

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE LOS COMPONENTES
DE LA CELDA DE FLOTACIÓN MODELO WEMCO
SMARTCELL MEDIANTE ENSAYOS DE
ULTRASONIDO**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA
PROFESIONAL**

Presentado por:

Bach. Joseelina Reynalda Sosa Zavala

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GRDHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE LOS COMPONENTES
DE LA CELDA DE FLOTACIÓN MODELO WEMCO
SMARTCELL MEDIANTE ENSAYOS DE
ULTRASONIDO**

Tesis sustentado y aprobado el día 17 de septiembre del dos mil veinticuatro por el/la bachiller Joseelina Reynalda Sosa Zavala, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE:


.....
Dr. Freddy Felipe Cori Nina

SECRETARIO:


.....
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

VOCAL:


.....
Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

ACCESITARIO:


.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez



CERTIFICADO DE SIMILITUD

YO, MATIAS CARLOS VIVAR COLQUICOCHA, en mi condición de asesor, según resolución de Facultad N° 9955-2024 FAIN/UNJBG, del trabajo de suficiencia profesional titulado **EVALUACION DEL DESGASTE DE LOS COMPONENTES DE LA CELDA DE FLOTACION MODELO WEMCO SMARTCELL MEDIANTE ENSAYOS DE ULTRASONIDO** presentado por la bachiller **Sosa Zavala Joseelina Reynalda**, para optar el título de Ingeniero Metalurgista, habiendo cumplido con el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido que es de 14 por ciento. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención del título profesional según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente documento para que continúe con los trámites respectivos para su publicación.

Firma del asesor

Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

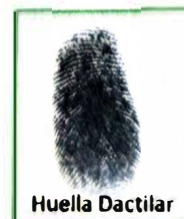
D.N.I. 08622167



Firma del Titulante

Joseelina Reynalda Sosa Zavala

D.N.I. 78377084



DEDICATORIA

A Dios, por ser mi fortaleza y guía para continuar en cada paso de este proceso.

A mi madre, por todo su amor, trabajo y sacrificio.

A mi padre por su esfuerzo y dedicación en formar nuestro carácter y fortalecer nuestros valores.

A las personas que me han brindado su apoyo, y a mis profesores que han sido una pieza clave en mi formación académica y personal.

AGRADECIMIENTO

Quiero manifestar mi más sincero agradecimiento a Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza en este trayecto.

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo y sacrificios, que han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

A mi querida alma mater, la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, y en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, por brindarme las herramientas y el conocimiento necesarios para crecer profesionalmente. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCION	1
CAPÍTULO I.....	4
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	4
1.2. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION.....	6
1.3. OBJETIVOS	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivos Específicos.....	8
CAPÍTULO II	9
2.1. ANTECEDENTES.....	9
2.2. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	11
2.2.1. Principios de la Flotación.....	11
2.2.3. Equipos de Flotación:.....	14

2.2.4.	MECANISMOS DE DESGASTE EN CELDAS DE FLOTACIÓN	34
2.2.5.	PRINCIPIOS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	41
2.2.6.	PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA (TÉRMINOS)	45
2.2.7.	TIPOS DE ONDAS	48
2.2.8.	ONDAS SONORAS	52
2.2.9.	GENERACIÓN DE ULTRASONIDO	61
	CARACTERÍSTICAS DEL CABEZAL	64
	TIPOS DE CABEZALES	70
	Metodología de Resonancia	81
	CAPÍTULO III.....	83
	FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS	83
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	83
3.2.	ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	86
	Alabe del Rotor	87
	Draft tube (Tubo de aspiración).....	87
	Split Collar (cuello dividido en el tubo).....	87
	Piso Falso	87

