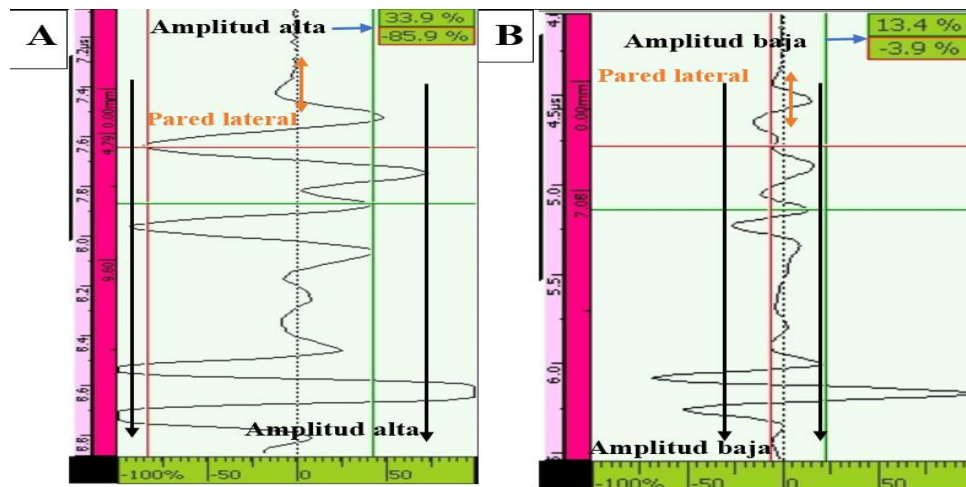
Nota. Comparación de dos diferentes configuraciones como las de la figura anterior, pero de la discontinuidad dos en el B-scan.

El equipo proporciona las imágenes A-scan de las discontinuidades. Con esta imagen se ubican las compuertas comparando simultáneamente con la imagen B-scan, para poder realizar la medición de las discontinuidades, las cuales arroja automáticamente el equipo. En las siguientes imágenes, Figuras (16 y 17) se observa la energía reflejada por la discontinuidad en medio de la onda lateral y la reflejada por la pared posterior en función de la amplitud de las señales en pantalla.

En este tipo de imagen, de la misma manera que con el B-scan, a medida que se corren los transductores va cambiando o actualizándose la señal, por lo que la amplitud de la onda también varía, sobre todo cuando se presenta una discontinuidad en la zona entre la onda lateral y la onda reflejada por la pared posterior. En la Figura 16A se observa un cambio de amplitud considerable en comparación con lo que se muestra en la imagen B, donde la amplitud disminuye debido a la configuración impuesta en el plan de inspección detallados en la nota del pie de imagen.

Figura 16.

Discontinuidad uno con planes de inspección diferentes en el A-scan.

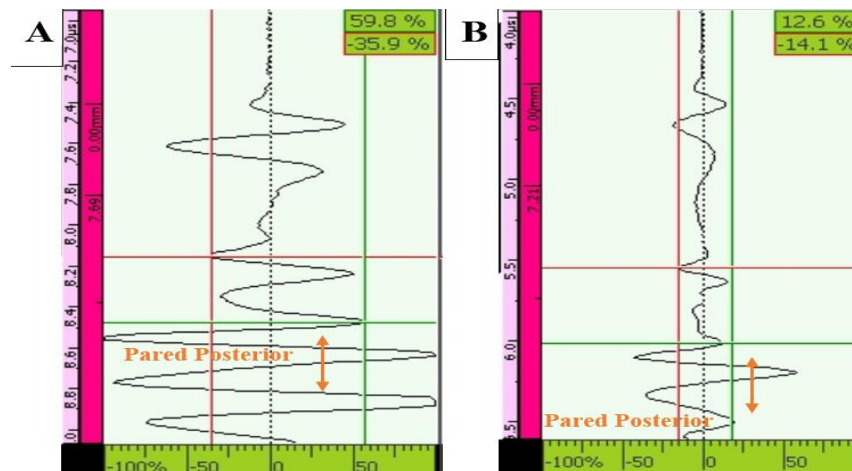


Nota. Comparación de dos diferentes configuraciones de la discontinuidad uno en el A-scan. En la figura A se presenta la configuración Energía: 200V, Frecuencia de adquisición (*Acq Rate*): 60MHz, Frecuencia: 5MHz, Angulo: 70°. En la figura B se presenta la configuración Energía: 200V, Frecuencia de adquisición (*Acq Rate*): Optimum MHz, Frecuencia: 5MHz, Angulo: 60°. Las flechas naranjas indican de donde a dónde va la pared lateral, y las flechas negras indican la amplitud.

En la Figura 17 se observa la discontinuidad dos (2), que se encuentra cerca a la pared posterior, por lo que a su vez se dificulta el dimensionamiento, aunque en menor medida. En la parte A se logra ver que la amplitud es mayor en comparación que la de la parte B. Se logra identificar con mayor claridad la discontinuidad en la parte B, ya que no presenta tanta interferencia como en la figura A. En el Apéndice C, se pueden observar algunas figuras correspondientes a cada barreno bajo distintas configuraciones.

Figura 17.

Discontinuidad dos con planes de inspección diferentes en el A-scan.



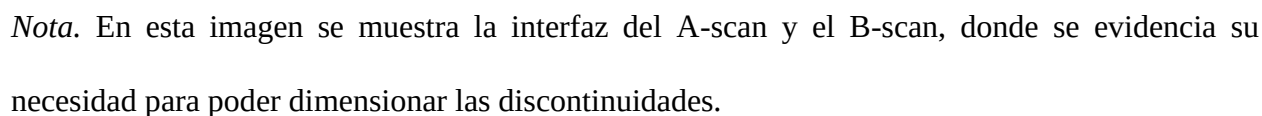
Nota. Comparación de dos diferentes configuraciones, igual que las de la figura anterior, de la discontinuidad dos en el A-scan.

Los datos de todos los barridos y discontinuidades medidas, como se acaba de mostrar, fueron recolectados del reporte generado en el Olympus, el cual se presenta como se observa en el Apéndice D en la Figura 23, donde se detalla todo sobre el barrido realizado de acuerdo con la configuración impuesta del plan de inspección, incluye datos de calibración, PCS, y la tabla de defectos con las respectivas mediciones, descritas a continuación, entre otras. Nos centramos en la información relevante de la tabla del informe para realizar el análisis estadístico, especialmente en los parámetros TOFD(m-r), que refleja el diámetro de la discontinuidad, y TOFD(r), que indica la profundidad a la que se encuentra dicha discontinuidad.

A su vez para saber de qué discontinuidad se habla después de realizado el reporte se tuvieron en cuenta las imágenes que se generan en la inspección cómo se observa en la siguiente figura. En la Figura 18 se observa el A-Scan y el B-scan, los cursores, las amplitudes de referencia, entre otras.

Figura 18.

Interfaz del A-scan y B-scan de la discontinuidad uno.



De esta manera se hizo la recolección de datos de cada barrido y se fue ubicando en una tabla como la que se muestra a continuación, donde a manera de ejemplo, solo se incluyen los primeros diez planes de inspección con su respectiva configuración. En el Apéndice E se pueden observar todos los datos suministrados de cada plan de inspección.

Tabla 9.

Datos suministrados por el Olympus OmniScan mediante la técnica TOFD.

FACTOR	ENERGIA (V)	200	200	50	100	50	50	200	200	200	100
	F. DE ADQ (MHz)	Auto máx.	Optimum	Auto máx.	60	Auto máx.	Optimum	Auto máx.	Optimum	60	60
	FREQ (MHz)	5	5	10	5	5	10	10	5	10	5

MEDIDAS (mm)	ÁNGULO (°)	70	60	70	60	60	60	60	70	60	70
	P1	5,77	5,46	5,45	5,6	5,77	5,18	5,19	5,72	5,27	5,49
	D1	2,29	2,37	2,21	2,3	2,3	2,28	2,36	2,3	2,33	2,3
	P2	9,92	9,76	9,92	9,7	8,8	9,39	9,79	9,76	9,38	9,41
	D2	2,06	2,28	2,05	2,3	2,14	2,38	2,27	2,26	2,38	2,27
	P3	9,05	9,37	9,18	9	9,15	9,15	8,96	9,35	8,96	9,32
	D3	2,13	2,19	2,16	2,4	2,31	2,31	2,4	2,33	2,13	2,23

Nota. En la tabla se muestran los primeros diez barridos realizados de las tres primeras discontinuidades, donde se obtienen los datos que se observan. La letra “P” de la tabla representa la profundidad y la letra “D” de la tabla el diámetro de las discontinuidades.

En el *Software Minitab Statistical* se insertaron los resultados obtenidos y se seleccionaron las medidas de tendencia central más relevantes como la media, mediana y moda de los 72 experimentos. La media es el promedio de los valores de un conglomerado, en este caso son las medidas que se tomaron en el laboratorio aleatoriamente para cada discontinuidad. En el Apéndice F se presentan los resultados de las medidas de tendencia en la Tabla 14 se presentan las medidas de tendencia central mencionadas anteriormente, donde “P” significa la Profundidad de la discontinuidad, donde cada una lleva asignado un número haciendo referencia a que discontinuidad corresponde.

