



**PROCEDIMIENTO DE MONITOREO DE EQUIPOS DE EXTRACCIÓN MASIVA POR
MEDIO DE TÉCNICAS DE ULTRASONIDO EN MINEROS ALUVIAL S.A**

Verónica Yepes Flórez

Informe de semestre de industria presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Mecánica

Asesor

Sebastián Sarmiento Ruiz, Ingeniero Mecánico

Ricardo Moreno Sánchez, PhD. en Mecatrónica. M.Sc. en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería

Ingeniería mecánica

Medellín, Colombia

2023

Cita	(Yepes Flórez, 2023)
Referencia	Yepes F, V. (2023). Procedimiento de monitoreo de equipos de extracción masiva por medio de técnicas de ultrasonido en Mineros aluvial S.A [Trabajo de grado de pregrado]. Universidad de Antioquia, Medellín
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Pedro León Simancas

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Marco teórico	13
2.1 Draga	13
2.2 Zonas críticas en una draga	15
2.3 Mantenimiento preventivo por ultrasonido	16
2.4 Equipos de ultrasonido	17
2.5 Técnicas de caracterización por ultrasonido	20
2.6 Defectos y palpadores	26
3. Metodología	33
4. Estado del arte	34
4.1 Tecnología disponible	34
4.2 Artículos científicos en torno a los END por ultrasonido	36
4.3 Empresas que usan o comercializan equipos de ultrasonido	37
4.4 Normas	40
5. Propuesta de procedimiento	41
5.1 Procedimiento	41
5.2 Instructivo de inspección por ultrasonido mineros	42
5.2.1 Objetivo	42
5.2.2 Clasificación de personal	42

5.2.3	Parametrización del equipo ultrasónico	43
5.2.4	Inspección general por ultrasonido de los equipos de mineros	44
5.2.5	Acoplante	45
5.2.6	Calibración de equipos de ultrasonido	46
5.2.7	Bloques de calibración	47
5.2.8	Bloques de referencia	48
5.2.9	Método	49
5.2.9.1	Procedimiento para realizar ultrasonido a rodamientos	49
5.2.9.1.1	Puntos para inspeccionar en un rodamiento	50
5.2.9.1.2	Velocidad para inspeccionar rodamientos por ultrasonido	51
5.2.9.2	Procedimiento para realizar ultrasonido a ejes	51
5.2.9.2.1	Puntos para inspeccionar en un eje	52
5.2.9.2.2	Velocidad para inspeccionar ejes por ultrasonido	53
5.2.10	Equipos de inspección	53
5.2.10.1	Palpadores para Ejes	54
5.2.10.2	Palpadores para Rodamientos	55
5.2.11	Criterios de aceptación	55
5.2.12	Limpieza	55
5.2.13	Informe	56
6.	Estudio caso critico	56
6.1	Cálculos	58
6.2	Análisis por elementos finitos	62
6.3	Informe	63
7.	Conclusiones	64
8.	Referencias	65

9.	Anexos	69
9.1	Plano eje tambor inferior nuevo diseño	69
9.2	Informe universidad nacional	69
9.3	Procedimiento para dar de baja los ejes de los tambores inferiores	70

Lista de tablas

Tabla 1 Valores para cálculo de esfuerzos.	61
Tabla 2 Esfuerzos para los puntos A y B	61

Lista de figuras

Figura 1 Draga de succión o preparación	13
Figura 2 Draga de cuchara o extracción masiva	15
Figura 3 Equipo de ultrasonido con display [4]	18
Figura 4 Espectro de grietas encontradas por el equipo de ultrasonido [5]	18
Figura 5 Palpador recto [29]	27
Figura 6 Palpador angular [29]	28
Figura 7 Observación de una grieta [31]	29
Figura 8 Cambio de sección en un eje [31]	31
Figura 9 Medida de defecto por ultrasonido [30]	33
Figura 10 Bloque de calibración V2	48
Figura 11 Bloque de calibración V1	48
Figura 12 Bloque de referencia básico según norma ASME SA-609M [32]	49
Figura 13 Línea de cucharas descarrilada por falla en tambor inferior draga 10	57
Figura 14 Evidencia de eje partido	58
Figura 15 Redondeos en cambio de sección A-B y B-C	59
Figura 16 Plano eje tambor inferior D10. Tomada de Mineros	59
Figura 17 Diagramas carga, cortante y momento.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18 Gráficas de factores teóricos de concentración del esfuerzo K_t para $r = 15.88$ mm	60
Figura 19 Datos acero 4340. Tomada de [38]	61
Figura 20 Mallado del eje.	62
Figura 21 Resultado de la simulación del eje en ANSYS.	63
Figura 22 Puntos para hacer medición en los ejes	63

Siglas, acrónimos y abreviaturas

END	Ensayo no destructivo
mm	Milímetros
UdeA	Universidad de Antioquia
CBM	Mantenimiento Basado en Condición

Resumen

El propósito principal de este trabajo es desarrollar un procedimiento de monitoreo para equipos de extracción masiva en Mineros aluvial utilizando técnicas de ultrasonido para la detección precisa de fallas. La minería aluvial es una industria en la que los equipos de extracción masiva son críticos para la operación, por lo que es importante tener un método efectivo de monitoreo para prevenir fallas y minimizar el tiempo de inactividad. En este trabajo se busca establecer un procedimiento de monitoreo que pueda ser utilizado por los equipos de mantenimiento para realizar inspecciones programadas de manera regular y detectar fallas tempranamente.

La técnica de ultrasonido es utilizada en este procedimiento de monitoreo, ya que es una herramienta efectiva para la detección de fallas en los equipos de extracción masiva; el uso de esta técnica permite la identificación de pequeñas discontinuidades internas en los equipos sin dañarlos. Además, la técnica de ultrasonido es no destructiva, lo que significa que los equipos no requieren ser desmontados para llevar a cabo la inspección, lo que reduce los costos y el tiempo de inactividad.

El procedimiento de monitoreo establece los equipos y puntos de inspección necesarios para llevar a cabo las inspecciones de ultrasonido, también se define los criterios de aceptación y rechazo para las fallas identificadas, se espera que este procedimiento de monitoreo ayude a prevenir fallas y mejorar la eficiencia y la seguridad en la operación.

Palabras clave: ultrasonido, mantenimiento, técnica, END, monitoreo, críticos, fallas

Abstract

The main purpose of this work is to develop a monitoring procedure for mass extraction equipment in alluvial miners using ultrasound techniques for accurate fault detection. Alluvial mining is an industry in which mass extraction equipment is critical to operation, so it is important to have an effective monitoring method to prevent failures and minimize downtime. This work seeks to establish a monitoring procedure that can be used by maintenance teams to perform regular scheduled inspections and detect failures early.

The ultrasound technique is used in this monitoring procedure as it is an effective tool for detecting failures in mass extraction equipment; the use of this technique allows the identification of small internal discontinuities in the equipment without damaging them. In addition, the ultrasound technique is non-destructive, meaning that equipment does not need to be disassembled to carry out the inspection, which reduces costs and downtime.

The monitoring procedure establishes the equipment and inspection points necessary to carry out the ultrasound inspections, it also defines the acceptance and rejection criteria for the identified failures, this monitoring procedure is expected to help prevent failures and improve efficiency and safety in operation.

Keywords: ultrasound, maintenance, technique, END, monitoring, critical, failures.

Introducción

Mineros S.A.S es una compañía enfocada en la producción y exploración responsable de oro, con más de 47 años de experiencia, con casa matriz en Medellín, Colombia. Tiene presencia en cuatro países. Con producción en Colombia, Nicaragua y Argentina, y exploración en los países en que operamos y Chile [1].

En Colombia, las operaciones mineras aluviales se realizan en el municipio de El Bagre, Antioquia, mientras que en el municipio de Anorí se encuentran dos centrales hidroeléctricas llamadas Providencia I y Providencia III, las cuales generan la energía para las operaciones de minería además de proveer energía a los campamentos de Mineros.

Para la operación de extracción aluvial, Mineros S.A.S tiene dos fases las cuales se clasifican en preparación y explotación masiva, para las cuales se tienen dragas de succión y dragas de cucharas, además se tiene maquinaria pesada.

El mantenimiento predictivo para los equipos de Mineros S.A.S es una importante herramienta que permite detectar y localizar los problemas mucho antes de que estos ocurran.

Actualmente existen diferentes tipos de mantenimiento predictivo no destructivo [2]:

- Análisis de vibraciones
- Ultrasonidos aplicados al mantenimiento predictivo
- Análisis de lubricantes
- Análisis de máquinas alternativas
- Descargas parciales en máquinas eléctricas
- Parámetros de supervisión de grandes maquinas eléctricas
- Termografía
- Análisis de motores eléctricos de inducción

En Mineros S.A, actualmente desde el área de confiabilidad, se tienen programas de mantenimiento predictivos como: análisis de vibraciones y análisis de lubricantes. En el presente trabajo se realizará una propuesta para definir los equipos y puntos para implementar la inspección por Ultrasonido como técnica complementaria para las estrategias de mantenimiento

predictivo de los equipos de extracción y preparación masiva, y equipos de generación. Este complemento busca principalmente la detección de grietas en elementos críticos de las maquinas (tanto motrices como estructurales).

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Complementar las estrategias de Mantenimiento Basado en Condición CBM de Mineros S.A.S mediante la propuesta de un procedimiento de monitoreo de equipos de extracción masiva y generación de energía por medio de técnicas de ultrasonido.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un estado del arte de la técnica de ultrasonido como estrategia de mantenimiento basado en condición mediante la revisión de mínimo 15 fuentes bibliográficas.
- Proponer un procedimiento periódico para la inspección de elementos críticos mediante la técnica de ultrasonido, este procedimiento incluye las especificaciones mínimas que deben tener los equipos y el contenido que debe tener el informe periódico.
- Estudiar un caso de una parte critica por sus esfuerzos para proponer el punto de seguimiento con ultrasonido y plantear la estrategia que relaciona los modos de falla de los elementos a inspeccionar con el procedimiento propuesto.

2. Marco teórico

2.1 Draga

Una draga de extracción es una embarcación o un equipo móvil utilizado para excavar y extraer materiales del fondo del mar, de un río o de pozos, tales como arena, grava, lodo, arcilla, minerales y petróleo. Pueden ser utilizadas en una variedad de proyectos, como la construcción de diques, puertos, canales, represas y plataformas petrolíferas.

Existen diferentes tipos de dragas de extracción, como las dragas de succión, las dragas de corte y las dragas de perforación, cada una con características y especificaciones diferentes, pero todas ellas tienen en común su capacidad de movilizar y extraer grandes cantidades de materiales. [24] Mineros S.A.S cuenta con dragas de succión o de preparación y dragas de cucharas o extracción masiva.

Una draga de preparación (Figura 1) es un tipo específico de draga que se utiliza para preparar el fondo de un río o pozo para la construcción de estructuras, tales como diques, puertos, canales y plataformas petrolíferas. El funcionamiento de una draga de preparación puede variar dependiendo del tipo específico, pero en general, utilizan una combinación de mecanismos de succión y corte para remover y nivelar el fondo del cuerpo de agua.

Figura 1

Draga de succión o preparación



La draga de preparación utiliza un sistema de succión para succionar el material del fondo del cuerpo de agua y transportarlo a través de una tubería hacia un lugar de descarga. El material succionado es luego descargado en un lugar específico o en un barco.

Algunas dragas de preparación también tienen un sistema de corte que utiliza cuchillas o discos para cortar y remover el material del fondo del cuerpo de agua. El material cortado es luego succionado y transportado a través de la tubería hacia un lugar de descarga. El proceso de preparación del fondo del cuerpo de agua puede ser un proceso continuo, con la draga moviéndose continuamente a lo largo del área de trabajo, o puede ser un proceso intermitente, con la draga deteniéndose en puntos específicos para excavar y remover el material.

Por su parte, una draga de cuchara o de extracción masiva (Figura 2) es un tipo específico de draga que se utiliza para extraer grandes cantidades de materiales del fondo de un río, tales como arena, grava, lodo, arcilla y minerales. El funcionamiento de una draga de cuchara se basa en el uso de una gran cuchara o pala para remover y cargar el material en un barco o en un camión.

La draga de cuchara cuenta con una gran cuchara o pala montada en un brazo articulado, esta cuchara puede ser ajustada en su inclinación y ángulo para adaptarse a la naturaleza del fondo del cuerpo de agua. El brazo articulado se mueve mediante motores hidráulicos y la cuchara es controlada por un operador en una cabina de control. La cuchara se baja hasta el fondo

del cuerpo de agua y se cierra, succionando y cargando el material en su interior. Una vez cargada, la cuchara se levanta y se vacía en un barco o en un camión que se encuentra cerca. El proceso se repite continuamente hasta que se extrae la cantidad deseada de material.

Figura 2

Draga de cuchara o extracción masiva



2.2 Zonas críticas en una draga

Las dragas son máquinas complejas con una variedad de componentes críticos que pueden ser evaluados mediante ensayos de ultrasonido. Algunas de las partes críticas de una draga que podrían ser evaluadas mediante ensayos de ultrasonido incluyen:

- **Casco:** El casco de la draga es la estructura principal que soporta todas las demás partes de la draga. Es crítico evaluarlo para detectar posibles defectos como fisuras, poros, inclusiones, etc.
- **Piso:** El piso de la draga es la parte inferior de la draga que se encuentra en contacto directo con el fondo del cuerpo de agua. Es crítico evaluarlo para detectar posibles defectos como fisuras, poros, inclusiones, etc.

- **Tambores:** Los tambores son los componentes principales de una draga de cuchara. Es crítico evaluarlo para detectar posibles defectos como fisuras, poros, inclusiones, etc.
- **Ejes:** Los ejes son los componentes principales de una draga de cuchara, es crítico evaluarlo para detectar posibles defectos como fisuras, poros, inclusiones, etc.
- **Bombas:** Las bombas son los componentes principales de una draga de succión, es crítico evaluarlo para detectar posibles defectos como fisuras, poros, inclusiones, etc.
- **Tuberías:** Las tuberías son los componentes principales de una draga de succión, es crítico evaluarlo para detectar posibles defectos como fisuras, poros, inclusiones, etc.
- **Soldaduras:** Las soldaduras son puntos críticos en las dragas debido a la posibilidad de defectos por malas soldaduras, falta de penetración, falta de adherencia, etc.
- **Sistemas hidráulicos:** Los sistemas hidráulicos son esenciales para el funcionamiento de una draga, es importante evaluarlo para detectar posibles defectos como fisuras, poros, inclusiones, etc.

2.3 Mantenimiento preventivo por ultrasonido

El mantenimiento preventivo es una de las principales formas de mantenimiento en la industria. Esta práctica tiene como objetivo prevenir el desgaste o el daño de los equipos y maquinarias, reduciendo las posibilidades de fallas, mejorando la eficiencia energética y aumentando la vida útil de los equipos, su confiabilidad y disponibilidad. El mantenimiento preventivo se realiza mediante tareas de inspección, mantenimiento, lubricación y calibración de los equipos y maquinarias para detectar y corregir los problemas antes de que se produzcan fallas.