Pared de celda	88
Bevel Bottom (fondo biselado o pared inclinada).....	88
3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS:	89
3.3.1. Análisis del revestimiento del Alabe rotor.....	89
3.3.2. Análisis del revestimiento del Split Collar	90
3.3.3. Análisis del revestimiento del Draft tube.....	91
3.3.4. Análisis del revestimiento del Piso falso	92
3.3.5. Análisis del revestimiento de la Pared -celda	93
3.3.6. Análisis del revestimiento del Bevel Bottom.....	94
3.3.7. Análisis Estadístico con SPSS	96
CONCLUSIONES	99
RECOMENDACIONES	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Métodos de ENSAYOS No Destructivos	42
Tabla 2 Métodos de Ensayos No Destructivas.....	43
Tabla 3 Resumen del desgaste en el revestimiento de la celda de Flotación FTR001- WEMCO SMART CELL.....	88
Tabla 4 Alabe del Rotor	96
Tabla 5 Split Collar	96
Tabla 6 Draft Tube	97
Tabla 7 Piso Falso	97
Tabla 8 Pared de la celda	97
Tabla 9 Bevel Bottom	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Partículas de la flotación.	13
Figura 2 Corte transversal de una celda de flotación.....	14
Figura 3 Celda mecánica cilíndrica.....	17
Figura 4 Celda mecánica con tanque rectangular	18
Figura 5 Esquema celda tipo aire forzado.....	20
Figura 6 Esquema Celda Tipo Auto Aspirante	20
Figura 7 Columna con inyección de aire interna.	25
Figura 8 Columna con inyección de aire externa.....	25
Figura 9 Columna de geometría rectangular e inyección de aire mediante lanzas	27
Figura 10 Columna de geometría cilíndrica con divisores internos e inyección de aire mediante lanzas	28
Figura 11 Columna de geometría cilíndrica sin divisores internos y con sistema de inyección de aire externo.	28
Figura 12 Esquema de una celda neumática o celda de contacto.	32
Figura 13 Desgaste por abrasión.....	35
Figura 14 Desgaste por adhesión	36
Figura 15 Desgaste por fatiga	37
Figura 16 Desgaste por oxidación.....	38

Figura 17 Esquema del desgaste por erosión.....	39
Figura 18 Ilustración del desgaste químico entre dos superficies en deslizamiento, (a) inicio del desgaste y (b) desgaste avanzado de las superficies.....	40
Figura 19 Desgaste por cavitación.....	41
Figura 20 Onda senoidal.....	47
Figura 21 Frente de onda.....	47
Figura 22 Movimiento de un resorte.....	48
Figura 23 Propagación del sonido.....	48
Figura 24 Movimiento de una soga.....	49
Figura 25 Perturbación en superficie de líquidos.....	49
Figura 26 Ondas Superficiales.....	50
Figura 27 Ondas de Lamb Asimétrica.....	52
Figura 28 Ondas de Lamb Simétrica.....	52
Figura 29 Espectro acústico.....	55
Figura 30 Reflexión de una onda.....	57
Figura 31 Refracción de una onda.....	58
Figura 32 Efecto de difracción.....	59
Figura 33 Efecto de Interferencia.....	60
Figura 34 Efecto de Interferencia en Ondas de Sonido.....	60
Figura 35 Esquema de Generación por Método Magnetostrictivo.....	62
Figura 36 Esquema de elementos piezoeléctricos.....	63

Figura 37 Esquema de cabezal ultrasónico.....	64
Figura 38 Esquema de láminas de protección del cabezal.....	65
Figura 39 Esquema cualitativo de intensidades de sonido emanadas por un cabezal piezoeléctrico	68
Figura 40 Esquema cualitativo de intensidades de sonido emanadas por un cabezal piezoeléctrico	69
Figura 41 Cabezal de contacto	70
Figura 42 Elementos separadores.	71
Figura 43 Tipos de cabezales	72
Figura 44 Distintos tipos de cabezales de contacto.....	72
Figura 45 Cabezales de doble cristal.....	73
Figura 46 Configuraciones de cabezales angulares	74
Figura 47 Configuraciones de micro cabezales	75
Figura 48 Configuraciones de cabezales de rodillo	76
Figura 49 Configuraciones de cabezales del tipo lápiz.....	76
Figura 50 Configuraciones de cabezales del tipo brocha.....	77
Figura 51 Tipos de cabezales de inmersión	78
Figura 52 Máquina de ensayo de inmersión	78
Figura 53 Arreglos para la colocación de los transductores	80
Figura 54 Determinación de la Velocidad del Pulso por el Método Indirecto	80
Figura 55 Frecuencia fundamental y armónicos en ensayo por resonancia.....	82

Figura 56 Proyección por espesor “Alabe del Rotor” FTR001	89
Figura 57 Proyección por espesor “Split Collar” FTR001	90
Figura 58 Proyección por espesor “Draft Tube” FTR001	91
Figura 59 Proyección por espesor “Piso Falso” FTR001	92
Figura 60 Proyección por espesor “Pared de la celda” FTR001	93
Figura 61 Proyección por espesor “Bevel Bottom” FTR001.....	94
Figura 62 Perfil del desgaste de los recubrimientos de la celda WEMCO SMART CELL.....	95
Figura 63 Proyección % porcentual del desgaste de la celda FTR001	95