De la misma manera en el Apéndice F se encuentra la 15, en donde se presenta la letra “D” en la casilla de variable, esta hace alusión a el diámetro de la discontinuidad, por lo que en esta tabla se presentan las medidas de tendencia central de todas las siete discontinuidades.

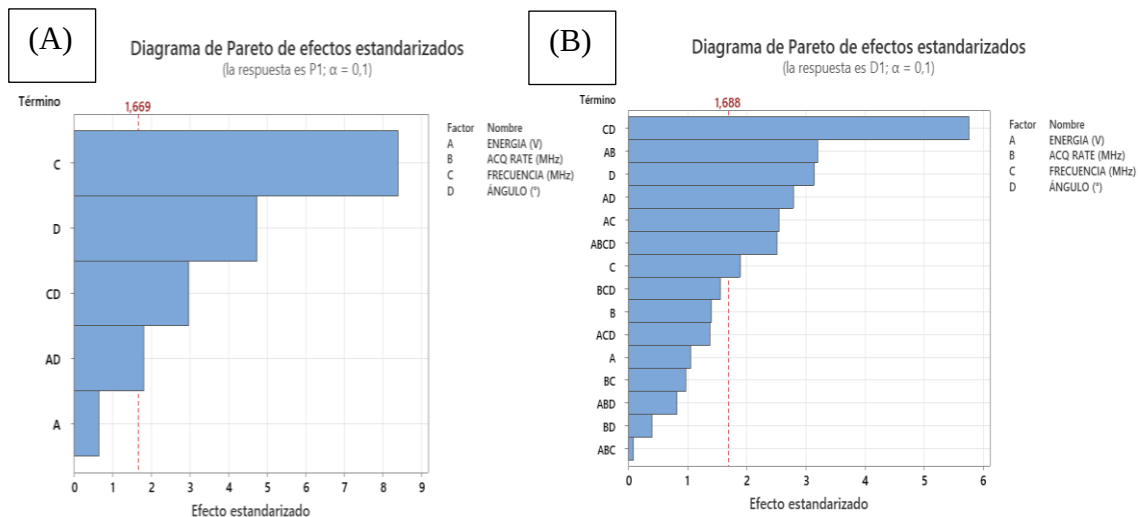
Para observar las variables que tuvieron mayor efecto en la inspección con la técnica *TOFD* basándose en el bloque dispuesto, se realizó un análisis del diseño factorial propuesto en el *Software* anteriormente mencionado, donde se utiliza el diagrama de *Pareto* que ordena de mayor

a menor frecuencia los factores y la combinación de estos para hallar cuál es la causa principal o la que afecta en mayor medida. Se utiliza el método de eliminación hacia atrás donde el alfa (α) utiliza un nivel de significancia de 0,1.

En la Figura 19 A, se nota que los términos Frecuencia-Ángulo (CD), Ángulo (D), y Frecuencia (C) cruzan la línea de referencia, destacándose como los factores que ejercen el mayor impacto estadístico en la inspección de la discontinuidad uno. En la Figura 19 B, los factores que inciden en el diámetro son Frecuencia-Ángulo (CD), Energía-Acq Rate (B), Ángulo (D), así como otras combinaciones de factores que cruzan la línea de referencia. Se omite la consideración de combinaciones de tres y cuatro niveles, ya que este patrón no está presente en el resto de las mediciones. En el Apéndice D se observan el resto de las imágenes generadas.

Figura 19.

Diagrama de Pareto de la profundidad y diámetro de la discontinuidad uno.



Nota. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados diseño factorial multinivel predispuesto. (A) Pertenece a la profundidad. (B) Pertenece al diámetro.

A continuación, en la Tabla 16 que se presenta en el Apéndice G se presentan resumidos los factores importantes para cada medida y discontinuidad, en este apéndice también se presentan

las imágenes correspondientes a cada discontinuidad. Según lo que se observa en la tabla y lo que se encuentra en la Figura 19, los factores que más tuvieron importancia en la toma de medidas respecto a la profundidad fueron la Frecuencia (C) y el Ángulo (D). Con respecto al diámetro ocurre lo mismo en relación con los factores, apareciendo también la combinación de factores Frecuencia-Angulo (CD). Se eligió presentar el diagrama de Pareto debido a las variadas configuraciones establecidas para cada plan de inspección, las cuales arrojaron resultados diferentes en la recopilación de datos. A través de este diagrama, se pudo identificar de manera clara los factores que influyeron en los resultados de cada barrido.

Con los datos obtenidos como se muestran en la Tabla 9, pero con los 72 planes de inspección, se realizó un análisis donde se filtraron los datos que estuvieran por fuera del rango de dimensionamiento escogido que fue de $\pm 1,0$ mm (Olympus, 2004), se aplicó un formato condicional y se contaron los datos que estuvieran por fuera de ese rango dependiendo de la discontinuidad, para que seguidamente se realizara un conteo y finalmente se mirara que porcentaje de cada medida, para cada discontinuidad en base de los 72 planes de inspección estaba por fuera del rango establecido, como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10.

Número de datos por fuera del rango de cada discontinuidad.

Discontinuidad Tipo Barreno	Medida	Datos por fuera del rango	%	Discontinuidad Tipo Barreno	Medida	Datos por fuera del rango	%
1	PROF.	24	33,3	5	PROF.	62	86,1
	D.	0	0		D.	0	0
2	PROF.	1	1,4	6	PROF.	54	75
	D.	0	0		D.	0	0
3	PROF.	34	47,2	7	PROF.	31	43,1
	D.	0	0				

4	PROF.	31	43,1	D.	0	0
	D.	0	0			

En la tabla anterior, se destaca que el porcentaje de variación es significativamente alto en las mediciones de profundidad de las discontinuidades, respecto a la variación en las mediciones del diámetro, donde este porcentaje es muy bajo o nulo. Las variaciones más altas como el de la discontinuidad 5 y 6, se debe a que eran dos barrenos que se encontraban uno encima del otro, con una separación de 3,6 mm en la profundidad, la discontinuidad 5 era el barreno que tenía más cercanía a la superficie de inspección del bloque y por consiguiente también a la zona muerta, por lo que en el A-scan y B-scan fue complicado definir la parte inicial y el final de las discontinuidades mencionadas. Con base en lo anterior, es posible inferir que la cercanía entre los barrenos y entre los barrenos y la onda lateral y posterior, influye considerablemente en el aumento del porcentaje de variación de la medición.

A continuación, empleando las medias obtenidas de cada discontinuidad para la profundidad y el diámetro, extraídas de la Tabla 14 y la Tabla 15, respectivamente, se calculó un porcentaje de variación respecto al valor de referencia obtenido con el microscopio, tal como se muestra en la Tabla 7. El resultado se presenta en la tabla siguiente, y se muestra el porcentaje de variación, los valores de referencia y la media para la profundidad de cada discontinuidad.

Tabla 11.

Porcentaje de variación entre la media y el valor de referencia.

Variable	Media	Valor Ref.	% Variación	Variable	Media	Valor Ref.	% Variación
P1	5,4369	4,327	25,7	D1	2,2603	2,358	4,1
P2	9,6867	9,151	5,9	D2	2,1857	2,389	8,5
P3	9,2972	8,344	11,4	D3	2,2008	2,093	5,2

P4	7,2474	6,327	14,5	D4	2,1387	2,206	3,1
P5	5,0156	3,663	36,9	D5	2,1744	2,301	5,5
P6	8,5978	7,284	18	D6	2,1947	2,547	13,8
P7	6,1506	5,247	17,2	D7	2,2353	2,295	2,6

De esta tabla se puede inferir que el mayor porcentaje de variación se encuentra en la estimación de la profundidad de las discontinuidades. En el diámetro se presentó en todos los casos un valor menor del 9%, a excepción del diámetro de la discontinuidad 6, esto debido a que cuando se dimensionaba se encontraba la señal final de la discontinuidad 5 y también llegaba a estar cerca de la onda reflejada por la pared.

A partir de los resultados anteriormente presentados y analizados, se puede inferir que los factores examinados tienen un efecto significativo en las mediciones de diámetro y profundidad de los barrenos ideales mecanizados en un bloque de 12 mm de espesor. Además, se puede afirmar que la técnica exhibe menores variaciones en las mediciones de diámetro, pero presenta variaciones considerables en la estimación de la ubicación, con valores que alcanzan hasta el 36,9% de variación.

Finalmente, es posible inferir que los factores con mayor influencia sobre la generación de variaciones en las mediciones es la frecuencia del transductor y el ángulo de refracción, teniendo en cuenta que solo se utilizaron dos valores de frecuencia y de ángulo. A pesar de las grandes ventajas de la técnica, con los resultados experimentales, fue posible encontrar que la sensibilidad en la detección de los barrenos fue muy buena, detectándolos en todos los casos. Sin embargo, el proceso de dimensionar y ubicar enfrenta aún complicaciones al utilizar el equipo y aditamentos acá mencionados al inspeccionar sobre un bloque de 12 mm de espesor, aspectos que deben ser valorados a mayor detalle con otro tipo de discontinuidades y ser tenidos en cuenta para inspecciones a nivel industrial.