Por su parte, los equipos de ultrasonido para ensayos no destructivos (END) son una herramienta importante para detectar defectos en materiales metálicos. Estos equipos generalmente consisten en un transductor ultrasónico, un equipo de control de señal y un dispositivo de visualización de imagen. El transductor ultrasónico genera una señal ultrasónica,

que es transmitida a través del material a ser inspeccionado. Esta señal es entonces recogida por el equipo de control de señal, que la procesa y la visualiza en un dispositivo de visualización de imagen, proporcionando así a los operadores una imagen detallada de los defectos contenidos en el material. Los equipos de ultrasonido pueden detectar defectos tales como grietas, porosidades, inclusiones de impurezas, fisuras o cualquier otra deficiencia estructural en los materiales metálicos.

Así, la aplicación de equipos de ultrasonido en el mantenimiento preventivo es una técnica importante para asegurar el buen funcionamiento de los equipos y maquinarias. Los equipos de ultrasonido utilizan ondas ultrasónicas para inspeccionar los materiales, proporcionando una imagen detallada de los defectos contenidos. Estos históricos permiten a los ingenieros y técnicos realizar una evaluación y una reparación oportunas para garantizar el buen funcionamiento y la seguridad de los equipos.

2.4 Equipos de ultrasonido

Primero se debe conocer el principio físico de una onda sonora: El sonido es un conjunto de ondas mecánicas, estas ondas son longitudinales y se propagan por un medio elástico y continuo [3].

- **Ciclo:** Es el movimiento completo de la onda.
- **Longitud de onda:** Es la distancia necesaria para completar un ciclo. Por lo general se denota como λ .
- **Amplitud:** Es el valor máximo en sentido positivo y negativo que alcanza la onda sonora.
- **Frecuencia:** Es el número de ciclos por unidad de tiempo

Para detectar fallas por ultrasonido es indispensable utilizar un detector de ultrasonidos, que detecta ondas ultrasónicas y las convierte en señales que estén dentro del rango de la audición humana, el equipo además de convertir las ondas de manera que se puedan escuchar a

través de un audífono también permite visualizar mediante una pantalla las diferentes intensidades de onda.

Figura 3

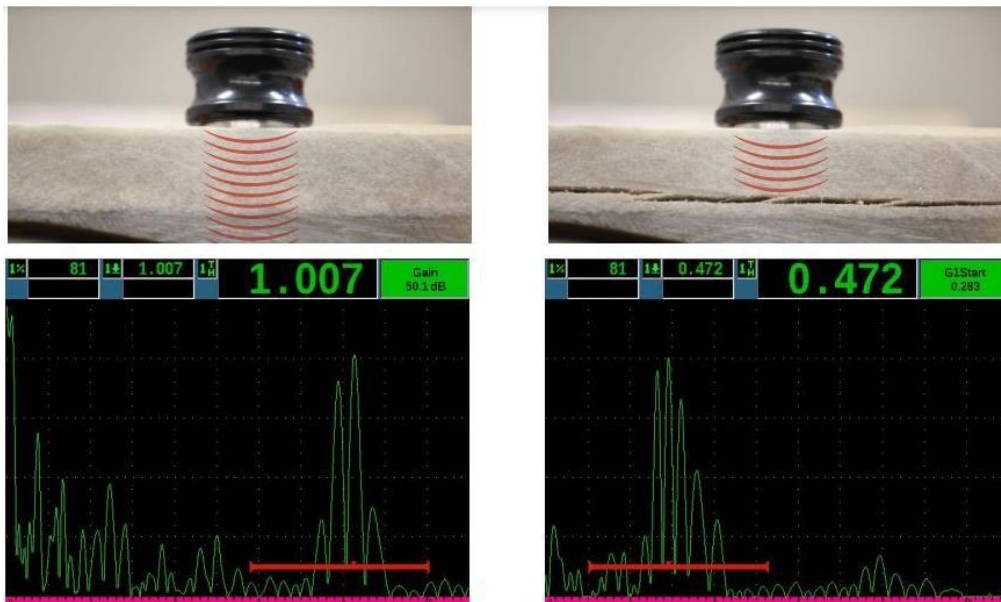
Equipo de ultrasonido con display [4]



En el ejemplo de la figura 4, el sonido viaja hasta la parte inferior de la superficie y crea una reflexión, este fuerte eco me muestra la discontinuidad que se presenta en la pieza.

Figura 4

Espectro de grietas encontradas por el equipo de ultrasonido [5]



Un equipo de inspección por ultrasonido está compuesto principalmente por las siguientes partes: [28]

- **Transductor:** Es el componente que convierte la energía eléctrica en ondas de ultrasonido y detecta las ondas reflejadas. El principio de funcionamiento del transductor es la conversión de energía eléctrica en energía mecánica mediante la excitación de un cristal piezoeléctrico. Este cristal se contrae y se expande cuando se le aplica una tensión eléctrica, generando ondas mecánicas que son enviadas al material a inspeccionar.
- **Generador de señal:** es el componente que genera una señal eléctrica de alta frecuencia y amplitud controlada, que es aplicada al transductor para generar las ondas de ultrasonido.
- **Sistema de adquisición de datos:** es el componente que recolecta y procesa la señal reflejada detectada por el transductor. El principio de funcionamiento del sistema de adquisición de datos es medir y registrar la señal reflejada detectada por el transductor, y luego procesarla para generar una imagen o una señal que indica la presencia o ausencia de defectos en el material.

El sistema de adquisición de datos puede incluir un osciloscopio, un dispositivo de procesamiento de señal y un software para generar y analizar las imágenes.

Además de estas partes principales, un equipo de inspección por ultrasonido también puede incluir accesorios como soportes de transductor, medios acústicos y dispositivos de posicionamiento. También puede incluir un sistema de control y visualización para facilitar la operación del equipo y la interpretación de los resultados.

En un monitor de ultrasonido, las especificaciones clave de un monitor de ultrasonido incluyen:

- **Resolución de pantalla:** La resolución de la pantalla afecta la claridad y detalle de la imagen capturada por el equipo de ultrasonido.
- **Tamaño de pantalla:** El tamaño de pantalla puede influir en la facilidad de uso y visualización de la imagen.
- **Interfaz de usuario:** La facilidad de uso de la interfaz de usuario puede afectar la eficiencia y la precisión de la inspección.
- **Capacidad de almacenamiento:** La capacidad de almacenamiento determina la cantidad de imágenes que pueden ser guardadas en el equipo.
- **Conectividad:** La conectividad, como USB o Wi-Fi, puede afectar la capacidad de transferir imágenes y datos a otras plataformas.
- **Potencia de procesamiento:** La potencia de procesamiento afecta la velocidad de procesamiento de la imagen y el tiempo de respuesta.
- **Calidad de imagen:** La calidad de la imagen puede afectar la precisión de la inspección y la interpretación de los resultados.
- **Durabilidad y resistencia:** La durabilidad y resistencia son importantes para asegurar la confiabilidad y la vida útil del equipo en entornos difíciles.

2.5 Técnicas de caracterización por ultrasonido

Algunas de las técnicas implementadas para la caracterización de materiales por medio de ensayos no destructivos por ultrasonido incluyen:

- **Ultrasonido convencional:** es uno de los tipos más comunes de equipos de ultrasonido utilizados en ensayos no destructivos. Se basa en la propagación de ondas de sonido a través de un material mediante el uso de un transductor. El transductor envía ondas de ultrasonido a través del material y las ondas reflejadas son detectadas por el mismo transductor o por otro transductor. El tiempo que tarda en regresar la señal reflejada se utiliza para calcular la distancia al defecto o la profundidad de este.

El equipo de ultrasonido convencional se compone de un transductor, un dispositivo de generación de señal y un dispositivo de adquisición de datos. El transductor se coloca en contacto con el material a evaluar y envía ondas de ultrasonido a través de este, las ondas reflejadas son detectadas y procesadas para generar una imagen o una señal que indica la presencia o ausencia de defectos en el material.

El ultrasonido convencional es ampliamente utilizado en una variedad de materiales, tales como metales, plásticos, vidrios, cerámica y compuestos. Es especialmente útil para detectar defectos en materiales homogéneos, es decir, con características similares a lo largo de toda su extensión. Es fácil de usar y ofrece una buena relación señal-ruido, lo que permite detectar defectos pequeños en una variedad de materiales.

- **Ultrasonido pulsado-eco:** es similar al ultrasonido convencional, pero utiliza un pulso de ondas de sonido en lugar de una señal continua. El transductor envía un pulso de ondas de ultrasonido a través del material y las ondas reflejadas son detectadas por el mismo transductor o por otro transductor.

El ultrasonido pulsado-eco es más preciso que el ultrasonido convencional y es capaz de detectar defectos más pequeños. Es ampliamente utilizado en una variedad de materiales, tales como metales, plásticos, vidrios, cerámica y compuestos. Es especialmente útil para detectar defectos en materiales con estructura compleja o para evaluar la integridad de materiales con características

- **Ultrasonido de impedancia:** Se basa en el uso de ondas de sonido de alta frecuencia para medir la impedancia eléctrica de un material. La impedancia eléctrica se refiere a la resistencia que ofrece un material al paso de una corriente

eléctrica. Los cambios en la impedancia eléctrica pueden indicar la presencia de defectos en el material. El ultrasonido de impedancia es capaz de detectar defectos en materiales conductores y no conductores, es especialmente útil para evaluar la integridad de las soldaduras. Es ampliamente utilizado en metales, aleaciones metálicas, compuestos y cerámica. Es una técnica muy útil para detectar defectos internos en materiales con alta conductividad eléctrica, ya que se basa en medir la variación de la impedancia eléctrica a través del material.

- **Ultrasonido de onda guiada:** Se basa en la propagación de ondas de sonido guiadas a través de un material mediante el uso de un transductor. Las ondas guiadas son ondas que viajan a lo largo de la superficie o en una dirección específica dentro de un material. El transductor envía ondas de ultrasonido guiadas a través del material y las ondas reflejadas son detectadas por el mismo transductor o por otro transductor. El tiempo que tarda en regresar la señal reflejada se utiliza para calcular la distancia al defecto o la profundidad de este.

El ultrasonido de onda guiada es especialmente útil para detectar defectos en materiales con estructura compleja o para evaluar la integridad de materiales con características anisotrópicas, es decir, con propiedades diferentes en diferentes direcciones. Es ampliamente utilizado en metales, aleaciones metálicas, compuestos y cerámica. Es especialmente útil para detectar defectos en materiales con alta conductividad eléctrica, ya que se basa en medir la variación de la impedancia eléctrica a través del material.

- **Ultrasonido por líquido:** Se basa en la propagación de ondas de sonido a través de un líquido mediante el uso de un transductor sumergido en el líquido. El transductor envía ondas de ultrasonido a través del líquido y las ondas reflejadas son detectadas por el mismo transductor o por otro transductor.

El ultrasonido por líquido se utiliza principalmente para detectar defectos en materiales que no son accesibles a otras técnicas de ensayos no destructivos, ya que permite la inspección de piezas con formas complejas o de materiales con alta conductividad eléctrica. [25]

El tipo de ultrasonido utilizado en un proceso de medición y detección de fallas afecta directamente a la precisión, sensibilidad, profundidad de detección, compatibilidad con el

material y facilidad de uso del proceso. Cada tipo de ultrasonido tiene sus propias características y ventajas que deben ser consideradas al elegir el adecuado para el material y el tipo de defecto a detectar. Por ejemplo, algunos tipos de ultrasonido son más precisos y sensibles que otros, mientras que otros son más adecuados para materiales con estructura compleja.

- **Precisión:** algunos tipos de ultrasonido como el ultrasonido pulsado-eco y el ultrasonido de onda guiada son más precisos que otros tipos de ultrasonido como el ultrasonido convencional, lo que permite detectar defectos más pequeños en el material.
- **Sensibilidad:** el ultrasonido de impedancia, por ejemplo, es más sensible a cambios en las características eléctricas del material, lo que permite detectar defectos en materiales con alta conductividad eléctrica.
- **Profundidad de detección:** el ultrasonido convencional tiene una profundidad de detección limitada, mientras que otros tipos como el ultrasonido por líquido tienen una profundidad de detección mayor.
- **Compatibilidad con el material:** el ultrasonido de onda guiada es uno de los tipos de ultrasonido más adecuados para materiales con estructura compleja, mientras que otros tipos como el ultrasonido convencional son más adecuados para materiales homogéneos.
- **La facilidad de uso:** algunos tipos de ultrasonido son más fáciles de usar que otros. Por ejemplo, el ultrasonido convencional es más fácil de usar que el ultrasonido de onda guiada.

Es importante elegir el tipo de ultrasonido adecuado para obtener los mejores resultados en el proceso de medición y detección de fallas.

La inspección de un material metálico por ultrasonido convencional implica los siguientes pasos: [26]

- **Preparar el material:** se limpia y se prepara el área a inspeccionar para asegurar que esté libre de contaminación y capas superficiales.

- **Seleccionar el transductor:** se selecciona un transductor adecuado para el material y el tamaño de la pieza a inspeccionar.
- **Colocar el transductor en contacto con el material:** el transductor se coloca en contacto con el material a inspeccionar, utilizando un medio acústico para mejorar la transmisión de las ondas de ultrasonido.
- **Generar la señal de ultrasonido:** se genera una señal de ultrasonido mediante un dispositivo de generación de señal y se envía a través del transductor al material.
- **Recibir la señal reflejada:** las ondas de ultrasonido reflejadas regresan al transductor y son detectadas por el mismo o por otro transductor.
- **Procesar la señal:** la señal reflejada es procesada para generar una imagen o una señal que indica la presencia o ausencia de defectos en el material.
- **Interpretar los resultados:** los resultados de la inspección son interpretados por un inspector calificado para determinar la presencia y ubicación de defectos en el material.
- **Realizar una evaluación de seguridad:** se realiza una evaluación de seguridad para determinar si el material es seguro para su uso o si necesita reparaciones o reemplazo.

La preparación adecuada del material metálico es esencial para garantizar una inspección por ultrasonido precisa y confiable. Los siguientes son algunos pasos recomendados para preparar el material metálico antes de la inspección con ultrasonido:

- **Identificación de la zona a inspeccionar:** es importante identificar y marcar la zona a inspeccionar para asegurar que se inspeccione toda la zona deseada.
- **Limpieza:** el material debe estar limpio y libre de suciedad, grasa, polvo, óxido u otros contaminantes. Esto se puede lograr mediante el uso de soluciones limpiadoras y/o cepillos de cerdas suaves.
- **Eliminación de capas superficiales:** si el material tiene capas superficiales, como pintura, revestimientos, etc., deben ser eliminadas para asegurar que las ondas de ultrasonido puedan penetrar en el material.