RESUMEN

El trabajo se centra en la aplicación de ensayos de ultrasonido como una técnica no destructiva para evaluar el estado de los componentes. Estos ensayos permiten detectar y medir el desgaste sin necesidad de desensamblar las celdas, proporcionando una forma eficiente y precisa de monitorear su condición. El estudio incluye una revisión detallada de la teoría detrás de los ensayos de ultrasonido, así como una descripción de la metodología utilizada para llevar a cabo las pruebas en los componentes de las celdas. El seguimiento del desgaste de los componentes de la celda de flotación FTR001 modelo WEMCO Smart Cell, se realizan con mediciones periódicas programadas utilizando el equipo de ultrasonido EPOCH650 Olympus durante 6 meses, esta información ha permitido crear una base de datos para proyectar el desgaste de los espesores, el porcentaje de desgaste de los componentes y la fecha estimada del cambio de los revestimientos de la celda. La base de datos permite realizar análisis estadístico de dos variables cuantitativas, el peso del mineral y el espesor, aplicando el análisis estadístico de correlación de Pearson se obtienen el nivel de significancia que son menor o igual al 0.01, nivel de confianza del 99.99%, con un nivel de grado de correlación inversa perfecta, es decir que, si el peso del mineral acumulado al aumentar, el espesor disminuye por el desgaste de abrasión que este produce sobre la superficie del revestimiento de los componentes.

Palabras clave: Ultrasonido, proceso de flotación, pruebas no destructivas, correlación, proyección del desgaste, Eposch650.

ABSTRACT

The work focuses on the application of ultrasound testing as a non-destructive technique to evaluate the condition of components. These tests allow wear to be detected and measured without the need to disassemble the cells, providing an efficient and accurate way to monitor their condition. The study includes a detailed review of the theory behind ultrasound testing, as well as a description of the methodology used to conduct testing on cell components. The monitoring of the wear of the components of the FTR001 flotation cell model WEMCO Smart Cell is carried out with scheduled periodic measurements using the EPOCH650 Olympus ultrasound equipment for 6 months. This information has allowed the creation of a database to project the wear of the components. thicknesses, the percentage of wear of the components and the estimated date of change of the cell linings. The database allows statistical analysis of two quantitative variables, the weight of the mineral and the thickness, applying the statistical analysis of Pearson's correlation to obtain the level of significance that is less than or equal to 0.01, confidence level of 99.99%. with a degree level of perfect inverse correlation, that is, if the weight of the accumulated mineral increases, the thickness decreases due to the abrasion wear that it produces on the surface of the coating of the components.

Keywords: Ultrasound, flotation process, non-destructive testing, correlation, wear projection, Eposch650.

INTRODUCCIÓN

El desgaste de los componentes y sus revestimientos en las celdas de flotación modelo Wemco Smart Cell, es un problema crítico que afecta la eficiencia y los costos operativos en la industria minera. Los revestimientos desempeñan un papel crucial al proteger las paredes internas de las celdas del impacto abrasivo de las partículas sólidas en la pulpa durante el proceso de flotación. El presente trabajo aborda la evaluación del desgaste de los componentes de la celda mediante el uso de ensayos de ultrasonido como técnica de inspección no destructiva, ya que permite obtener mediciones precisas del espesor restante de los revestimientos para ser analizados y determinar el porcentaje de desgaste que presenta cada componente de la celda de flotación.

La investigación se ha llevado a cabo mediante una combinación de trabajo experimental y análisis teórico. Se realizó ensayos de ultrasonidos de una celda de flotación de modelo Wemco desde su espesor nominal del revestimiento del componente hasta su espesor restante que permite observar su límite de cambio de la celda, utilizando equipos especializados y siguiendo protocolos establecidos por organismos como la Sociedad Americana de Ensayos No Destructivos (ASNT, 2021).

Los datos que se utilizaron son de la celda de flotación FTR001, con ellos se proyecta el desgaste del revestimiento de los componentes de la celda hasta llegar a un límite máximo de alerta para el cambio del revestimiento de la celda. Luego se formula una hipótesis involucrando el peso acumulado del tonelaje del mineral y los espesores restantes de los revestimientos de los componentes de la celda de flotación FTR001, realizando una correlación entre sí.

La duración de la inspección de la celda de flotación WEMCO SMART CELL fue diaria durante 6 meses, para observar los revestimientos de los componentes y su desgaste en diferentes tiempos que se presenta el desgaste de los revestimientos en los componentes, agregando el porcentaje del desgaste presentado en dichos tiempos.