5. Conclusiones

Este proyecto de grado se ha centrado en la evaluación de la sensibilidad de la técnica de inspección por ultrasonido *Time Of Flight Diffraction TOFD* utilizando barrenos de fondo plano en una placa, donde se realizaron mediciones utilizando planes de inspección configurados con base en el diseño de experimentos factorial multinivel propuesto para el presente proyecto.

En este trabajo se estableció un método de calibración y verificación de los planes de inspección con *TOFD* utilizando el equipo *OmniScan MX2* y siguiendo las indicaciones establecidas en el código ASME-SEC V. Lo anterior dio como resultado el paso a paso que garantizó la buena ejecución de las inspecciones, junto a la confiabilidad de los resultados obtenidos y que fueron la base para el análisis estadístico de los resultados.

Fue posible concluir que los factores escogidos para implementar en los planes de inspección para cada barrido o experimento tienen efecto estadísticamente significativo sobre la amplitud de onda y exactitud en las mediciones. Donde la frecuencia y el ángulo de refracción son la causa principal sobre las variaciones vistas en los resultados de los diferentes planes de inspección, principalmente en la profundidad a la que se ubica el barreno, donde los porcentajes de variación respecto a los datos de referencia alcanzan valores hasta de 36,9%.

Se evidencia que la técnica presenta alta sensibilidad, al detectar en todas las mediciones los barrenos con su diámetro y diferente ubicación, por lo que la sensibilidad no se vio afectada por las condiciones utilizadas en el presente trabajo. Sin embargo, la exactitud de las mediciones presenta variaciones significativas al utilizar diferentes configuraciones en la caracterización de cada barreno en particular, aspecto que se considera como una desventaja.

6. Recomendaciones

Se recomienda utilizar la técnica *Time Of Flight Diffraction* en espesores mayores a 12 mm, y utilizando otro tipo de discontinuidades para estudiar la exactitud en el dimensionamiento de las discontinuidades. Se deben realizar este tipo de estudios en defectos reales para ver si el comportamiento acá demostrado se repite.

Referencias Bibliográficas

- A metrological approach to the time of flight diffraction method (ToFD) Mayworm R, Alvarenga A, Costa-Felix R *Measurement* (2021) 167 108298
- A Metrological Based Realization of Time-of-Flight Diffraction Technique Mayworm R, Alvarenga A, Costa-Felix R *Physics Procedia* (2015) 70 590-593
- ASTM INTERNATIONAL. (2023). Standard Terminology for Nondestructive Examinations. *ASTM E1316*.
- Birring. A. S., & Nde. B. (n.d.). TOFD Principle, Limitations, Calibration and Inspection. Boiler, A. (2019). Section v 2019.
- BIRRING, A. S. (2020). *NDTnet*. Retrieved from TOFD Principle, Limitations, Calibration and Inspection : <https://www.ndt.net/?id=25350>
- Carillo, M. (2021).
- Carrillo, M., & Galán, M. (2021). *Desarrollo de una metodología para evaluar la sensibilidad, precisión y exactitud de la tecnica de inspección de cordones de soldadura Time of Flight Diffraction a partir de discontinuidades ideales*. Bucaramanga.
- Decodifica Imágenes Enviadas desde la ISS. (s.f.). *Longitud de Onda y Frecuencia*. Retrieved from http://esero.es/practicas-en-abierto/decodifica-imagenes-iss/longitud_de_onda_y_frecuencia.html
- Emilio, G. P. (2019, Diciembre 27). *Ingenieros Especialistas Ensayos No Destructivos*. Retrieved from <http://www.ingenierosespecialistas.com/2019/12/errores-comunes-con-algunos-conceptos.html>

Ferrer-Dalmau, R. (2017, Julio 29). *Interempresas*. Retrieved from Automoción (fabricación):

[https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/252588-Ensayos-no-Destructivos-\(END\)-Que-son.html](https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/252588-Ensayos-no-Destructivos-(END)-Que-son.html)

F.W.T. Yeh, T. Lukomski, J. Haag, T. Clarke, T. Stepinski, T.R. Strohaecker, An alternative Ultrasonic TimeofFlight Diffraction (TOFD) method, NDT & E International, Volume 100, 2018, Pages 74-83, ISSN 0963-8695, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.08.008>.

Hirox. (s.f). *3D Imaging Solutions*. Retrieved from KH-7700 Digital Microscope: <https://hirox-europe.com/wp-content/uploads/2019/09/Hirox-KH-7700-catalog.pdf>

Ims Olympus. (n.d.). *Escáner HST-X04*. . Retrieved from <https://www.olympus-ims.com/es/scanners/hst-x04/>

Ims Olympus. (n.d.). *Evident Olympus*. Retrieved from <https://www.olympus-ims.com/es/applications/defect-sizing-pipe-welds/>

Intertek. (n.d.). *Ensayos de ultrasonidos por TOFD (Time of flight diffraction)*. Retrieved from <https://www.intertek.es/ensayos-no-destructivos/ultrasonidos/tofd-time-of-flight-diffraction/>

JIREH INDUSTRIES. (2023). *JIREH INSPECTION ROBOTICS*. Retrieved from <https://www.jireh.com/products/encoder-adapter/>

Kaczmarek, K. & Kaczmarek, Rafał & Słania, J.. (2018). Interpretation of Indications Generated by Small Welding Discontinuities in Ultrasonic Time of Flight Diffraction Technique. Journal of Nondestructive Evaluation. 37. 10.1007/s10921-018-0504-2.

- Kamalahasan, Manjula & Vijayarekha, K & Balasubramaniam, Venkatraman & Karthik, Durga. (2012). Ultrasonic Time of Flight Diffraction Technique for Weld Defects: A Review. Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol. https://www.researchgate.net/publication/236217027_Ultrasonic_Time_of_Flight_Diffraction_Technique_for_Weld_Defects_A_Review
- Keyence. (2023). *Keyence*. Retrieved from <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/measurement-selection/environment/calibration.jsp#:~:text=La%20calibraci%C3%B3n%20significa%20utilizar%20un,con%20un%20est%C3%A1ndar%20de%20medici%C3%B3n>.
- K. Manjula, K. Vijayarekha, B. Venkatraman, QUALITY ENHANCEMENT OF ULTRASONIC TOFD SIGNALS FROM CARBON STEEL WELD PAD WITH NOTCHES, Ultrasonics (2017), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.11.001>
- Mayworm, Ruan & Alvarenga, Andre & Costa-Felix, Rodrigo. (2019). Tempo de Voo da Onda Difrata (ToFD) Auxilia na Garantia da Qualidade da Produção de Peças e Estruturas Mecânicas. Soldagem & Inspeção. 24. 10.1590/0104-9224/si24.27.
- Medium. (2023, Mayo 8). *Medium*. Retrieved from NDT vs. QA/QC: Understanding the Differences and Similarities: <https://medium.com/@manchesterengineerscentre/ndt-vs-qa-qc-understanding-the-differences-and-similarities-4cf60c11d3>
- Merazi-Meksen T, Boudraa M, Boudraa B *Ultrasonics* (2014) Mathematical morphology for TOFD image analysis and automatic crack detection

Minitab, LLC. All rights Reserved. (2023). Retrieved from Seleccionar las gráficas que se

mostrarán para analizar Diseño factorial : [https://support.minitab.com/es-](https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factor)

[mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factor](https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factor)

Modern Machine Shop México. (2022, Julio 14). *Modern Machine Shop México*. Retrieved from

Electroerosionadoras: [https://www.mms-mexico.com/articulos/electroerosionadoras-que-](https://www.mms-mexico.com/articulos/electroerosionadoras-que-es-el-mecanizado-por-descarga-electrica)

[es-el-mecanizado-por-descarga-electrica](https://www.mms-mexico.com/articulos/electroerosionadoras-que-es-el-mecanizado-por-descarga-electrica)

Non Destructive Testing – Ultrasonic Testing. (2022).

Non Destructive Testing - Ultrasonic Testing. (n.d.). Retrieved May 28, 2022, from

[http://www.wermac.org/others/ndt ut.html](http://www.wermac.org/others/ndt%20ut.html).

Olympus. (2004, Julio). *Olympus*. Retrieved from EVIDENT: [https://www.olympus-](https://www.olympus-ims.com/es/applications/defect-sizing-pipe-welds/)

[ims.com/es/applications/defect-sizing-pipe-welds/](https://www.olympus-ims.com/es/applications/defect-sizing-pipe-welds/)

Olympus. (2022).

Olympus. (sf). *Olympus*.