- **Secado:** después de limpiar y eliminar las capas superficiales, el material debe estar completamente seco antes de la inspección.
- **Posicionamiento:** el material debe estar posicionado de manera que el transductor pueda estar en contacto con el material y se pueda obtener una buena transmisión de las ondas de ultrasonido.
- **Aplicar medio acústico:** si se utiliza un medio acústico, debe aplicarse en la zona de contacto entre el transductor y el material para mejorar la transmisión de las ondas de ultrasonido.
- **La selección del transductor** adecuado para la inspección de un material metálico por ultrasonido convencional depende de varios factores, tales como:
- **El tamaño y la forma de la pieza a inspeccionar:** se debe elegir un transductor con un diámetro o tamaño de haz adecuado para cubrir la zona a inspeccionar.
- **La frecuencia de trabajo:** se debe elegir un transductor con una frecuencia de trabajo que sea adecuada para el material a inspeccionar. La frecuencia de trabajo más común para materiales metálicos es de 2 a 5 MHz.
- **La sensibilidad:** se debe elegir un transductor con una sensibilidad adecuada para detectar defectos en el material a inspeccionar.
- **La capacidad de contacto:** se debe elegir un transductor con una capacidad de contacto adecuada para asegurar una buena transmisión de las ondas de ultrasonido.
- **La compatibilidad con el medio acústico:** se debe elegir un transductor que sea compatible con el medio acústico utilizado para mejorar la transmisión de las ondas de ultrasonido.
- **El procesamiento de la señal** reflejada durante la medición por ultrasonido se refiere al proceso mediante el cual se analiza y evalúa la señal reflejada detectada por el transductor para determinar la presencia o ausencia de defectos en el material. El procesamiento de la señal reflejada se realiza mediante un sistema de adquisición de datos, que puede incluir un osciloscopio, un dispositivo de procesamiento de señal y un software para generar y analizar imágenes.

El procesamiento de la señal reflejada incluye varios pasos, tales como:

- **Adquisición de datos:** la señal reflejada es capturada y registrada por el sistema de adquisición de datos.
- **Filtrado:** la señal registrada se somete a un proceso de filtrado para eliminar el ruido y mejorar la calidad de la señal.
- **Amplificación:** la señal filtrada se amplifica para aumentar su nivel y mejorar la detección de defectos.
- **Análisis espectral:** la señal amplificada se analiza espectralmente para determinar su contenido en frecuencia y para identificar las características de la señal que pueden indicar la presencia de defectos.
- **Procesamiento de imágenes:** la señal analizada se procesa para generar una imagen o una señal que indica la presencia o ausencia de defectos en el material.

2.6 Defectos y palpadores

Un ensayo de ultrasonido puede detectar una variedad de defectos en los materiales, incluyendo: [27]

- **Inclusiones:** son partículas de material extraño que se encuentran en el interior del material, como por ejemplo burbujas de aire, partículas de carbón, etc.
- **Poros:** son vacíos o huecos en el interior del material, que pueden ser causados por una mala solidificación del material o por la corrosión.
- **Fisuras:** son grietas en el material, que pueden ser causadas por fatiga, esfuerzos de corte, corrosión, etc.
- **Des laminaciones:** son capas delgadas de material que se han desprendido del material base, causadas por fatiga, corrosión, etc.
- **Falta de Penetración:** son zonas en las que el material no ha sido soldado correctamente.
- **Sobre penetración:** son zonas en las que el material ha sido soldado en exceso.

- Falta de adherencia: son zonas en las que el material no está adherido adecuadamente al material base.
- **Cambios en la Densidad:** son cambios en la densidad del material, que pueden indicar una mala calidad del material o una mala soldadura.

Para diferenciar estos defectos al momento de realizar la interpretación de los datos, se utilizan diferentes técnicas de análisis de la señal reflejada, como el análisis espectral, el análisis temporal, el análisis de la amplitud y la generación de imágenes. Estas técnicas permiten caracterizar los defectos en función de su forma, tamaño, ubicación y otras características, lo que facilita su identificación y su clasificación. También se pueden utilizar técnicas de procesamiento de imágenes para mejorar la visualización de los defectos y facilitar su interpretación.

De acuerdo con la orientación y características del defecto, además de las propiedades acústicas de la pieza, es posible observarlo mejor utilizando diferentes tipos de sondas de ultrasonido, llamadas palpadores. Los dos tipos de palpador más usuales son el recto (Figura 5) y el angular (Figura 6). Ambos tipos de sondas funcionan transmitiendo pulsos de ultrasonido a través de la pieza que se está inspeccionando, y luego registrando la señal reflejada que regresa a la sonda. Esta señal reflejada se analiza para determinar si hay defectos en la pieza. El tipo de palpador se selecciona en función de la mejor forma de visualizar la grieta.

Figura 5

Palpador recto [29]

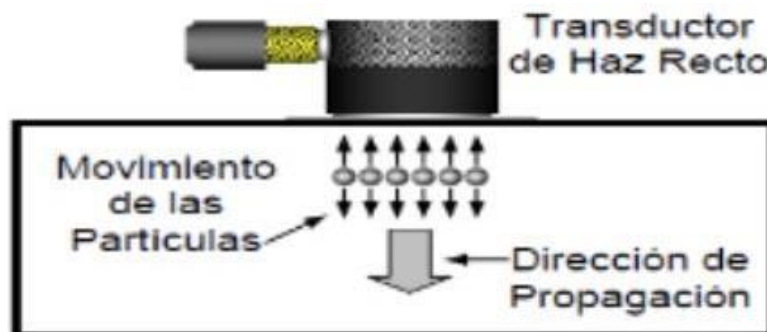
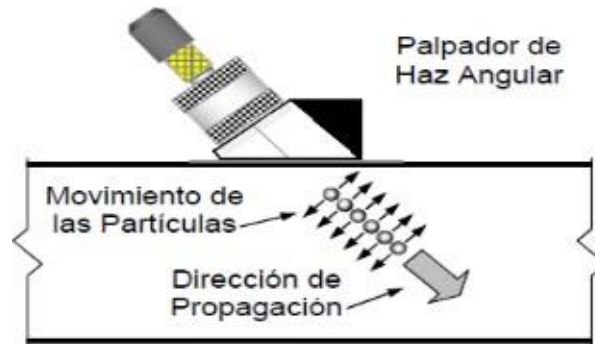


Figura 6

Palpador angular [29]



El palpador recto es una sonda plana y recta que se utiliza para la inspección de superficies planas y para la detección de defectos en la dirección longitudinal. El palpador angular, por otro lado, es una sonda en forma de ángulo recto que se utiliza para la inspección de bordes y esquinas, y para la detección de defectos en la dirección transversal. El palpador recto es efectivo para detectar defectos superficiales y subsuperficiales, así como para inspeccionar soldaduras longitudinales. No es tan efectivo para detectar defectos transversales o angulares. El palpador angular es conveniente para inspecciones de soldaduras en ángulos y para detectar defectos transversales y angulares. No es tan eficaz para detectar defectos superficiales o subsuperficiales.

Ambos tipos de sondas funcionan transmitiendo pulsos de ultrasonido a través de la pieza que se está inspeccionando, y luego registrando la señal reflejada que regresa a la sonda. Esta señal reflejada se analiza para determinar si hay defectos en la pieza.

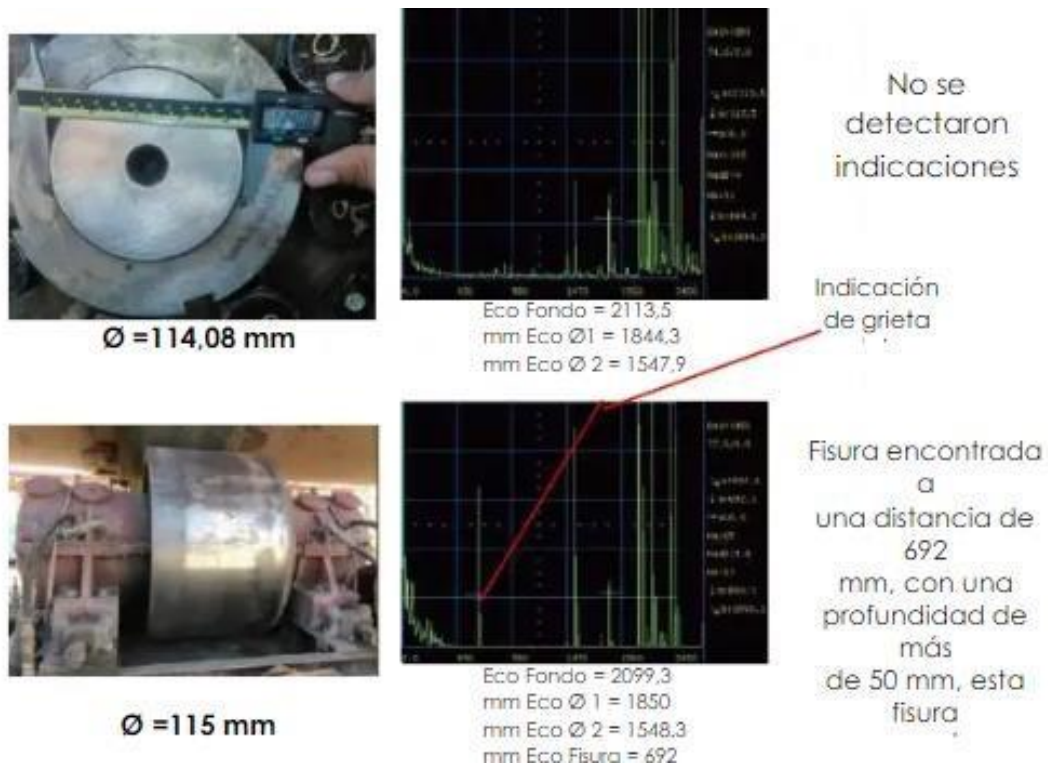
El uso de un palpador plano o un palpador angular para visualizar una grieta (Figura 7) en una pieza depende de la orientación de la grieta y de las propiedades acústicas de la pieza:

- Si la grieta está en una superficie plana y es paralela a la superficie, es más fácil visualizarla con un palpador plano, ya que los pulsos de ultrasonido se reflejan directamente desde la superficie de la grieta.

- Si la grieta está en una superficie plana, pero es perpendicular a la superficie, es más fácil visualizarla con un palpador angular, ya que los pulsos de ultrasonido se reflejan de manera diferente a medida que inciden en la grieta desde un ángulo.
- Si la grieta está en una superficie curva o en un borde, es más fácil visualizarla con un palpador angular, ya que los pulsos de ultrasonido se reflejan en diferentes direcciones a medida que inciden en la grieta desde diferentes ángulos.

Figura 7

Observación de una grieta [31]



La visualización de una cavidad en una pieza con un palpador plano o un palpador angular depende de la geometría de la cavidad y de las propiedades acústicas de la pieza.

- Si la cavidad es profunda y está en una superficie plana, es más fácil visualizarla con un palpador plano, ya que los pulsos de ultrasonido se reflejan directamente desde la pared de la cavidad.

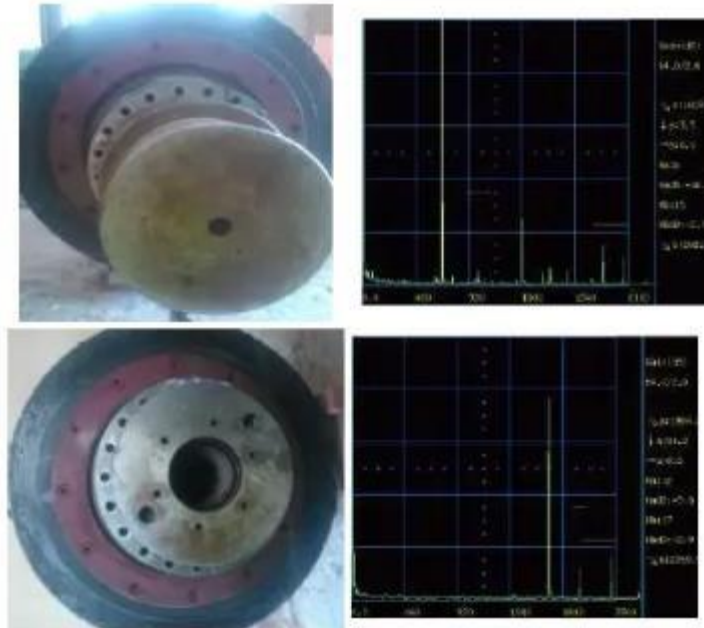
- Si la cavidad es profunda y está en una superficie curva, es más fácil visualizarla con un palpador angular, ya que los pulsos de ultrasonido se reflejan en diferentes direcciones a medida que inciden en la pared de la cavidad desde diferentes ángulos.
- Si la cavidad es poco profunda y está en una superficie plana, es más fácil visualizarla con un palpador angular, ya que los pulsos de ultrasonido se reflejan desde la pared de la cavidad en un ángulo diferente a la dirección longitudinal de la pieza.

El uso de un palpador plano o un palpador angular para visualizar un cambio de sección en un eje (Figura 8) depende de la orientación del cambio de sección y de las propiedades acústicas del eje.

- Si el cambio de sección es paralelo a la dirección longitudinal del eje, es más fácil visualizarlo con un palpador plano, ya que los pulsos de ultrasonido se reflejan directamente desde el cambio de sección.
- Si el cambio de sección es perpendicular a la dirección longitudinal del eje, es más fácil visualizarlo con un palpador angular, ya que los pulsos de ultrasonido se reflejan de manera diferente a medida que inciden en el cambio de sección desde un ángulo

Figura 8

Cambio de sección en un eje [31]



Un ensayo de ultrasonido se realiza enviando ondas de ultrasonido a través de la superficie de la pieza y midiendo el tiempo que tardan en viajar a través de la pieza y regresar a la superficie, de manera que es posible conocer la profundidad de un defecto como.

Para determinar la profundidad de una grieta, se utiliza un transductor de alta frecuencia que emite ondas de ultrasonido hacia la pieza. Cuando las ondas de ultrasonido encuentran una grieta, parte de la energía es reflejada de regreso al transductor. La cantidad de tiempo que tarda en viajar desde el transductor hasta la grieta y regresar a la superficie se puede medir y utilizar para calcular la profundidad de la grieta.

Es importante tener en cuenta que la precisión de la medición de la profundidad de la grieta depende de varios factores, como la geometría de la pieza, la orientación de la grieta, la dirección de la inspección y la frecuencia de la onda de ultrasonido utilizada.

Otros tipos de palpadores incluyen:

- **Palpador convexo:** Este tipo de palpador se utiliza para inspeccionar superficies curvas y cóncavas. Por ejemplo, es conveniente usar un palpador convexo para inspeccionar la superficie interna de un recipiente cilíndrico.
- **Palpador plano:** Este tipo de palpador se utiliza para inspeccionar superficies planas y lisas. Por ejemplo, es conveniente usar un palpador plano para inspeccionar la superficie exterior de una placa de acero.