Paulina, J. G., & Edwin, R. (sf). *Zion NDT*. Retrieved from [https://zion-ndt.mx/que-es-un-](https://zion-ndt.mx/que-es-un-transductor-6-tipos-y-como-seleccionar/)

[transductor-6-tipos-y-como-seleccionar/](https://zion-ndt.mx/que-es-un-transductor-6-tipos-y-como-seleccionar/)

Planes, E. F. (2016, Octubre 4). *Planes*. Retrieved from [https://ferrospanes.com/que-es-](https://ferrospanes.com/que-es-mecanizado/)

[mecanizado/](https://ferrospanes.com/que-es-mecanizado/)

R.C. Mayworm, A.V. Alvarenga, R.P.B. Costa-Felix, A metrological approach to the time of flight

diffraction method (ToF), Measurement, Volume 167, 2021, 108298, ISSN 0263-2241.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108298>.

Riahi, M., Abolhasany, M.R. Substitution of the time-of-flight diffraction technique for nondestructive testing of welds and thick layers of steel: A comparative investigation. *Russ J Nondestruct Test* 42, 794–801 (2006). <https://doi.org/10.1134/S1061830906120047>

Rodríguez. (2012).

Santos De La Cruz, Cancino Vera, N., Yenque Dedios, J., Ramírez Morales, D., & Palomino Pérez, M. (2014). EL ULTRASONIDO Y SU APLICACIÓN. *Industrial Data*, 8(1), 25. <https://doi.org/10.15381/idata.v8i1.6153>

The American Society of Mechanical Engineers. (2023). *ASME BPVC.V-2023*. New York.

Apéndices

Apéndice A. Diseño de experimentos aleatorizado.

El diseño completo de experimentos factorial multinivel que dio por resultado el *Software Minitab Statistical* que se presenta a continuación, donde se indica la referencia para cada factor A, B, C y D según la Tabla 2 mencionada en la metodología.

Tabla 12.

Diseño de experimentos aleatorizado completo.

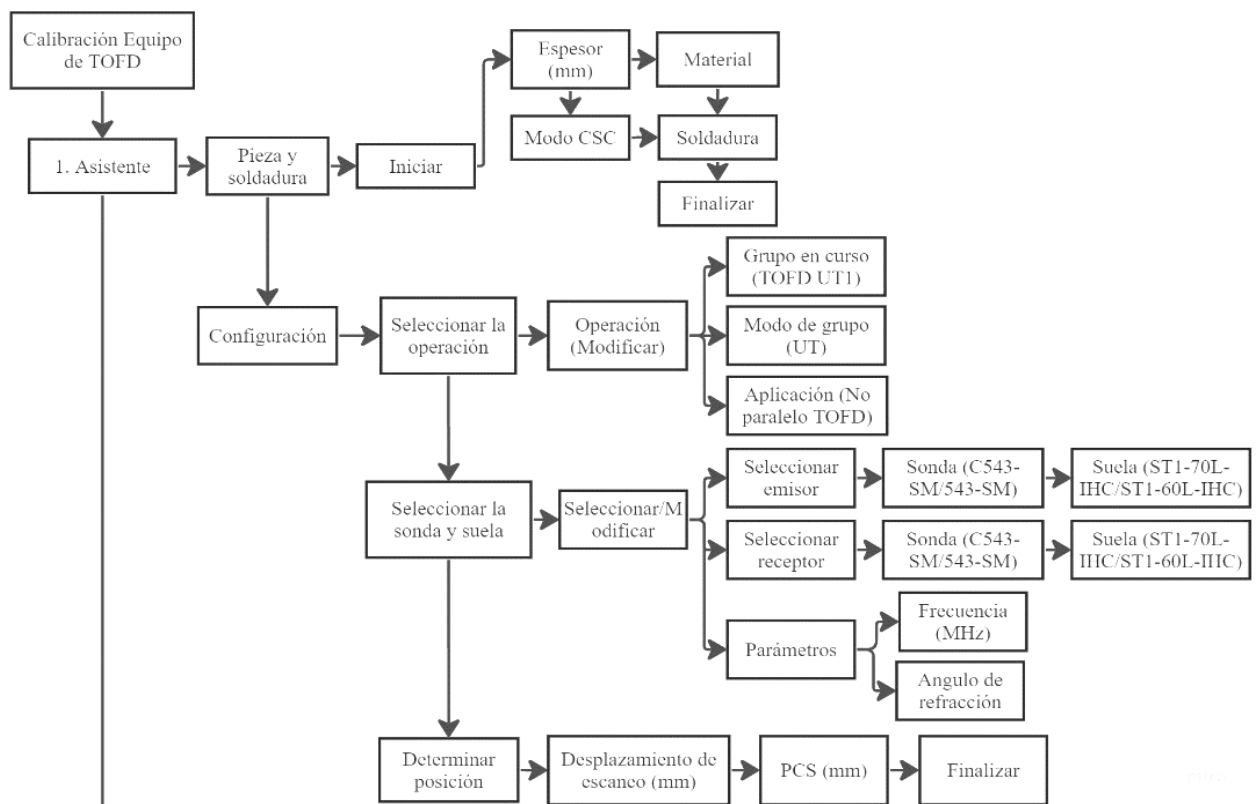
Corrida	Blq	A	B	C	D	Corrida	Blq	A	B	C	D
1	1	3	3	1	2	37	1	2	3	1	2
2	1	3	2	1	1	38	1	2	1	2	1
3	1	1	3	2	2	39	1	2	2	1	2
4	1	2	1	1	1	40	1	3	2	2	1
5	1	1	3	1	1	41	1	3	3	1	2
6	1	1	2	2	1	42	1	1	2	2	1
7	1	3	3	2	1	43	1	1	3	1	2
8	1	3	2	1	2	44	1	1	3	2	1
9	1	3	1	2	1	45	1	1	3	1	1
10	1	2	1	1	2	46	1	2	1	2	2
11	1	1	1	2	1	47	1	2	1	1	2
12	1	2	3	2	1	48	1	3	1	1	1
13	1	1	2	2	2	49	1	2	3	1	1
14	1	2	3	1	2	50	1	2	2	1	1
15	1	3	2	2	1	51	1	1	2	1	2
16	1	3	1	1	2	52	1	1	3	2	2
17	1	1	1	1	2	53	1	2	1	2	1
18	1	2	1	2	2	54	1	1	1	1	2
19	1	1	1	1	1	55	1	3	2	2	2
20	1	2	3	2	1	56	1	1	1	1	1
21	1	2	3	2	2	57	1	2	3	2	2
22	1	2	1	1	1	58	1	2	2	2	2
23	1	3	1	1	2	59	1	1	2	1	2
24	1	2	2	1	2	60	1	1	1	2	1
25	1	3	1	2	1	61	1	1	2	1	1
26	1	1	1	2	2	62	1	3	2	1	2
27	1	2	2	2	2	63	1	1	2	1	1
28	1	3	3	2	1	64	1	3	1	2	2

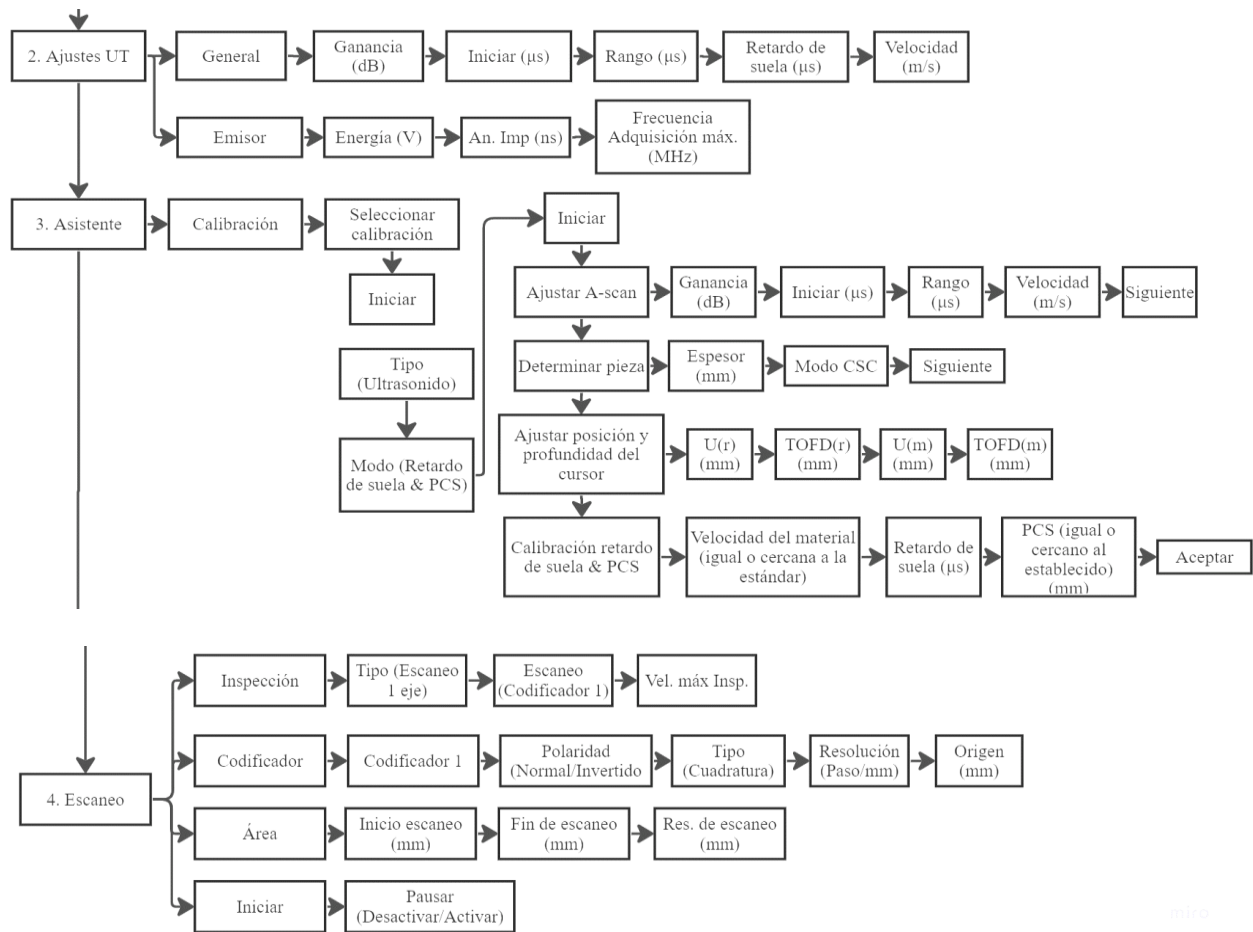
29	1	2	3	1	1	65	1	3	3	1	1
30	1	3	3	2	2	66	1	1	3	2	1
31	1	1	2	2	2	67	1	1	1	2	2
32	1	2	2	1	1	68	1	3	1	2	2
33	1	3	3	2	2	69	1	2	2	2	1
34	1	2	2	2	1	70	1	3	1	1	1
35	1	1	3	1	2	71	1	3	2	1	1
36	1	3	3	1	1	72	1	3	2	2	2