En general, el ensayo de ultrasonido para determinar la profundidad de una grieta se realiza utilizando un equipo de inspección por ultrasonido y un transductor especialmente diseñado para la tarea. Es importante tener en cuenta que la interpretación de los resultados y la medición precisa de la profundidad de la grieta requieren una formación y experiencia adecuadas en el uso de equipos de ultrasonido.

La herramienta utilizada para convertir el tiempo medido en unidades de distancia es un software de procesamiento de señales o un dispositivo electrónico integrado en el equipo de inspección por ultrasonido. El principio físico utilizado es la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido en el material de la pieza. La velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido es conocida y se puede medir en el material de la pieza antes del ensayo. Una vez que se conoce la velocidad de propagación, se puede utilizar la fórmula de tiempo de ida y vuelta para calcular la distancia recorrida por las ondas de ultrasonido.

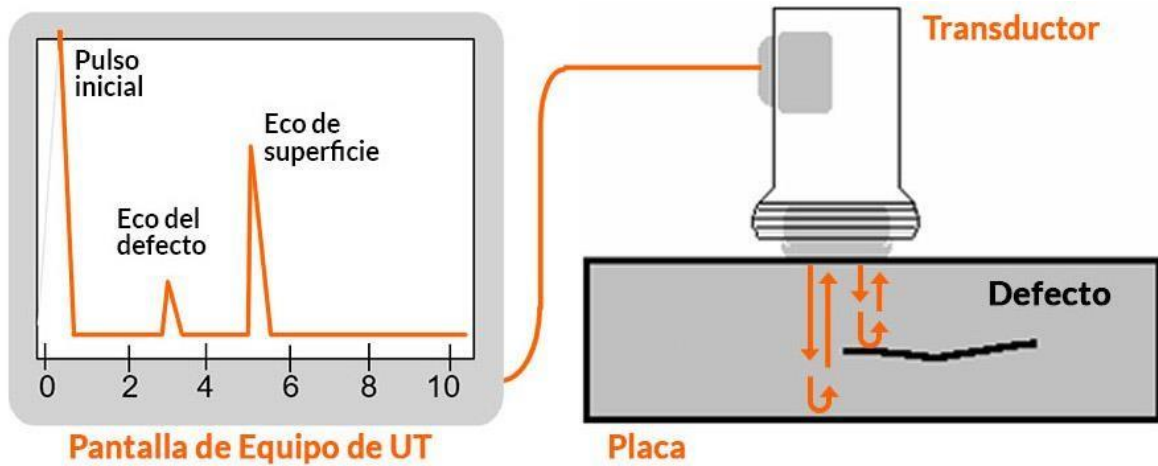
La fórmula utilizada para calcular la profundidad de la grieta es la siguiente:

$$\text{Profundidad} = (\text{Tiempo de ida y vuelta})/2 * \text{Velocidad de propagación}$$

Donde el tiempo de ida y vuelta es el tiempo medido desde que se emite la onda de ultrasonido hasta que regresa a la superficie y la velocidad de propagación es la velocidad a la que las ondas de ultrasonido se propagan en el material de la pieza. (Figura 9)

Figura 9

Medida de defecto por ultrasonido [30]



Es importante tener en cuenta que la precisión de la medición de la profundidad de la grieta depende de la precisión de la medida del tiempo y de la velocidad de propagación, así como de otros factores como la geometría de la pieza, la orientación de la grieta, la dirección de la inspección y la frecuencia de la onda de ultrasonido utilizada.

3. Metodología

Para la adecuada realización del estado del arte se tiene condicionado a la revisión de mínimo 15 fuentes bibliográficas entre catálogos, libros y artículos.

Teniendo en cuenta el conocimiento sobre que es el equipo de ultrasonido, como funciona, que diferentes tipos de equipos existen, que se mide, entre otras preguntas claras, se sigue a realizar un borrador del procedimiento que incluye las especificaciones mínimas que deben tener los equipos y el informe, este luego se socializará de manera que se pueda tener un procedimiento óptimo de acuerdo con retroalimentaciones obtenidas.

Teniendo una parte crítica que ya haya fallado, mediante cálculos de resistencia de materiales y simulaciones en elementos finitos, buscamos proponer el punto de seguimiento con ultrasonido y plantear la estrategia que relaciona los modos de falla del elemento a inspeccionar con el procedimiento propuesto, además del análisis a este parte crítica y hacernos varias

preguntas, fallo en el punto que debería haber fallado, por qué falló, se pudo prevenir con un correcto seguimiento por ultrasonido?

4. Estado del arte

En la caracterización de materiales, el ultrasonido se utiliza comúnmente en la evaluación no destructiva (END) de metales y aleaciones, así como en la detección de defectos en materiales compuestos, cerámicos y poliméricos. Los equipos de ultrasonido se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo la industria aeroespacial, la energía, la automoción y la construcción. Por medio de esta técnica es posible medir la densidad, el espesor, la elasticidad, la resistencia a la tracción y otras propiedades mecánicas. Los equipos de ultrasonido también se utilizan para detectar defectos internos en los materiales, como poros, inclusiones y fisuras.

En cuanto al mantenimiento, el ultrasonido se utiliza para detectar y medir la gravedad de los defectos en las estructuras, como por ejemplo en vigas, tubos, tanques y tuberías. Los equipos de ultrasonido se utilizan para detectar la corrosión, la pérdida de espesor y las fisuras en las estructuras. Esto permite a los ingenieros planificar el mantenimiento de manera proactiva, lo que puede ayudar a evitar fallas y prolongar la vida útil de las estructuras.

En general, el uso de equipos de ultrasonido en la caracterización de materiales para la gestión de mantenimiento ha demostrado ser una técnica eficaz y eficiente. Los avances en la tecnología de los equipos de ultrasonido, como la introducción de sistemas de procesamiento de señal y la mejora de la resolución de las imágenes, han permitido obtener información cada vez más precisa y detallada sobre los materiales y las estructuras.

Con el fin de profundizar en los ensayos no destructivos por ultrasonido como herramienta en el mantenimiento preventivo, se realiza un estudio del estado del arte teniendo en cuenta la tecnología disponible, los equipos comerciales y los estudios científicos desarrollados en torno a este tema.

4.1 Tecnología disponible

La evaluación no destructiva (END) por ultrasonido es una técnica que utiliza ondas sonoras de alta frecuencia para obtener información sobre la estructura y propiedades de los materiales. Según (Aend, 2017) [6], funcionamiento básico de los END por ultrasonido es el siguiente:

- **Transductor:** El transductor es el dispositivo que convierte la energía eléctrica en ondas sonoras de alta frecuencia y las envía al material. El transductor también recibe las ondas sonoras reflejadas y las convierte de nuevo en señales eléctricas.
- **Ondas sonoras:** Las ondas sonoras emitidas por el transductor viajan a través del material y se reflejan en las interfaces entre los diferentes componentes del material, como por ejemplo entre diferentes tipos de materiales, defectos, inclusiones y fisuras.
- **Recepción y procesamiento de señales:** las ondas sonoras reflejadas son recibidas por el transductor y convertidas en señales eléctricas. Estas señales se procesan para generar imágenes o medidas de las propiedades del material.
- **Análisis de resultados:** Los resultados obtenidos a través del END por ultrasonido se analizan para detectar defectos, medir las propiedades mecánicas y obtener información sobre la estructura interna del material.

Existen varios tipos de equipos de ultrasonido para evaluación no destructiva (END) disponibles en el mercado, algunos de ellos son:

- **Sistemas de inspección por reflexión:** Estos sistemas utilizan un transductor para emitir un haz de ondas sonoras que se reflejan en las interfaces entre los diferentes componentes del material, como defectos, inclusiones y fisuras. Los sistemas de inspección por reflexión se utilizan para detectar defectos internos en los materiales.
- **Sistemas de inspección por transmisión:** Estos sistemas utilizan dos transductores para emitir y recibir ondas sonoras que atraviesan el material. Se

utilizan para medir propiedades mecánicas como la densidad, el espesor, la elasticidad y la resistencia a la tracción.

- **Sistemas de inspección por modulación de amplitud:** Estos sistemas utilizan un transductor para emitir un haz de ondas sonoras que se reflejan en las interfaces entre los diferentes componentes del material. La amplitud de las ondas sonoras reflejadas se modula para detectar defectos internos en los materiales.
- **Sistemas de inspección por pulsos de corta duración:** Estos sistemas utilizan un transductor para emitir un haz de ondas sonoras de corta duración, y se utilizan para detectar y medir defectos internos en los materiales.
- **Sistemas de inspección por ondas de Lamb:** Estos sistemas utilizan un transductor para emitir ondas sonoras que se reflejan en la superficie del material, estas ondas son conocidas como ondas de Lamb y son utilizadas para medir propiedades mecánicas del material.

4.2 Artículos científicos en torno a los END por ultrasonido

Dos de los principales recursos bibliográficos para el estudio y conocimiento de desarrollos en la tecnología de los END por ultrasonido y su aplicación en el mantenimiento preventivo incluyen las revistas científicas (*The online Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, s. f.) [7] y (*Journal of Applied Physics | American Institute of Physics*, s. f.) [8], en donde se publican los desarrollos científicos tanto en el principio de funcionamiento de esta tecnología, como en su aplicación a nivel práctico y experimental. A continuación, se enuncian algunos de estos artículos incluyendo una descripción general de cada estudio.

- En («Ultrasonic characterization of material properties using Lamb waves») se discute sobre el uso de sistemas de inspección por ondas de Lamb para medir diferentes propiedades de los materiales, incluyendo la densidad, módulo elástico y espesor. [9]

- En investigaciones de Dwivedi et al. se estudia el uso de monitoreo por ondas ultrasónicas para la caracterización de materiales compuestos, incluyendo la detección de defectos internos. (2018) [10]
- En («constant group velocity ultrasonic guided wave inspection for corrosion and erosion monitoring in pipes», 2009) se utiliza esta técnica en el monitoreo de corrosión y erosión interna en tubos, aprovechando el modo de flexión fundamental para medir el espesor promedio de pared en la ruta de inspección. [11]
- En el estudio de (Daniel & Thompson, s. f.) se evalúa la integridad estructural por medio de ensayos de ultrasonido, en estructuras de viga, tuberías y tanques. [12]
- Wirdelius y Persson (2012) realizan en su investigación un modelo de predicción en un software de simulación de ultrasonido para la implementación del mantenimiento predictivo en tuberías de plantas energéticas nucleares suecas. [13]
- En el estudio de (Gómez & Palacios) se discute el uso de ensayos no destructivos por ultrasonido para la evaluación de la integridad de turbinas de viento para la generación de energías renovables, detectando defectos y fallas. [14]
- Finalmente, en la investigación de (Chung & Singh) se expone el uso de ensayos de ultrasonido para el mantenimiento basado en condición de equipos industriales, haciendo uso de los datos obtenidos de defectos y propiedades de los materiales a partir de la implementación del ensayo. [15]

4.3 Empresas que usan o comercializan equipos de ultrasonido

Los precios de los equipos de ultrasonido para evaluación no destructiva (END) varían dependiendo del tipo de equipo, la marca, las características y las opciones de configuración que se ofrezcan. Algunas de las empresas internacionales que comercializan los diferentes tipos de equipos de ultrasonido disponibles en el mercado son:

- **Olympus Corporation (Sistemas de inspección por reflexión):** es una compañía japonesa conocida por fabricar y vender una amplia gama de equipos de

inspección no destructiva, incluyendo sistemas de inspección por ultrasonido de reflexión. Los equipos de Olympus incluyen sistemas portátiles, sistemas de consola fija, transductores y software de procesamiento de señal, también ofrecen servicios de inspección a diferentes industrias. (Olympus Corporation, s.f.). [16]

Olympus Corporation comercializa el sistema portátil de inspección por reflexión Olympus Omniscan MX2. Este tiene un precio aproximado de entre \$30,000 y \$80,000 dólares dependiendo de las características y opciones seleccionadas.

- **GE Inspection Technologies (Sistemas de inspección por transmisión):** es una compañía especializada en el desarrollo y fabricación de equipos de inspección no destructiva, incluyendo sistemas de inspección por ultrasonido de transmisión. Los equipos de GE Inspection Technologies incluyen sistemas portátiles, sistemas de consola fija, transductores y software de procesamiento de señal. (*Electronics & Sensing / GE Research, s. f.*) [17]

Uno de sus productos es el Sistema de inspección por transmisión GE Phasor XS, que tiene un precio aproximado de entre \$40,000 y \$100,000 dólares dependiendo de las características y opciones seleccionadas.

- **Zetec (Sistemas de inspección por modulación de amplitud):** es una compañía estadounidense especializada en el desarrollo y fabricación de equipos de inspección no destructiva, incluyendo sistemas de inspección por ultrasonido por modulación de amplitud. Los equipos de Zetec incluyen sistemas portátiles, sistemas de consola fija, transductores y software de procesamiento de señal. Estos sistemas se utilizan en una variedad de aplicaciones, como la industria aeroespacial, la energía, la automoción, la construcción y la industria petroquímica. (Zetec, 2021) [18]

Zetec ofrece el Sistema de inspección por modulación de amplitud Zetec Topscan, que tiene un precio aproximado de entre \$50,000 y \$150,000 dólares dependiendo de las características y opciones seleccionadas.

- **Eddyfi Technologies (Sistemas de inspección por pulsos de poca duración):** es una compañía canadiense especializada en el desarrollo y fabricación de equipos de inspección no destructiva, incluyendo sistemas de inspección por ultrasonido

por pulsos de corta duración. Los equipos de Eddyfi Technologies incluyen sistemas portátiles, sistemas de consola fija, transductores y software de procesamiento de señal. (*Non-Destructive Testing Services and Technologies / Eddyfi*, s. f.) [19]

Tienen el sistema de inspección por pulsos de corta duración Eddyfi M2M Mantis, cuyo precio aproximado es de entre \$30,000 y \$100,000 dólares dependiendo de las características y opciones seleccionadas.

- **Cygnus Instruments (sistemas de inspección por ondas Lamb):** es una compañía inglesa especializada en el desarrollo y fabricación de equipos de inspección no destructiva, incluyendo sistemas de inspección por ultrasonido por ondas Lamb. Los equipos de Cygnus Instruments incluyen sistemas portátiles, sistemas de consola fija, transductores y software de procesamiento de señal. (McGuinness, 2023) [20]

Esta empresa comercializa el Sistema de inspección por ondas Lamb Cygnus 1, con un precio que oscila entre los \$20,000 y \$50,000 según la necesidad.