Apéndice B. Procedimiento de calibración del equipo

Figura 20.

Procedimiento seguido para la calibración del equipo en base al bloque diseñado



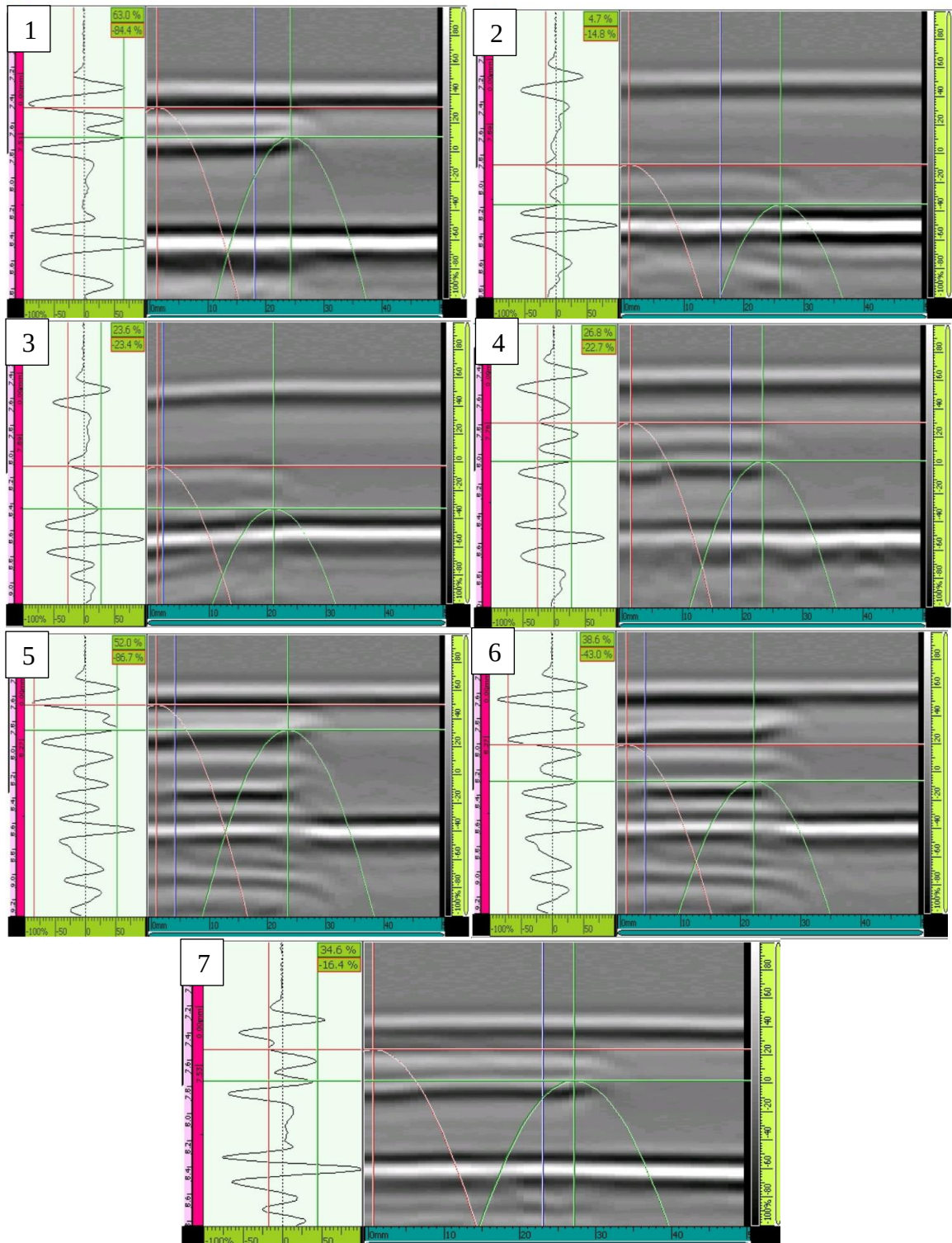


Apéndice C. Imágenes de la Interfaz del OmniScan.

Para cada configuración del plan de inspección se presenta una variación en cuanto al contraste, ganancia y la capacidad para dimensionar las discontinuidades. En las siguientes figuras se observa la inspección y dimensionamiento de las siete discontinuidades del bloque, cada imagen esta enumerada con el número de la discontinuidad al que corresponde.

Figura 21.

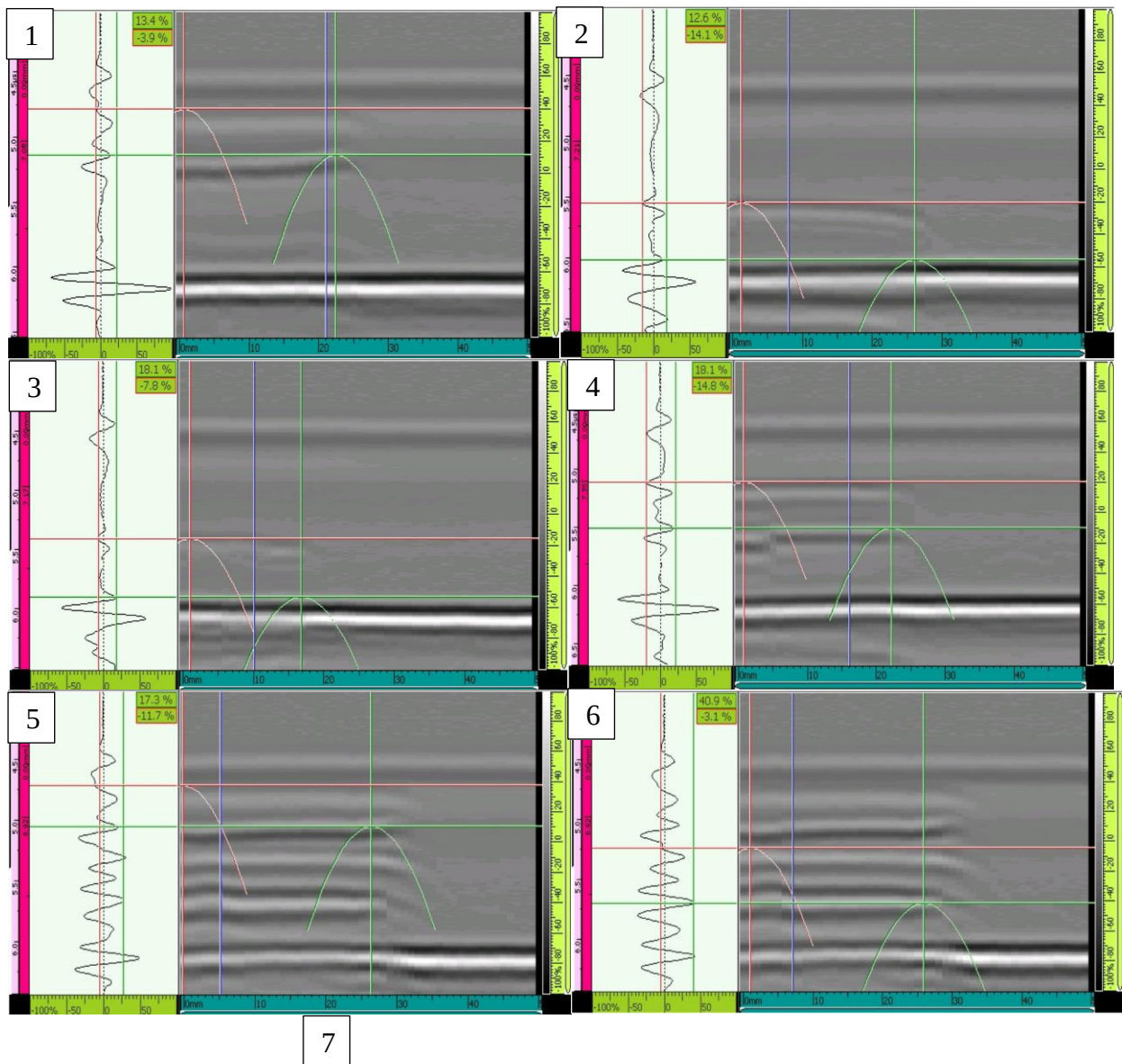
Imágenes de la inspección para cada discontinuidad ángulo 70°.