En Colombia existen compañías que cumplen con la labor tanto de la comercialización de los equipos para END por ultrasonido, como de prestar el servicio de inspección o realizar el alquiler de sus equipos. Compañías como **Isercor** alquilan sus equipos por precios que varían entre los 4,5 y los 35 millones de pesos mensualmente (*Alquiler y Venta de Equipos – Isercor S.A.S.*, s. f.) [21]

La compañía **SGS**, por ejemplo, ofrece formación en ensayos no destructivos END, entre los cursos que ofrece se encuentra el de “Formación en Pruebas por Ultrasonidos”, para la formación y certificación del personal de sus clientes de acuerdo con las normas vigentes. (SGS Société Générale de Surveillance SA, s. f.) [22]

La empresa **INGYEND SAS** se dedica a la prestación de servicios de ingeniería y ensayos no destructivos en el país, con experiencia en los sectores militar, petroquímico, papelerero, naval, aeronáutico y automotriz. En su portafolio de servicios se encuentra el ensayo END por ultrasonido para la detección de irregularidades en todo tipo de material. (*ULTRASONIDO – Ingyend*, s. f.) [23]

4.4 Normas

En Colombia, no existe una norma específica para la inspección por ultrasonido. Sin embargo, para garantizar la calidad de la inspección y proteger la seguridad de las personas y el medio ambiente, es importante seguir las normas internacionales relevantes y las mejores prácticas en la industria. Algunas normas internacionales que se aplican comúnmente en Colombia incluyen las siguientes:

- **ASTM E 213: Standard Practice for Ultrasonic Testing of Metal Pipe and Tubing.** Esta norma establece los procedimientos para la inspección por ultrasonido de tubos y tuberías de metal. Se especifica la selección de equipos y materiales de prueba, la preparación de la superficie de la prueba, la calibración de los equipos de prueba y la realización de la prueba.
- **ASTME 571: Standard Practice for Ultrasonic Inspection of Metal Pipe and Tubing.** Esta norma es similar a la ASTME 213 y establece los procedimientos para la inspección por ultrasonido de tubos y tuberías de metal. Se describen las técnicas de inspección, los equipos de prueba y la interpretación de los resultados de la prueba.
- **ASME Sec. V: Nondestructive Examination.** Establece los requisitos para la inspección no destructiva en una amplia variedad de componentes y materiales, incluyendo la inspección por ultrasonido. Se describen las técnicas de inspección, los equipos de prueba y los procedimientos para la evaluación y la interpretación de los resultados de la prueba.
- **ISO 17640: Non-Destructive Testing of Welds - Ultrasonic Testing.** Esta norma establece los requisitos para la inspección por ultrasonido de uniones soldadas. Se describen los procedimientos de prueba, los equipos de prueba y la interpretación de los resultados de la prueba.
- **ISO 9712: Non-Destructive Testing - Qualification and Certification of NDT Personnel.** Esta norma establece los requisitos para la calificación y certificación

de personal especializado en inspección no destructiva, incluyendo la inspección por ultrasonido. Se describen los requisitos de formación, experiencia y habilidades que deben cumplir los profesionales para ser calificados y certificados para realizar inspecciones por ultrasonido.

Estas normas proporcionan especificaciones importantes para garantizar la calidad y la precisión de la inspección por ultrasonido, y es importante seguirlas para garantizar la seguridad de las personas y el medio ambiente y para obtener resultados precisos y confiables de la inspección.

De las normas mencionadas anteriormente, la norma ISO 17640: Non-Destructive Testing of Welds - Ultrasonic Testing es la que se aplica específicamente a la inspección de soldaduras por ultrasonido. Esta norma establece los requisitos para la inspección por ultrasonido de uniones soldadas, incluyendo la descripción de los procedimientos de prueba, los equipos de prueba y la interpretación de los resultados de la prueba.

Además de la ISO 17640, también pueden ser aplicables otras normas, como la ASTM E 213 o la ASME Sec. V, dependiendo de los requisitos específicos de la inspección y el uso previsto del producto inspeccionado. Sin embargo, la ISO 17640 es la norma específica para la inspección de soldaduras por ultrasonido.

5. Propuesta de procedimiento

5.1 Procedimiento

Los equipos propuestos para inspeccionar en mineros:

- Eje tambor superior
- Eje inferior
- Eje malacate de escala
- Eje tambor loco
- Rodamientos de las bombas

- Rodamientos del motor
- Rodamientos de los sistemas de transmisión

5.2 Instructivo de inspección por ultrasonido mineros

5.2.1 Objetivo

Describir el procedimiento a ser usado para realizar ensayos con ultrasonido a partes de equipos de mineros S.A, para verificar la seguridad de estos, en especial para los ejes y rodamientos que requieren ser inspeccionados para la detección temprana de defectos y/o la evaluación del estado de estos.

5.2.2 Clasificación de personal

Los ensayos deberán ser realizados por una persona calificada al menos como nivel II según ISO 9712:2002 ó SNT-TC-1A 96, A98 [37].

Una persona certificada para Nivel II debe haber demostrado competencia para llevar a cabo END (Ensayo No Destructivo) de acuerdo con procedimientos establecidos. Dentro del alcance de la competencia definida en el certificado, el personal Nivel II puede estar autorizado por el empleador para realizar las siguientes actividades:

- Seleccionar la técnica de END para el método de ensayo que se va a usar.
- Definir las limitaciones de la aplicación del método de ensayo.
- Traducir los códigos, normas, especificaciones y procedimientos de END a instrucciones de END adaptadas a las condiciones de trabajo reales.
- Hacer el montaje y verificar el reglaje de los equipos.
- Realizar y supervisar ensayos.
- Interpretar y evaluar los resultados de acuerdo con códigos, normas, especificaciones o procedimientos aplicables.
- Preparar instrucciones de END.

- Llevar a cabo y supervisar todas las tareas del Nivel II o por debajo de este.
- orientación al personal de Nivel II o por debajo de este.
- Presentar los resultados de los ensayos no destructivos.
- Preparar instrucciones para el desarrollo de un trabajo seguro y supervisar su cumplimiento.
- Implementar, definir procedimientos y planes de manejo ambiental para disposición de residuos resultantes de los END y monitorear cumplimiento.

5.2.3 Parametrización del equipo ultrasónico

La parametrización del equipo de inspección por ultrasonido es un proceso crítico que debe realizarse antes de iniciar cualquier inspección no destructiva. Esto asegura que el equipo esté configurado correctamente para las condiciones específicas de la inspección y que los resultados sean precisos y confiables.

Los siguientes son algunos de los parámetros críticos que deben ser parametrizados antes de realizar la inspección por ultrasonido:

- **Frecuencia de la sonda:** La frecuencia de la sonda es un factor importante que afecta la penetración y la resolución de la señal. Se debe seleccionar una frecuencia adecuada para el material y la geometría del objeto inspeccionado.
 - Diámetro del elemento del transductor.
 - Velocidad de propagación del material a inspeccionar.
 - Frecuencia del transductor.
 - Resolución del equipo ultrasónico.
- **Ganancia:** La ganancia se utiliza para ajustar la amplificación de la señal y controlar el nivel de ruido. Se debe ajustar adecuadamente para asegurar una señal fuerte y clara.
- **Sensibilidad:** La sensibilidad se utiliza para ajustar la amplificación de la señal de la sonda y se debe ajustar para lograr la mejor señal/ruido.
- **Velocidad de onda:** La velocidad de onda se debe establecer de acuerdo con la velocidad de la onda en el material objeto de inspección.

Con estos datos se puede calcular:

- Detectabilidad.
- Campo cercano.
- Longitud de onda.
- Divergencia del haz sónico.

Entendiéndose teóricamente por detectabilidad como la mitad de la longitud de onda y la divergencia es lo que expansiona el haz en su recorrido. Si la inspección se realiza longitudinalmente, buscando indicaciones a lo largo de elemento se puede calcular la distancia mínima en la cual el haz sónico empieza a detectar lecturas reales al interior del elemento inspeccionado.

En cambio, si la inspección es transversal los parámetros cambian, ya que la velocidad de propagación se reduce para la inspección transversal. En este caso se debe tener en cuenta lo siguiente:

- A mayor diámetro del elemento mayor va a ser el campo cercano.
- A mayor frecuencia mayor es el campo cercano.
- Mientras mayor es la velocidad de propagación, menor será el campo cercano.
- Modo de operación: El modo de operación incluye tanto la técnica de inspección como el modo de visualización de la señal. Se debe seleccionar un modo de operación adecuado para el objetivo de la inspección y las condiciones específicas.

5.2.4 Inspección general por ultrasonido de los equipos de mineros

La inspección por ultrasonido de los equipos de mineros es una técnica de inspección no destructiva que se utiliza para detectar defectos en materiales, piezas y estructuras, como inclusiones, fisuras, falta de lubricante, daño de pista, otros defectos. Los siguientes son los pasos generales de una inspección por ultrasonido para ejes y rodamientos

- **Preparación:** Se debe preparar el equipo para la inspección, lo que incluye limpiar la superficie y asegurarse de que esté seca y libre de grasa y otros contaminantes, además de ser una superficie en lo posible suavizada para evitar posibles interferencias, en caso de que no cumpla se debe pulir o lijar la superficie, se recomienda un acabado superficial de $Ra = 6,3 \mu\text{m}$ para superficies maquinadas y $12,5 \mu\text{m}$ para superficies granalladas [36].
- **Selección del palpador:** Se debe seleccionar el palpador adecuado para la inspección, teniendo en cuenta la frecuencia, la configuración y la forma de la pieza a inspeccionar.
- **Parametrización del equipo:** Se deben ajustar los parámetros del equipo, como la frecuencia, la ganancia y la sensibilidad, para garantizar una señal clara y precisa.
- **Colocación del palpador:** El palpador se coloca en contacto con la pieza a inspeccionar (eje, rodamiento) y se mueve lentamente a lo largo de la superficie del para recopilar la información acústica.
- **Análisis de los resultados:** Evaluar los datos recolectados y las marcas de inspección para determinar la gravedad del problema y la necesidad de reparaciones o reemplazo.
- **Documentación:** Se documentan los resultados de la inspección, incluyendo cualquier información relevante, como la ubicación y la extensión de los defectos.

5.2.5 *Acoplante*

La selección del acoplante para ensayos no destructivos por ultrasonido dependerá de varios factores, como el material a inspeccionar, la geometría de la pieza, la temperatura de la pieza y el tipo de equipo de ultrasonido utilizado se sugiere un acoplante con viscosidad alta (ISO 150) o grasa

Algunos acoplantes comunes para ensayos no destructivos por ultrasonido incluyen:

- **Gel acuoso:** es un acoplante común para la mayoría de las aplicaciones de ultrasonido y es adecuado para la mayoría de los materiales.

- Aceite: se utiliza comúnmente para materiales de alta temperatura y se puede usar en piezas de formas irregulares.
- Cera: es adecuada para materiales con superficies rugosas y puede soportar altas temperaturas.
- Agua: se utiliza comúnmente para aplicaciones de ultrasonido en piezas delgadas o pequeñas.

5.2.6 Calibración de equipos de ultrasonido

La calibración de un equipo de ultrasonido pulso/eco requiere de ciertos conocimientos técnicos y habilidades, por lo que se recomienda que un profesional capacitado en la materia realice el proceso.

- Asegúrate de que el equipo esté apagado antes de comenzar la calibración.
- Verifica que los transductores estén en buen estado y sin daños visibles.
- Conecta el equipo a una fuente de alimentación confiable y enciéndelo.
- Ajusta el nivel de ganancia del equipo para obtener la señal adecuada.
- Ajusta la escala de tiempo para que la señal se ajuste a la pantalla del equipo.
- Coloca un objeto de calibración en el transductor y ajusta la configuración de ganancia para que la señal del objeto de calibración sea visible.
- Verifica la precisión de la frecuencia del transductor utilizando un osciloscopio y un generador de señales.
- Mide la amplitud de la señal del objeto de calibración y ajusta la ganancia del equipo para obtener la amplitud deseada.
- Realiza pruebas de resolución espacial y temporal para asegurarte de que el equipo esté funcionando correctamente.
- Verifica la calibración de la profundidad de penetración ajustando el enfoque del transductor y midiendo la profundidad de la imagen.

La calibración del equipo de ultrasonido pulso/eco utilizado en Ensayos no Destructivos (END) se realiza según la norma internacional ISO 16827: "Ensayos no destructivos - Caracterización y verificación de los equipos de ultrasonidos utilizados en END - Parte 1: Instrumentos de pulso-eco".

Esta norma establece los requisitos y procedimientos para la calibración de los equipos de ultrasonido pulso/eco utilizados en END, incluyendo la medición de la amplitud, la resolución espacial y temporal, la frecuencia y la sensibilidad.

Es importante destacar que la norma ISO 16827 es solo una de las normas aplicables en el campo de los END.

Este procedimiento define un sistema de control de las características de equipos de ultrasonidos del tipo pulso/eco y palpadores bajo las normas DIN 54120, DIN 54122, ASTM E317, ASTM E127.

- La calibración será verificada al menos cada 3 meses y toda vez que existan anomalías de uso en el equipo e inmediatamente después de cada reparación.
- Al calibrarse un equipo se volcarán los resultados del proceso a un "Certificado de Calibración" y se colocará sobre el mismo una "Tarjeta de Calibración".

5.2.7 Bloques de calibración

Se usarán bloques de calibración contruidos según la norma ASTM E127 y el Bloque V1 según DIN 54120.

El bloque básico de calibración V2 permite realizar calibraciones básicas del equipo (retardo del palpador, ángulo real de emisión, velocidad del sonido en el material) tanto para palpadores rectos como angulares. Ver Figura 10

Figura 10

Bloque de calibración V2



El bloque de calibración V1 al igual que el bloque V2 permite realizar calibraciones básicas de los parámetros necesarios para las inspecciones. Adicionalmente

Figura 11

Bloque de calibración V1



5.2.8 Bloques de referencia

Los bloques de referencia permiten parametrizar el equipo de inspección permitiendo identificar y dimensionar los defectos o fisuras al interior de los componentes a evaluar. Los bloques deberán ser construidos de material ultrasónicamente similar al material a ensayar. Los

bloques deberán tener un acabado superficial igual pero no mejor que la de la parte a ensayar. Ver figura 7.

L = length of block determined by the angle of search unit and the vee-path used.

T = thickness of basic calibration block (see Table S1.1).

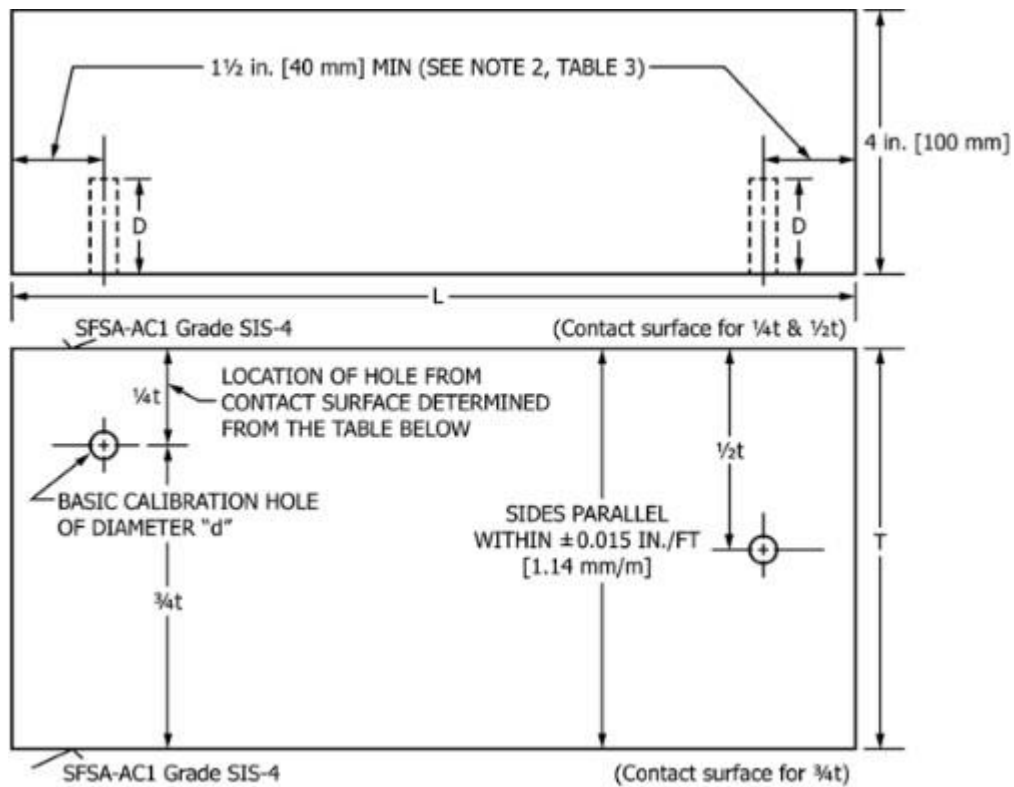
D = depth of side-drilled hole (see Table S1.1).

d = diameter of side-drilled hole (see Table S1.1).

t = nominal production material thickness.

Figura 12

Bloque de referencia básico según norma ASME SA-609M [32]



5.2.9 Método

5.2.9.1 Procedimiento para realizar ultrasonido a rodamientos

- **Preparación:** Antes de realizar el ultrasonido, es importante limpiar el rodamiento y asegurarse de que no tenga ningún tipo de obstrucción o contaminación. También es importante tener un ambiente silencioso y adecuado para la realización de la prueba.
- **Selección del equipo:** Se debe seleccionar el equipo de ultrasonido adecuado para la prueba. Se recomienda utilizar un equipo con un rango de frecuencia de al menos 20 kHz y con una capacidad de amplificación suficiente para detectar señales débiles.
- **Colocación del transductor:** Se debe colocar el transductor del equipo de ultrasonido en la superficie de rodamiento. Es importante asegurarse de que el transductor esté en contacto directo con el rodamiento y de que no haya aire entre el transductor y la superficie de rodamiento.
- **Configuración del equipo:** Se deben configurar los parámetros del equipo de ultrasonido adecuadamente. Se recomienda establecer un nivel de ganancia y una escala de tiempo que permitan detectar la señal del rodamiento.
- **Realización de la prueba:** Una vez que el equipo esté configurado adecuadamente, se debe realizar la prueba. Se recomienda realizar varias mediciones en diferentes puntos del rodamiento para asegurarse de que se detecten todas las señales.
- **Interpretación de los resultados:** Una vez que se ha completado la prueba, se deben interpretar los resultados. Las señales detectadas se pueden comparar con las señales de referencia para determinar el estado del rodamiento. Los resultados también se pueden analizar utilizando técnicas de análisis de espectro para determinar las frecuencias específicas que indican problemas en el rodamiento.
- **Mantenimiento:** Si se detecta algún problema en el rodamiento, se deben tomar medidas para repararlo o reemplazarlo. También es importante realizar pruebas de ultrasonido periódicas en los rodamientos para detectar cualquier problema en una etapa temprana y evitar fallas prematuras.

5.2.9.1.1 Puntos para inspeccionar en un rodamiento

El ultrasonido se puede realizar en diferentes puntos del rodamiento para detectar posibles problemas. Algunos de los puntos comunes donde se realiza el ultrasonido en un rodamiento son:

- **Superficie exterior del anillo interior:** Se puede realizar el ultrasonido en la superficie exterior del anillo interior para detectar posibles grietas o fisuras.
- **Superficie interior del anillo exterior:** Se puede realizar el ultrasonido en la superficie interior del anillo exterior para detectar posibles grietas o fisuras.
- **Superficie del elemento rodante:** Se puede realizar el ultrasonido en la superficie del elemento rodante (bola, rodillo, aguja) para detectar posibles desgastes, deformaciones o irregularidades.
- **Jaula o retén:** Se puede realizar el ultrasonido en la jaula o el retén del rodamiento para detectar posibles deformaciones o fisuras.
- **Espacio de lubricación:** Se puede realizar el ultrasonido en el espacio de lubricación del rodamiento para detectar posibles obstrucciones o contaminación.

5.2.9.1.2 Velocidad para inspeccionar rodamientos por ultrasonido

La velocidad a la que se realiza el ultrasonido en los rodamientos puede variar según las especificaciones del equipo utilizado y las características del rodamiento. En general, la velocidad de escaneo recomendada para el ultrasonido de rodamientos es de alrededor de 100 mm/s a 150 mm/s.

5.2.9.2 Procedimiento para realizar ultrasonido a ejes

El procedimiento para realizar un ultrasonido a ejes es similar al de los rodamientos, y puede seguir los siguientes pasos:

- **Preparación:** Al igual que con los rodamientos, es importante limpiar el eje antes de la prueba y asegurarse de que no tenga ninguna obstrucción o contaminación.
- **Selección del equipo:** Se debe seleccionar el equipo de ultrasonido adecuado para la prueba, con un rango de frecuencia suficientemente alto para detectar señales de alta frecuencia en el eje.

- **Colocación del transductor:** Se debe colocar el transductor del equipo de ultrasonido en la superficie del eje, asegurándose de que esté en contacto directo y de que no haya aire entre el transductor y la superficie del eje.
- **Configuración del equipo:** Se deben configurar los parámetros del equipo de ultrasonido adecuadamente. Se recomienda establecer un nivel de ganancia y una escala de tiempo que permitan detectar la señal del eje.
- **Realización de la prueba:** Una vez que el equipo esté configurado adecuadamente, se debe realizar la prueba. Se recomienda realizar varias mediciones en diferentes puntos del eje para asegurarse de que se detecten todas las señales.
- **Interpretación de los resultados:** Al igual que con los rodamientos, una vez que se ha completado la prueba, se deben interpretar los resultados. Las señales detectadas se pueden comparar con las señales de referencia para determinar el estado del eje. Los resultados también se pueden analizar utilizando técnicas de análisis de espectro para determinar las frecuencias específicas que indican problemas en el eje.
- **Mantenimiento:** Si se detecta algún problema en el eje, se deben tomar medidas para repararlo o reemplazarlo. También es importante realizar pruebas de ultrasonido periódicas en los ejes para detectar cualquier problema en una etapa temprana y evitar fallas prematuras.

5.2.9.2.1 Puntos para inspeccionar en un eje

El ultrasonido se puede realizar en diferentes puntos del eje para detectar posibles problemas. Algunos de los puntos comunes donde se realiza el ultrasonido en un eje son:

- **Superficie del eje:** Se puede realizar el ultrasonido en la superficie del eje para detectar posibles grietas, fisuras, desgastes o deformaciones.
- **Zonas críticas del eje:** Se puede realizar el ultrasonido en las zonas críticas del eje, como los puntos donde se aplican cargas, para detectar posibles deformaciones o irregularidades.

- **Área de transición:** Se puede realizar el ultrasonido en el área de transición entre diferentes diámetros del eje para detectar posibles cambios de espesor o deformaciones.
- **Interfaz eje-rodamiento:** Se puede realizar el ultrasonido en la interfaz entre el eje y el rodamiento para detectar posibles problemas en la superficie del eje o en la superficie del rodamiento.
- **Zona de soldadura:** Si el eje tiene alguna zona soldada, se puede realizar el ultrasonido en esta área para detectar posibles defectos en la soldadura.

5.2.9.2.2 Velocidad para inspeccionar ejes por ultrasonido

La velocidad a la que se realiza el ultrasonido en los ejes puede variar según las especificaciones del equipo utilizado y las características del eje. En general, la velocidad de escaneo recomendada para el ultrasonido de ejes es de alrededor de 50 mm/s a 150 mm/s.

5.2.10 Equipos de inspección

Los siguientes equipos tipo pulso-eco pueden ser usados: GE USM GO tipo o equivalentes.

El equipamiento ultrasónico deberá cumplir los requerimientos del PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE ULTRASONIDOS. (MINEROS S.A). El equipo de ultrasonidos deberá ser del tipo que contenga controles incrementales para reproducir ganancias y atenuaciones.

Todo palpador será recalibrado cuando surjan dudas respecto a su buen funcionamiento.

Los datos de cada palpador serán transcritos en el "Certificado de Calibración" y se colocará sobre el palpador una "Tarjeta de Calibración".

Se calibrarán trimestralmente los palpadores:

- Normales monocristales.
- Normales bi-cristales.

- Angulares monocristales de ondas transversales.
-

Los palpadores serán controlados con equipos de ultrasonidos marca GE USM GO.

Se usarán los siguientes bloques de calibración:

- DIN 54120: Bloque V1.
- DIN 54122: Bloque V2.

5.2.10.1 Palpadores para Ejes

El palpador o transductor que se debe utilizar para la inspección por ultrasonido de ejes depende de varios factores, incluyendo el tamaño, la forma y el material del eje, así como del tipo de defectos que se estén buscando.

En general, se utilizan dos tipos de palpadores para la inspección por ultrasonido de ejes: los palpadores de haz recto y los palpadores de haz angular.

Los palpadores de haz recto se utilizan para la detección de defectos superficiales y para inspeccionar ejes con diámetros pequeños. Estos palpadores producen un haz de ultrasonido que se propaga en línea recta a través del material, lo que los hace efectivos para la detección de defectos en la superficie del eje.

Los palpadores de haz angular se utilizan para la detección de defectos internos y para inspeccionar ejes con diámetros más grandes. Estos palpadores producen un haz de ultrasonido que se enfoca en un ángulo determinado, lo que les permite penetrar en el material del eje y detectar defectos en su interior.

Además, es importante considerar la frecuencia del palpador a utilizar, que depende del grosor y la densidad del material del eje, así como del tamaño de los defectos que se buscan detectar.

En general, se utilizan palpadores de alta frecuencia (por ejemplo, 2,5 MHz a 10 MHz) para la detección de defectos superficiales, mientras que se utilizan palpadores de baja frecuencia (por ejemplo, 0,5 MHz a 2,5 MHz) para la detección de defectos internos en ejes más grandes.

5.2.10.2 Palpadores para Rodamientos

El palpador o transductor que se debe utilizar para la inspección por ultrasonido de rodamientos depende del tamaño y la forma del rodamiento, así como del tipo de defectos que se estén buscando.

En general, se utilizan dos tipos de palpadores para la inspección por ultrasonido de rodamientos: los palpadores de contacto y los palpadores de aire.

Los palpadores de contacto se utilizan para la detección de defectos superficiales y para inspeccionar rodamientos con diámetros pequeños. Estos palpadores tienen una punta que se coloca en contacto directo con el rodamiento y producen un haz de ultrasonido que se propaga a través del material, lo que los hace efectivos para la detección de defectos en la superficie del rodamiento.

Los palpadores de aire se utilizan para la detección de defectos internos y para inspeccionar rodamientos con diámetros más grandes. Estos palpadores producen un haz de ultrasonido que se enfoca en un punto determinado, lo que les permite penetrar en el material del rodamiento y detectar defectos en su interior.

Además, es importante considerar la frecuencia del palpador a utilizar, que depende del tamaño del rodamiento y del tipo de defectos que se buscan detectar. En general, se utilizan palpadores de alta frecuencia (por ejemplo, 2,5 MHz a 10 MHz) para la detección de defectos superficiales, mientras que se utilizan palpadores de baja frecuencia (por ejemplo, 0,5 MHz a 2,5 MHz) para la detección de defectos internos en rodamientos más grandes.

5.2.11 Criterios de aceptación

Discontinuidades interpretadas como grietas, fisuras, cavidades o inclusiones son inaceptables cualquiera sea su longitud o tamaño.

5.2.12 Limpieza

Use un trapo limpio y seco para limpiar cualquier residuo que quede en la superficie después de retirar el exceso de acoplante. Si es necesario, puede usar un poco de alcohol, acetona o agua para ayudar a eliminar cualquier residuo restante.

5.2.13 Informe

El informe deberá incluir la siguiente información:

- Identificación del equipo utilizado para el examen, incluyendo el modelo y número de serie del equipo.
- Información de identificación del objeto o material examinado, incluyendo el número de serie, la ubicación del objeto, y cualquier información relevante para el examen.
- La técnica de examen utilizada, incluyendo la frecuencia de la sonda, el modo de operación y cualquier otra información relevante sobre la técnica.
- La calibración del equipo, incluyendo la fecha y los resultados de la calibración.
- La configuración del equipo, incluyendo la ganancia, la atenuación, el enfoque y cualquier otra configuración relevante.
- Los resultados del examen, incluyendo las dimensiones y la ubicación de cualquier defecto detectado, así como cualquier otra información relevante sobre los resultados del examen.
- Cualquier acción correctiva recomendada basada en los resultados del examen.
- La firma del inspector y la fecha del examen.
- Es importante que el informe sea completo, claro y fácil de entender, para que cualquier persona que lo lea pueda comprender los resultados del examen y las recomendaciones de acción correctiva.

6. Estudio caso crítico

Teniendo en cuenta los equipos definidos para realizar ultrasonido, los ejes son equipos críticos a los cuales se les debe hacer seguimiento con los diferentes ensayos no destructivos, se tiene que el eje del tambor inferior de la draga 10 ha sufrido fracturas, en el análisis a continuación se busca determinar el punto o puntos críticos para así determinar cuáles serían los puntos adecuados para hacer el ultrasonido para así tratar de detectar el defecto y tomar acciones antes de que falle y esto lleve a un paro no programado de la draga, esto se hace debido a que generalmente los ejes no se reparan, lo que se hace es cambiarle la camisa que se le pone al eje para que sea esta la que se desgaste y no el eje o cuando ya existe un desgaste previo en el eje, a continuación se muestra lo que se presentó en el mes de octubre se partió el eje, lo que ocasionó que se saliera la línea .