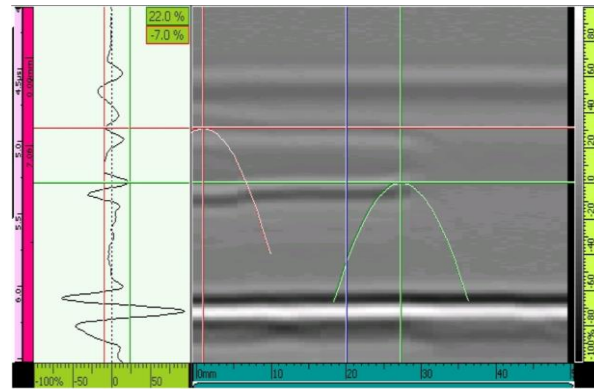


Nota. La configuración presentada para las imágenes anteriormente mencionadas es de Energía: 200V, Frecuencia de adquisición (Acq Rate): Optimum, Frecuencia: 5MHz y Angulo: 70°.

Figura 22.

Imágenes de la inspección para cada discontinuidad ángulo 60°.





Nota. La configuración presentada para las imágenes anteriormente mencionadas es de Energía:

200V, Frecuencia de adquisición (*Acq Rate*): Optimum, Frecuencia: 5MHz y Angulo: 60°.

Apéndice D. Reporte del Olympus.

Figura 23.

Reporte del Olympus OmniScan MX2.



OmniScan Report

Report Date	Report Version	File Name	Inspection Date	Inspection Version	Save Mode
2023 / 08 / 30	MXU - 4.2R2	TOFD_MAFE_70_10mhz.ops	2023 / 08 / 30	MXU - 4.2R2	Report
OmniScan Type	OmniScan Serial #	Module Type	Module Serial #		Data File Name
OmniScan MX2	OMNI2-101521	OMNI-PA-1664	OMNI-800247		200_60_10_70

Setup

Beam Delay	Start (Full Path)	Range (Full Path)	Max. Acq Rate	Type	Averaging Factor
5.3 μ s	6.76 μ s	4.32 μ s	60	UT	2
Digitizing Frequency	A-Scan Time Resolution	Filter	Scan Offset	PCS	
100 MHz	10.0 ns	None (2.1 - 21.8 MHz)	0.00 mm	44.27 mm	
Voltage	Gain	Mode	Wave Type	Sound Velocity	Pulse Width
200 V	43.00 dB	PC (Pitch-Catch)	User-Defined	5890.0 m/s	50.00 ns

Part

Material	Geometry	Thickness
STEEL, MILD	Plate	12.00 mm

Scan Area

Scan Start	Scan Length	Scan Resolution	Synchro.	Max. scan speed
0.00 mm	50.00 mm	1.00 mm	Encoder	60.00 mm/s
Axis	Encoder	Encoder Type	Encoder Resolution	Polarity
Scan	1	Quadrature	12.00 step/mm	Inverse

Table

Indication #	Scan (mm)	Index (mm)	Group	Channel	TOFD(r) (mm)	TOFD(m-r) (mm)	S(r) (mm)	S(m-r) (mm)	TOFD(m) (mm)	S(m) (mm)	%(U(r)) (%)	%(U(m)) (%)
1 *	14.00	0.00	1	70.00°	5.48	2.15	1.48	19.26	7.63	20.74	-26.6	32.3
2 *	10.00	0.00	1	70.00°	9.69	2.20	0.77	26.25	11.89	27.02	-28.9	27.6
3 *	18.00	0.00	1	70.00°	9.24	2.07	1.35	22.44	11.31	23.79	-28.1	35.4
4 *	13.00	0.00	1	70.00°	7.14	2.11	0.77	19.78	9.24	20.55	-19.5	37.0
5 *	3.00	0.00	1	70.00°	4.88	2.11	1.23	22.44	6.99	23.67	-22.7	38.6
6 *	12.00	0.00	1	70.00°	8.24	2.18	1.00	22.90	10.41	23.90	-8.6	48.0
7 *	23.00	0.00	1	70.00°	6.01	2.19	1.23	26.60	8.20	27.83	-37.5	38.6

Apéndice E. Datos recolectados de cada barrido realizado.

Los datos recolectados mediante la técnica *TOFD* fueron la profundidad y el diámetro de cada discontinuidad, en la siguiente tabla se puede observar los datos generados para cada plan de inspección propuesto, los datos señalados en rojo representan el filtro de ± 1 mm, donde estos se encuentran bajo el rango propuesto.

Tabla 13.

Datos recolectados del OmniScan mediante TOFD.

ENERGÍA (V)	ACQ RATE (MHz)	F (MHz)	θ (°)	P1	D1	P2	D2	P3	D3	P4	D4	P5	D5	P6	D6	P7	D7
200	Auto máx	5	70	5,77	2,29	9,92	2,06	9,05	2,13	8,9	2,09	5,25	2,26	9,92	2	6,26	2,25
200	Optimum	5	60	5,46	2,37	9,76	2,28	9,37	2,19	7,6	2,16	4,83	2,24	9,32	2,37	6,49	2,3
50	Auto máx	10	70	5,45	2,21	9,92	2,05	9,18	2,16	6,7	2,18	4,65	2,13	8,04	2,27	6,02	2,19
100	60	5	60	5,57	2,3	9,7	2,25	9,01	2,35	7,4	2,13	5,23	2,33	8,58	2,3	6,41	2,28
50	Auto máx	5	60	5,77	2,3	8,8	2,14	9,15	2,31	7,3	2,2	4,93	2,29	8,49	2,27	6,09	2,35
50	Optimum	10	60	5,18	2,28	9,39	2,38	9,15	2,31	6,9	2,25	4,76	2,29	8,2	2,19	5,79	2,35
200	Auto máx	10	60	5,19	2,36	9,79	2,27	8,96	2,4	7	2,23	4,6	2,3	8,73	2,31	5,85	2,32
200	Optimum	5	70	5,72	2,3	9,76	2,26	9,35	2,33	7,6	2,25	7,33	2,24	10,2	2,14	7,05	2,22
200	60	10	60	5,27	2,33	9,38	2,38	8,96	2,13	4,2	1,61	4,78	2,28	8,86	2,37	2,76	1,96
100	60	5	70	5,49	2,3	9,41	2,27	9,32	2,23	7,4	2,17	5,77	2,14	10,2	2,1	6,1	2,31
50	60	10	60	5,14	2,37	9,76	2,28	9,02	2,35	7,2	2,3	4,6	2,33	8,74	2,35	5,9	2,36
100	Auto máx	10	60	4,99	2,38	9,42	2,33	9,22	2,17	7,1	2,27	4,7	2,27	8,11	2,13	5,82	2,38
50	Optimum	10	70	5,45	2,26	9,78	2,31	9,28	2,38	7,2	2,29	4,89	2,15	8,31	2,23	5,94	2,21
100	Auto máx	5	70	5,54	2,42	9,69	2,25	9,45	2,38	7,6	2,06	5,59	2,16	8,76	2,28	7,36	2,3
200	Optimum	10	60	5,31	2,36	9,57	2,34	9,56	2,34	6,9	2,2	4,58	2,34	8,07	2,16	5,8	2,36
200	60	5	70	5,99	2,29	9,99	2,05	9,25	2,38	7,7	2,27	5,62	2,19	10,1	2,01	6,29	2,32
50	60	5	70	5,8	2,24	10,1	2,03	9,44	2,39	7,4	2,21	4,89	2,14	9,69	2,08	6,29	2,35
100	60	10	70	5,34	2,31	9,74	2,25	8,8	2,34	7	2,2	4,71	2,23	8,31	2,28	6,01	2,32
50	60	5	60	5,58	2,28	9,78	2,21	9,08	2,37	7,3	2,16	5,04	2,21	8,48	2,14	6,3	2,3
100	Auto máx	10	60	4,98	2,36	9,63	2,19	8,93	2,44	7,4	2,26	4,79	2,28	8,97	2,28	5,94	2,37
100	Auto máx	10	70	5,39	2,19	9,75	2,03	9,38	2,15	7,1	2,15	5,05	2,12	8,42	2,25	6,02	2,32
100	60	5	60	5,51	2,31	9,92	2,17	9,34	2,3	7,3	2,18	4,85	2,34	8,39	2,35	6,33	2,3
200	60	5	70	5,47	2,3	10	2,1	9,76	2,02	7,5	2,1	5,09	2,17	9,84	1,93	6,41	2,3
100	Optimum	5	70	5,4	2,37	9,89	2,16	9,38	2,14	7,6	2,12	5,21	2,01	9,88	2,04	6,32	2,32
200	60	10	60	5,1	2,42	9,52	2,33	9,19	1,95	7,1	2,2	4,6	2,26	8,77	2,29	6,08	2,29
50	60	10	70	5,34	2,24	9,91	2,28	9,01	2,31	7,2	2,11	4,56	2,16	8,3	2,13	6,11	2,15
100	Optimum	10	70	5,24	2,09	9,69	2,28	9,46	2,14	7,2	2,1	4,76	2,17	8,39	2,23	6,01	2,15