Figura 13

Línea de cucharas descarrilada por falla en tambor inferior draga 10

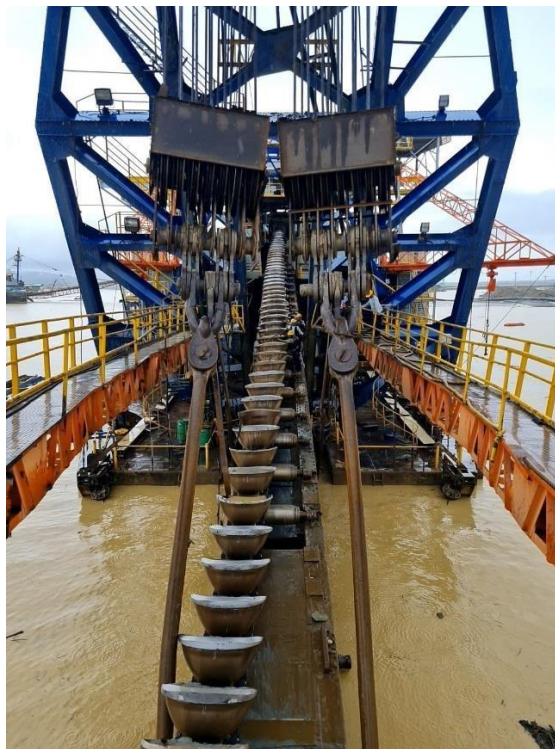


Figura 14

Evidencia de eje partido



6.1 Cálculos

Consideraciones

- Se tomaron datos previamente calculados de “INFORME DEL LABORATORIO DE TRIBOLOGÍA Y SUPERFICIES MINEROS EJE TAMBOR INFERIOR 22-11-2010”.
 - $W=4391\text{KN/m}$.
 - $M=832\text{ kN}\cdot\text{m}$
- Eje simétrico por lo tanto los cálculos de “A” son los mismos para “C”
- Se tomo $K=2$ debido a que es el k mayor entre el análisis de los dos redondeos.

Figura 15

Redondeos en cambio de sección A-B y B-C

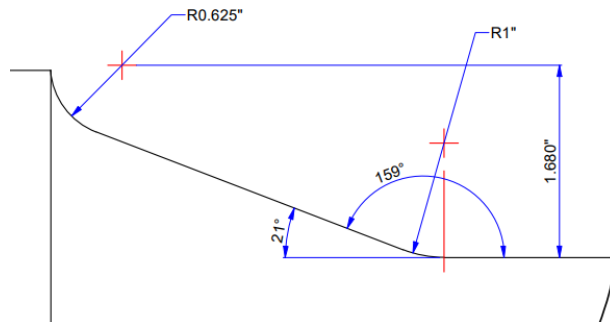


Figura 16

Plano eje tambor inferior D10. Tomada de Mineros

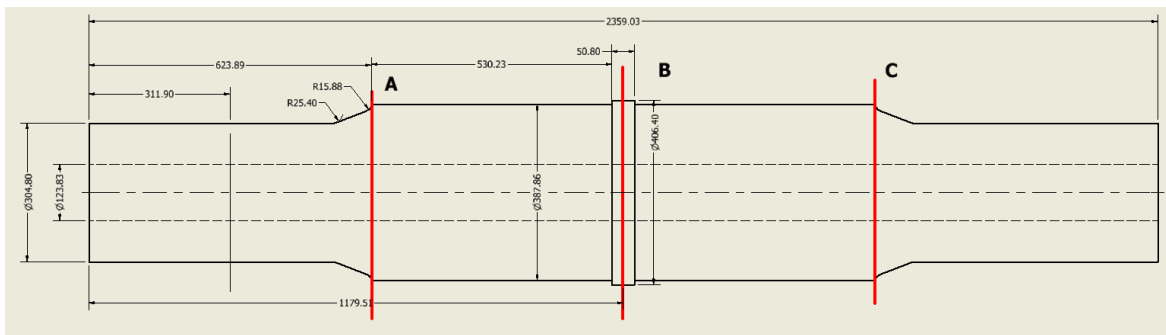


Figura 17

Diagramas carga, cortante y momento

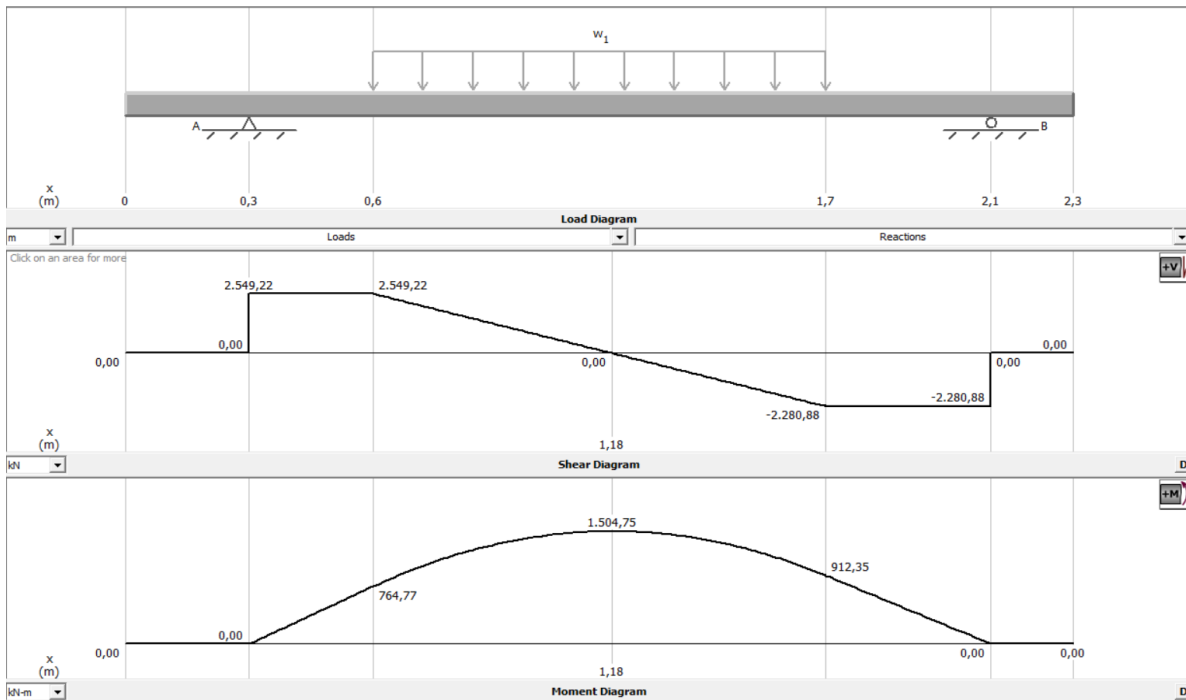
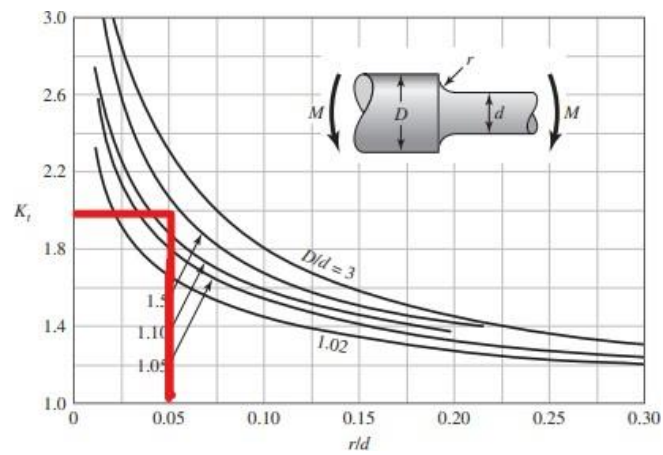


Figura 18

Gráficas de factores teóricos de concentración del esfuerzo K_t para $r = 15.88$ mm



Análisis

Tabla 1 Valores para cálculo de esfuerzos.

A & C	B
$v = 2549,22 \text{ kN}$	$v = 0 \text{ kN}$
$M = 764,77 \text{ kN} * m$	$M = 1504,75 \text{ kN} * m$
$T = 832 \text{ kN} * m$	$T = 832 \text{ kN} * m$
$I_A = 0,000412141 \text{ m}^4$	$I_B = 0,0013275 \text{ m}^4$
$J_A = 0,0008242827 \text{ m}^4$	$J_B = 0,002655 \text{ m}^4$
$A_A = 0.0609285192 \text{ m}^2$	$A_B = 0.1176797568 \text{ m}^2$

Tabla 2 Esfuerzos para los puntos A y B

Formula	A & C	B
$r = \frac{Tr}{J} + \frac{v}{A}$	$r = \frac{832 * 10^3 * 0,1524}{0,0008242827} + \frac{2549,22 * 10^3}{0.0609285192}$ $r = 195'666.356,40$	$r = \frac{832 * 10^3 * 0,2034}{0,002655} + \frac{0}{0.1176797568}$ $r = 63'739.661$
$\sigma = \frac{Mr}{I}$	$\sigma = 2 * \frac{764,77 * 10^3 * 0,1524}{0,000412141}$ $\sigma = 565.587.738,18 \text{ Pa}$	$\sigma = \frac{1504,75 * 10^3 * 0,2034}{0,0013275}$ $\sigma = 230.558.305,08 \text{ Pa}$
Esfuerzos principales	$\sigma_1 = 626,680 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = -61,092 \text{ MPa}$	$\sigma_1 = 247,006 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = -16,448 \text{ MPa}$
Teoría de falla $= \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$	$\sigma_{wA} = \sqrt{626,680^2 - (626,680 * (-61,092)) + 61,092^2}$ $\sigma_{wA} = 659 \text{ MPa}$	$\sigma_{wB} = \sqrt{247,006^2 - (247,006 * (-16,448)) + 16,448^2}$ $\sigma_{wB} = 255 \text{ MPa}$

Figura 19

Datos acero 4340. Tomada de [38]

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción		Límite de Fluencia		Alarga/ en 2" (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)	Relación de maquinabilidad EF =100%
	MPa	PSI	MPa	PSI				
Caliente y maquinado	1227	178000	689	100000	10	30	383	50
Templado y revenido	1200	174000	1124	163000	16	48	352	

6.2 Análisis por elementos finitos

El análisis por elementos finitos utiliza algoritmos matemáticos y computacionales para dividir una estructura o sistema en pequeñas partes o elementos finitos y luego analizar la respuesta de cada elemento individualmente, lo que permite una comprensión detallada del comportamiento global del sistema, además se utiliza el análisis por elementos finitos para evaluar el comportamiento de una estructura o pieza bajo diferentes condiciones de carga y determinar si es seguro y eficiente.

Teniendo en cuenta los esfuerzos hallados en los cálculos anteriores, con los cuales se buscaba determinar cuáles eran los puntos críticos del eje para así establecer en donde sería ideal hacer el análisis por ultrasonido, se tiene que los punto A y C son los puntos críticos del eje, los cuales se corroboraron mediante la simulación por elementos finitos.

Figura 20

Mallado del eje.

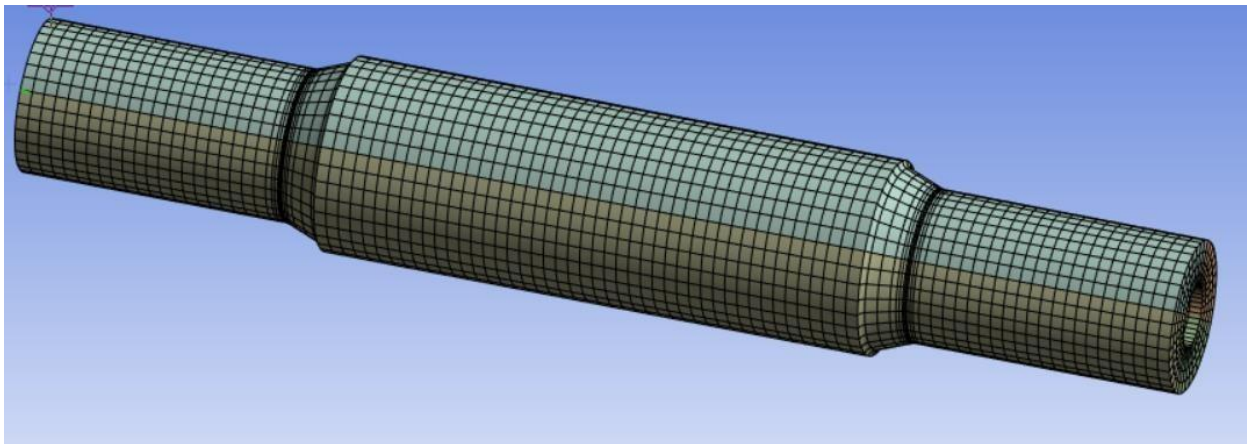
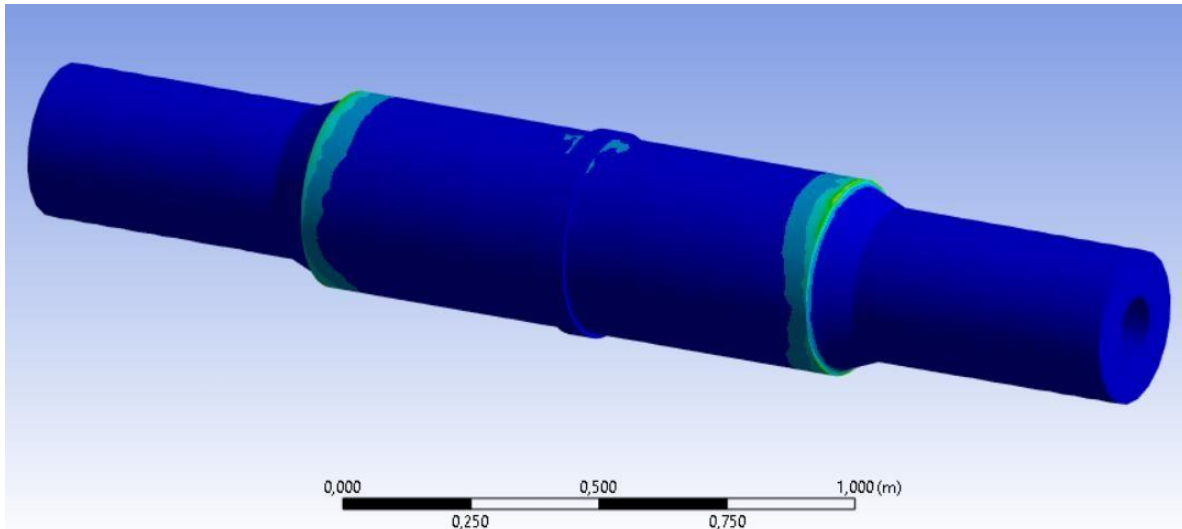


Figura 21

Resultado de la simulación del eje en ANSYS.



6.3 Informe

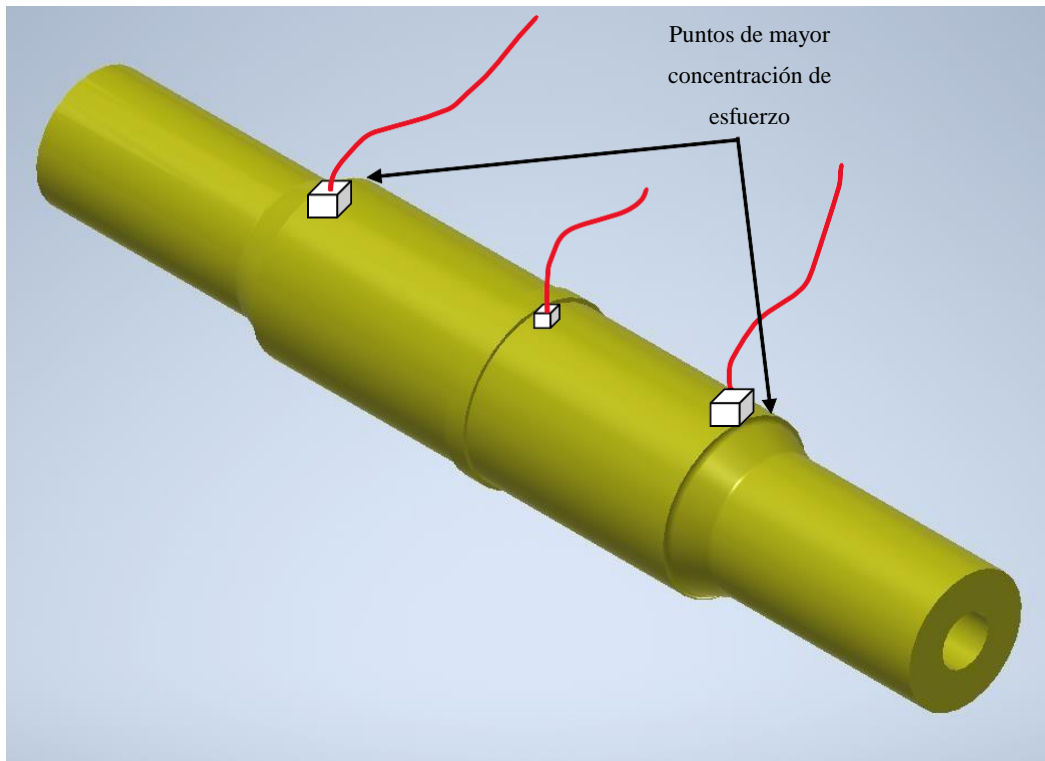
Teniendo en cuenta el análisis hecho con la herramienta ANSYS se confirmó que los puntos críticos eran A y C como muestra la figura 21, pero se tiene que la fractura presentada anteriormente no se dio en el punto crítico, por lo que se piensa que existía algún defecto previo.

Siguiendo la huella de fractura y guiándonos con la literatura podemos inferir que hubo un defecto y/o falla por flexión, esto se pudo presentar por sobrecarga, bloqueo de la máquina, alta dureza, también porque internamente existía una grieta y como este eje está sometido a grandes cargas condujo a la fractura.

Los puntos para analizar en el eje se muestran en la figura 22, se debe realizar la medición con palpadores angulares en los puntos A y C debido a la geometría de estos puntos, también que los diámetros del eje son de tamaño grande, además cabe recordar que otra ventaja es que los palpadores angulares me permiten visualizar los defectos internos que es nuestro principal propósito de hacer ensayos no destructivos (END) en los ejes, también usar baja frecuencia.

Figura 22

Puntos para hacer medición en los ejes



7. Conclusiones

- Los esfuerzos calculados por Von Mises me muestran un valor calculado de $\sigma_{WA} = 659 \text{ MPa}$ mientras que la literatura muestra que el acero 4340 tiene un límite de fluencia de 689 MPa (Figura 19), cabe sugerir que se considere otro tipo de material que tenga más resistencia.
- Se cumple el alcance del trabajo que es determinar los puntos de un equipo, en este caso, un eje crítico de la operación, para demás equipos se sugiere realizar cálculos para determinar puntos críticos.
- No se permiten ningún tipo defecto por la criticidad del equipo.
-

8. Referencias

- [1] Quiénes Somos. (s. f.). <https://mineros.com.co/es/Nosotros/Qui%C3%A9nes-Somos>
- [2]: Mantenimiento Predictivo. (s/f). Preditec.com. Recuperado el 23 de noviembre de 2022, de <http://www.preditec.com/mantenimiento-predictivo/>
- [3]: LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDO: UNA TÉCNICA EMPLEADA EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO Detection of ultrasound: a technique used in the predictive maintenance. (s/f). Redalyc.org. Recuperado el 23 de noviembre de 2022, de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84921327035.pdf>
- [4]: Testek, D. M. G. (2022, 21 enero). Detector de fallas Echo FD | de Danatronics. Grupo Testek. <https://www.testekndt.net/producto/detector-de-fallas-echo-fd/>
- [5]: Olympus, I. M. S. (2017, agosto 1). Detección de agrietamiento laminar en estructuras con fibra de vidrio por ultrasonido convencional. Olympus-ims.com. <https://www.olympus-ims.com/es/laminar-cracking-in-fiberglass-1/>
- [6] Aend. (2017). Ultrasonidos. Nivel II (Ensayos no destructivos no 4) (1.a ed.). FC EDITORIAL
- [7] The online Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics. (s. f.). <https://www.ndt.net/v03n12.htm>
- [8] Journal of Applied Physics | American Institute of Physics. (s. f.). <https://www.aip.org/content/journal-applied-physics>
- [9] Ultrasonic characterization of material properties using Lamb waves. Journal of Applied Physics.
- [10] Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, P. (2018). Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. Materials Today: Proceedings, 5(2), 3690-3698. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>
- [11] Instanes, G., Pedersen, A., Toppe, M., Nagy, P. B., Thompson, D. O., & Chimenti, D. E. (2009). CONSTANT GROUP VELOCITY ULTRASONIC GUIDED WAVE INSPECTION FOR CORROSION AND EROSION MONITORING IN PIPES. AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/1.3114119>

[12] Daniel, M., & Thompson, R. (s. f.). Ultrasonic evaluation of structural integrity. *Journal of Nondestructive Evaluation*.

[13] Wirdelius, H., & Persson, G. (2012). Simulation based validation of the detection capacity of an ultrasonic inspection procedure. *International Journal of Fatigue*, 41, 23-29. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.09.002>

[14] Gómez, J. C., & Palacios, A. (s. f.). Ultrasonic Nondestructive Evaluation for the assessment of the integrity of the wind turbine blades. *Renewable Energy*.

[15] Chung, K. S., & Singh, R. K. (s. f.). Ultrasonic testing for the condition-based maintenance of industrial equipment. *Journal of Materials Processing Technology*.

[16] Olympus Corporation. (s. f.). Olympus - Scientific Solutions. Olympus. Recuperado 10 de enero de 2023, de <https://www.olympus-ims.com/en/>

[17] Electronics & Sensing | GE Research. (s. f.). <https://www.ge.com/research/electronics-sensing>

[18] Zetec. (2021, 5 febrero). Top Nondestructive Testing (NDT) & Inspection Solutions Company. <https://www.zetec.com/>

[19] Non-Destructive Testing Services and Technologies | Eddyfi. (s. f.). <https://eddyfi.com/en>

[20] McGuinness, H. (2023, 5 enero). Cygnus | Ultrasonic Thickness Gauge Manufacturer & Suppliers. Cygnus Instruments. <https://cygnus-instruments.com/>

[21] Alquiler y Venta de Equipos – Insercor S.A.S. (s. f.). <https://www.insercor.com/alquiler-de-equipos/>

[22] SGS Société Générale de Surveillance SA. (s. f.). FORMACIÓN EN PRUEBAS POR ULTRASONIDOS. SGS. Recuperado 11 de enero de 2023, de <https://www.sgs.co/es-es/training-services/materials-testing-training/non-destructive-testing-ndt-training/ultrasonic-testing-training>

[23] ULTRASONIDO – Ingyend. (s. f.). <http://ingyend.com.co/ensayos/ultrasonido/>

[24] Types of dredgers working in the dredging industry. (2017, 5 enero). *Dredging Today*. <https://www.dredgingtoday.com/>

[25] Olympus. (1a. C.). Ultrasonics basics. <https://www.olympus-ims.com/en/learn/>

[26] Samanez, K. D. M. (2021, 29 noviembre). PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE ULTRASONIDO EN LÁMINAS DE UN BUQUE. Marine and Naval Engineering. <https://marineandnavalengineering.com/articulos/procedimiento-ensayo-ultrasonido-laminas-buque/>

[27] Rimoldi, C., & Mundo, L. (s. f.). ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR MÉTODO DE ULTRASONIDO [Diapositivas; Pdf]. Apuntes de clase. <https://aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido%202012.pdf>

[28] Castillo, S. A., & Inostroza, M. J. (2013). ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS MEDIANTE ULTRASONIDO EN EQUIPOS TERMICOS. Universidad del Bío-Bío.

[29] Romero, B. J., & Proboste, F. H. (2013). Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura. Recuperado 30 de enero de 2023, de <https://docplayer.es/38784115-Aplicacion-del-ultrasonido-al-control-de-calidad-de-procesos-de-soldadura.html>

[30] Equipo de ultrasonido industrial UT detectores de fallas. (s. f.). Zion. <https://zion-ndt.mx/equipo-ultrasonido-industrial-ut/>

[31] Tapia, G. (s. f.). Inspeccion de ejes - UT - SIIENERGIA. Scribd. <https://es.scribd.com/document/449191758/Inspeccion-de-ejes-UT-SIIENERGIA>

[32] Compass. (s/f). Astm.org. Recuperado el 10 de marzo de 2023, de https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CA0609_A0609M-12R18%7Cen-US

[33] (S/f). Edu.co. Recuperado el 10 de marzo de 2023, de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1633/digital_21062.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[34] (S/f-b). Olympus-ims.com. Recuperado el 10 de marzo de 2023, de <https://www.olympus-ims.com/es/pv-100/>

[35] 2112dogu. (2022, mayo 29). Astm E127 20 fabrication and control of flat bottomed hole ultrasonic standard reference blocks apiasme practice test – 1 file download. 1filedownload.com. <https://1filedownload.com/astm-e127-20-fabrication-and-control-of-flat-bottomed-hole-ultrasonic-standard-reference-blocks-apiasme-practice-test/>

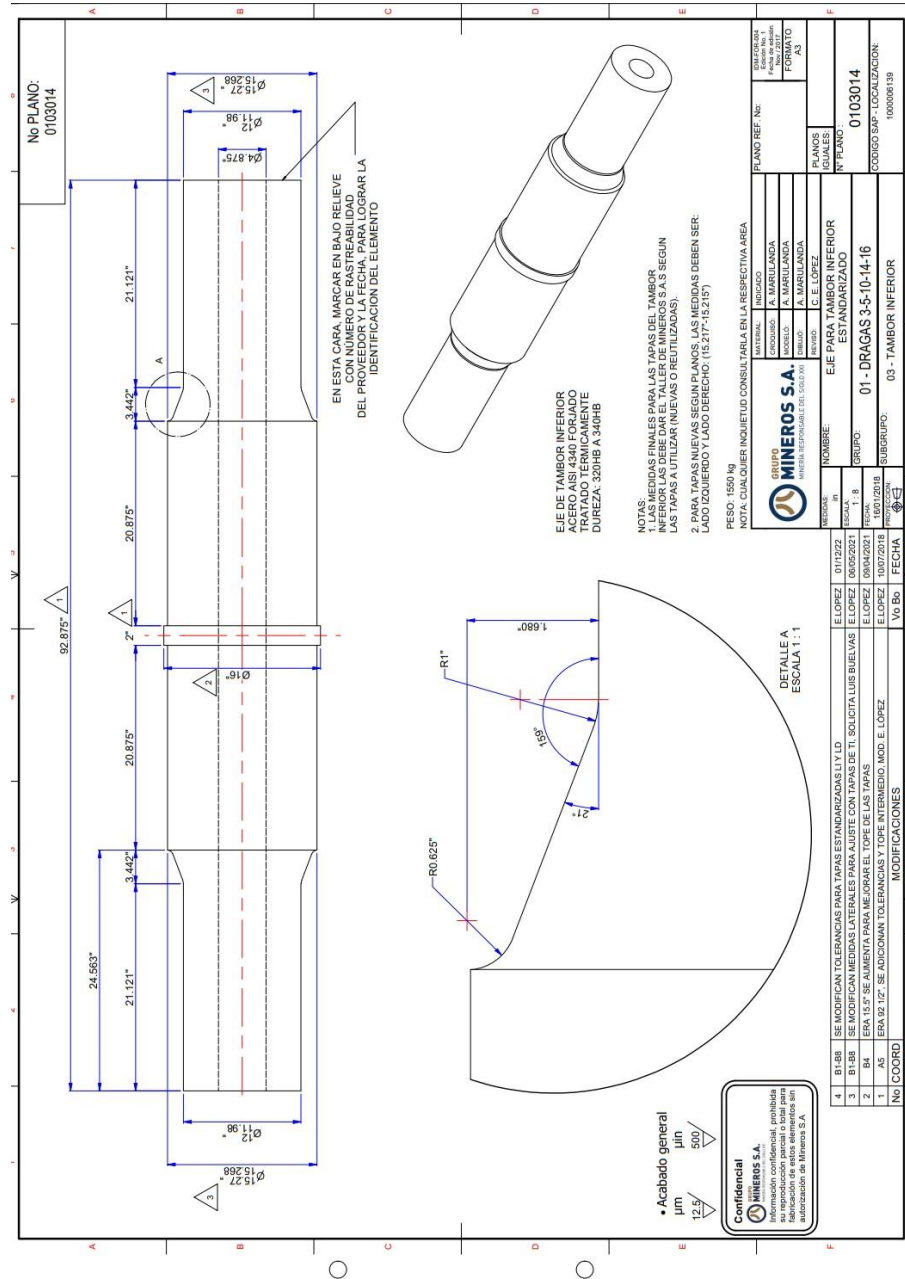
[36] [ai/catalog/standards/sist/, H. I. \(s/f\). iTeh STANDARD PREVIEW \(standards.iteh.ai\). Iteh.ai. Recuperado el 10 de marzo de 2023, de https://cdn.standards.iteh.ai/samples/57785/039d4c1ef12141c5b52c8a5379a19eba/ISO-16827-2012.pdf](https://cdn.standards.iteh.ai/samples/57785/039d4c1ef12141c5b52c8a5379a19eba/ISO-16827-2012.pdf)

[37] Carolina, J., & Sarmiento, S. (n.d.). ESTUDIO DEL ENSAYO NO DESTRUCTIVO ULTRASÓNICO APLICADO A LÍNEAS DE TUBERÍA SUBMARINAS EN MANTENIMIENTO. Edu.Co. Retrieved April 13, 2023, from <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/6392/SanchezSarmientoJulieCarolina2012.pdf?sequence=1>.

[38] Acero 4340. (2021, octubre 1). Ferrocortes. <https://www.ferrocortes.com.co/acero-4340/>

9. Anexos

9.1 Plano eje tambor inferior nuevo diseño



9.2 Informe universidad nacional

9.3 Procedimiento para dar de baja los ejes de los tambores inferiores