200	Auto máx	10	60	5,07	2,24	9,7	2,33	9,44	2,2	7,2	2,19	4,74	2,16	8,29	2,18	5,81	2,34
100	Auto máx	5	60	5,49	2,25	9,84	2,16	9,09	2,22	7,3	2,12	5,04	2,07	8,38	2,16	6,33	2,17
200	Auto máx	10	70	5,39	2,08	9,67	2,2	9,32	2,11	7	2,06	4,78	2,22	8,33	2,14	6,13	2,13
50	Optimum	10	70	5,45	2,18	9,79	2,17	9,49	2,16	7	2,08	5,07	2,02	8,41	2,07	6,29	2,06
100	Optimum	5	60	5,44	2,18	9,75	2,21	9,35	2,14	7,6	2,03	4,94	2,25	8,45	2,2	6,16	2,22
200	Auto máx	10	70	5,39	2,08	9,67	2,2	9,32	2,11	7	2,06	4,78	2,22	8,33	2,14	6,13	2,13
100	Optimum	10	60	5,15	2,25	9,52	2,28	9,1	2,17	7,1	2,18	4,76	2,22	8,19	2,12	5,65	2,3
50	Auto máx	5	70	5,4	2,27	9,89	2,05	9,68	2,06	7,5	2,07	5,23	2,02	8,46	2,29	6,81	2,14
200	Auto máx	5	60	5,69	2,18	9,71	2,16	9,53	2,03	7,3	2,14	4,94	2,29	9,15	2,28	6,34	2,19
100	Auto máx	5	70	5,56	2,34	9,93	2,04	9,71	2	7,4	2,1	5,39	2,1	8,57	2,29	6,48	2,17
100	60	10	60	5,28	2,29	9,75	2,16	8,63	2,21	6,7	2,33	4,79	2,14	8,23	2,17	6,01	2,22
100	Optimum	5	70	5,72	2,27	9,85	2,11	9,79	2,24	7,4	2,07	5,09	2,2	10	1,97	6,72	2,18
200	Optimum	10	60	5,08	2,28	9,93	2,11	8,97	2,05	7,4	2,21	4,57	2,15	8,05	2,2	5,95	2,23
200	Auto máx	5	70	5,73	2,24	9,9	2,24	9,39	2,14	7,4	2,12	5,71	1,97	8,62	2,22	6,45	2,19
50	Optimum	10	60	5,18	2,28	5,29	2,16	9,43	2,12	7,1	2,11	4,89	2,11	8,24	2,11	5,91	2,25
50	Auto máx	5	70	5,7	2,3	10	2,09	9,49	2,1	7,3	2,09	5,57	2,16	8,53	2,33	6,4	2,17
50	Auto máx	10	60	5,27	2,23	9,59	2,28	9,31	2,15	7,1	2,18	4,76	2,12	8,09	2,09	5,9	2,26
50	Auto máx	5	60	5,63	2,12	9,78	2,23	9,03	2,28	7,4	2,11	5,26	2,05	8,69	2,04	6,28	2,18
100	60	10	70	5,37	2,15	9,61	2,2	9,36	2,09	7,1	2,15	4,92	2,16	8,56	2,16	6,04	2,1
100	60	5	70	5,95	2,33	9,91	2,16	9,55	2,04	7,6	2,02	5,49	2,06	8,48	2,28	6,58	2,1
200	60	5	60	5,65	2,34	9,86	2,15	9,47	2,54	8	2,26	4,62	2,38	8,21	2,36	6,01	2,37
100	Auto máx	5	60	5,31	2,39	9,96	2,15	9,45	2,1	7,3	2,15	5,18	2,21	8,57	2,3	6,19	2,38
100	Optimum	5	60	5,61	2,16	9,94	2,1	9,29	2,23	7,4	2,08	5,22	2,06	8,46	2,2	6,47	2,18
50	Optimum	5	70	5,41	2,3	9,85	2,2	9,48	2,32	7,3	2,14	5,19	2,19	8,53	2,24	6,48	2,21
50	Auto máx	10	70	5,23	2,25	9,56	2,28	9,2	2,13	7,1	2,14	4,51	2,08	7,99	2,29	5,9	2,24
100	60	10	60	5,12	2,26	9,56	2,22	8,74	2,31	7,1	2,16	4,56	2,24	7,97	2,12	5,97	2,28
50	60	5	70	5,29	2,27	9,98	2,18	9,53	2,08	7,1	2,2	4,81	2,27	8,28	2,36	6,28	2,21
200	Optimum	10	70	5,22	2,27	9,42	2,28	9,24	2,23	7	2,14	5,17	2,04	8,48	2,23	6,15	2,2
50	60	5	60	5,61	2,17	9,73	2,2	9,47	2,13	7,4	2,1	5,11	2,05	8,41	2,18	6,35	2,13
100	Auto máx	10	70	5,71	2,07	9,69	2,18	9,25	2,23	7,3	2,01	4,94	2,15	8,48	2,1	6,17	2,07
100	Optimum	10	70	5,58	2,17	9,57	2,1	9,41	2,1	7,1	2,14	5,02	2,06	8,43	2,21	5,92	2,15
50	Optimum	5	70	5,6	2,18	9,87	2,07	9,55	2,16	7,8	2,01	5,4	2,06	8,47	2,32	6,81	2,17
50	60	10	60	5,4	2,26	9,81	2,23	9,03	2,26	6,9	2,2	4,82	2,12	8,08	2,08	5,83	2,27
50	Optimum	5	60	5,58	2,17	9,96	2,04	9,62	2,09	7,5	2,09	5,15	2,27	8,55	2,15	6,36	2,18
200	Optimum	5	70	5,5	2,2	10,2	1,91	9,72	2,16	7,7	2,03	5,53	2,04	8,72	2,1	6,36	2,1
50	Optimum	5	60	5,65	2,18	9,63	2,25	9,27	2,16	7,3	2,1	5,32	2,02	8,65	2,02	6,64	2,15
200	60	10	70	5,48	2,15	9,69	2,2	9,24	2,07	7,1	2,11	4,88	2,11	8,24	2,18	6,01	2,19
200	Auto máx	5	60	5,78	2,22	9,85	2,18	9,37	2,09	7,3	2,08	5,17	2,18	8,58	2,09	6,42	2,09
50	Auto máx	10	60	5,01	2,26	9,54	2,08	9,45	2,1	7	2,16	4,71	2,2	8,07	2,04	5,96	2,27
50	60	10	70	5,49	2,3	9,56	2,22	9,11	2,19	7,1	2,2	4,68	2,19	8,1	2,42	5,94	2,36
200	60	10	70	5,51	2,15	9,82	2,1	8,97	2,22	7,2	2,06	4,96	2,12	8,33	2,28	6,09	2,25
100	Optimum	10	60	5,11	2,29	9,76	2,25	9,09	2,2	7,5	2,17	4,73	2,17	8,07	2,11	5,84	2,28
200	60	5	60	5,29	2,31	9,95	2,05	9,57	2,31	7,8	2,15	5,02	2,18	8,48	2,19	6,19	2,29

200	Optimum	5	60	5,32	2,37	9,91	2,14	9,53	2,27	7,3	2,18	5,04	2,32	8,38	2,31	6,23	2,27
200	Optimum	10	70	5,62	2,28	9,76	2,14	9,32	2,07	7,1	2,06	5	2,13	8,37	2,22	6,15	2,29

Apéndice F. Medidas de tendencia central para el diámetro de cada discontinuidad.

Tabla 14.

Medidas de tendencia central de la profundidad de la discontinuidad.

(A)

Variable	Conteo total	N	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Mínimo	Mediana	Máximo
P1	72	72	5,4369	0,0271	0,2297	4,9800	5,4500	5,9900
P2	72	72	9,6867	0,0665	0,5641	5,2900	9,7600	10,1500
P3	72	72	9,2972	0,0287	0,2432	8,6300	9,3200	9,7900
P4	72	72	7,2474	0,0570	0,4833	4,1900	7,2750	8,9000
P5	72	72	5,0156	0,0483	0,4096	4,5100	4,9400	7,3300
P6	72	72	8,5978	0,0656	0,5565	7,9700	8,4600	10,1900
P7	72	72	6,1506	0,0598	0,5076	2,7600	6,1500	7,3600

(B)

Variable	Moda	N para moda
P1	5,39; 5,4; 5,45; 5,49	3
P2	9,76	5
P3	9,32	4
P4	7,07; 7,38	4
P5	4,76	4
P6	8,48	5
P7	6,01	5

Tabla 15.

Medidas de tendencia central del diámetro de la discontinuidad.

(A)

Variable	Conteo total	N	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Mínimo	Mediana	Máximo
D1	72	72	2,2603	0,00966	0,0820	2,0700	2,2700	2,4200
D2	72	72	2,1857	0,0112	0,0953	1,9100	2,1950	2,3800
D3	72	72	2,2008	0,0141	0,1193	1,9500	2,1700	2,5400
D4	72	72	2,1387	0,0113	0,0960	1,6100	2,1400	2,3300
D5	72	72	2,1744	0,0111	0,0946	1,9700	2,1700	2,3800
D6	72	72	2,1947	0,0128	0,1086	1,9300	2,1950	2,4200
D7	72	72	2,2353	0,0107	0,0907	1,9600	2,2450	2,3800

(B)

Variable	Moda	N para moda
D1	2,3	8
D2	2,28	8
D3	2,16; 2,31	5
D4	2,2	7
D5	2,16	5
D6	2,28	6
D7	2,3	6

Apéndice G. Diagrama de Pareto.

En la siguiente tabla se puede observar el resumen de los factores de las discontinuidades.

Tabla 16.

Tabla resumida de factores.

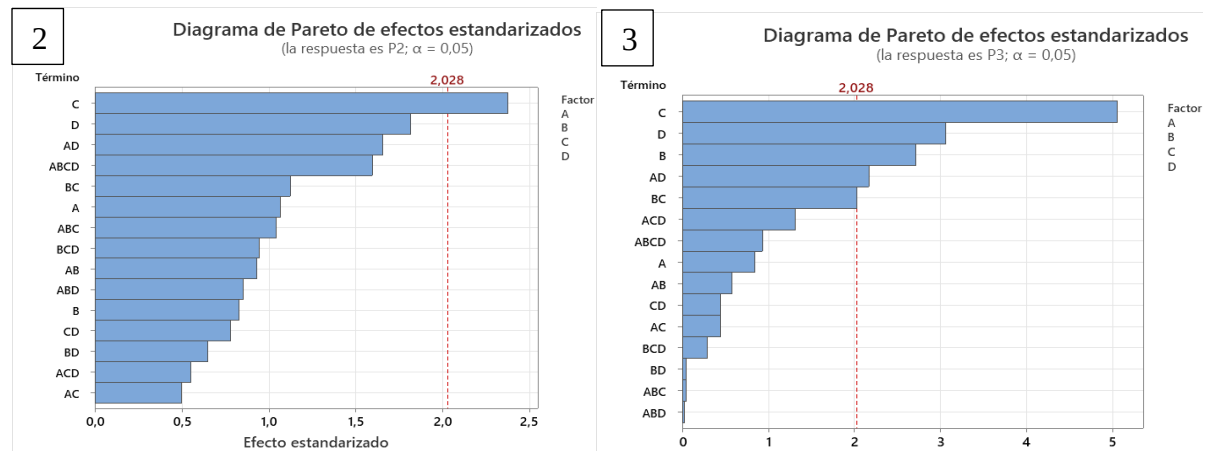
DISCONTINUIDAD TIPO BARRENO	MEDIDA	FACTORES IMPORTANTES
2	PROF. D.	Frecuencia (C), Ángulo (D) Frecuencia (C), Ángulo (D)
3	PROF. D.	Frecuencia (C), Ángulo (D), Acq Rate (B), Energía- Ángulo (AD), Acq Rate-Frecuencia (BC) La eliminación hacia atrás quito todos los términos del modelo
4	PROF.	Frecuencia (C), Energía-Frecuencia (AC)

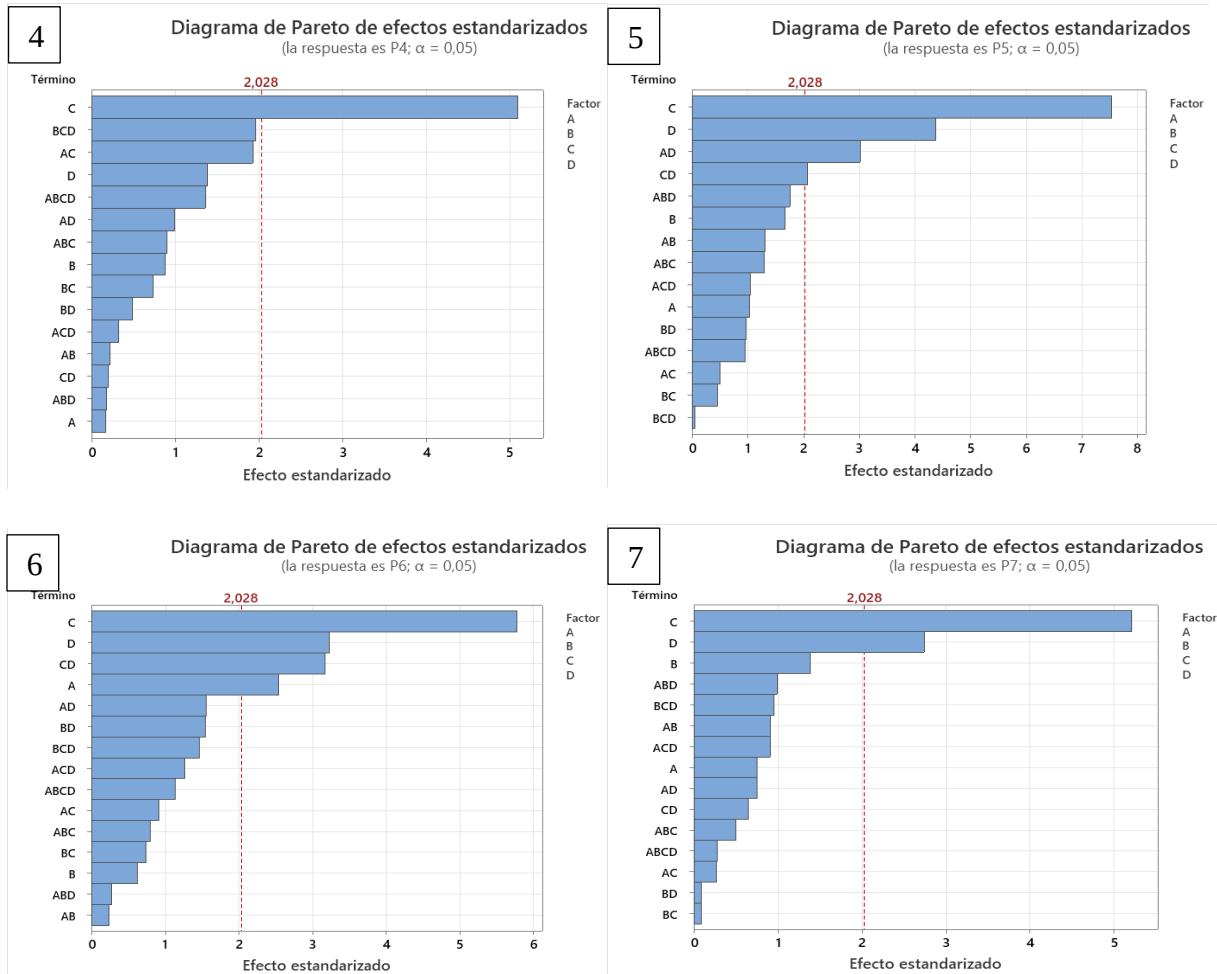
	D.	Energía-Frecuencia (AC)
5	PROF.	Frecuencia (C), Ángulo (D), Energía-Ángulo (AD), Frecuencia-Ángulo (CD),
	D.	Ángulo (D)
6	PROF.	Frecuencia (C), Ángulo (D), Frecuencia-Ángulo (CD)
	D.	Energía-Ángulo (AD), Frecuencia-Ángulo (CD)
7	PROF.	Frecuencia (C), Ángulo (D)
	D.	Ángulo (D), Frecuencia-Ángulo (CD)

A continuación, se observa el resto de imágenes generadas por el *software* con respecto a la profundidad de la discontinuidad, aquí se observan las variables más influyentes.

Figura 24.

Diagramas de Pareto completos de la profundidad.



**Figura 25.***Diagramas de Pareto para el diámetro.*