La correlación de las medidas de los espesores restantes de los componentes con el peso del mineral acumulado ingresante a la celda FTR001 modelo WEMCO es de 33,912 t/día (toneladas por día), en celdas con capacidad de 300 m³; se toma los datos de los espesores que se encuentran entre el límite conservador y el límite crítico de la celda de flotación FTR001 modelo WEMCO, estos permiten corroborar que el peso del mineral ingresante en la celda FTR001 influye en el desgaste de los revestimientos de sus componentes internos de la celda FTR001 modelo WEMCO.

Las gráficas mostradas en este proyecto son creación propia y explicaran lo que se busca demostrar para concluir con el proyecto.

Esta investigación busca contribuir al avance del conocimiento en el campo de la inspección no destructiva y al desarrollo de técnicas más eficientes para el monitoreo y mantenimiento de los equipos en la industria minera. Al optimizar la gestión del desgaste de los revestimientos, se podrán reducir los costos operativos, mejorar la eficiencia del proceso y minimizar el impacto ambiental asociado al reemplazo prematuro o tardío de los revestimientos.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

En la industria minera, las celdas de flotación son equipos cruciales para la concentración y separación de minerales valiosos. Sin embargo, estos equipos se encuentran expuestos a condiciones de operación extremas que conducen a un desgaste acelerado de sus componentes internos, como "impulsores, paletas y paredes internas de las celdas" (Zhao, Qiu, Yang, & Sun, 2019, p. 38). Según Sivamohan y Forsberg (1985) "el desgaste es un problema crítico en las plantas de procesamiento de minerales, ya que afecta de manera significativa la eficiencia y rentabilidad de las operaciones" (p. 145).

El desgaste excesivo de estos componentes puede resultar en una disminución de la eficiencia del proceso de flotación, pérdidas de recuperación de minerales, mayores costos de mantenimiento y, en última instancia, una reducción de la rentabilidad de la operación minera (Napier-Munn, Morrell, Morrison, & Kojovic, 1996).

Tradicionalmente, la evaluación del desgaste se ha realizado mediante inspecciones visuales y mediciones manuales, lo cual es una tarea tediosa, subjetiva y propensa a errores humanos (Hernandez-Aguilar, Dyakowski, Kraipech, & Nowakowski, 2017). Además, estas técnicas convencionales requieren el apagado y desensamblaje de las celdas de flotación, lo que conlleva tiempo y costos adicionales. Como señalan Wills y Napier-Munn (2006) "el mantenimiento y reemplazo de componentes desgastados en las celdas de flotación representa un costo significativo en las operaciones mineras" (p. 267).

En este contexto, los ensayos de ultrasonido emergen como una técnica prometedora para la evaluación no destructiva del desgaste en componentes de celdas de flotación. Según Zhao et al. (2019) "los ensayos de ultrasonido permiten detectar y caracterizar defectos internos y cambios en las propiedades de los materiales, lo que posibilita una evaluación precisa y confiable del desgaste sin necesidad de desmontar los componentes" (p. 39).

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La evaluación precisa y oportuna del desgaste en los componentes de las celdas de flotación es crucial para mantener la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras. En los últimos años, esta necesidad ha cobrado mayor relevancia debido a los desafíos económicos y ambientales que enfrenta la industria minera. Como señalan Aguiar et al. (2022) "el desgaste acelerado de los componentes de las celdas de flotación puede resultar en una disminución significativa de la eficiencia del proceso, pérdidas de recuperación de minerales y mayores costos de mantenimiento" (p. 107489).

En este contexto, los ensayos de ultrasonido emergen como una técnica prometedora para abordar esta problemática. Según Shi et al. (2023), "los ensayos de ultrasonido permiten una evaluación no destructiva y en tiempo real del desgaste de los componentes, lo que puede contribuir a optimizar los programas de mantenimiento predictivo y prolongar la vida útil de los componentes" (p. 107976).

La importancia de esta investigación radica en la necesidad de desarrollar y validar metodologías confiables y eficientes para la aplicación de ensayos de ultrasonido en celdas de flotación. Como afirman Kraipech et al. (2018) "la precisión y confiabilidad de las técnicas de ultrasonido son

cruciales para su implementación en entornos industriales y para la toma de decisiones informadas sobre el mantenimiento y reemplazo de componentes" (p. 125).

Además, esta investigación puede contribuir al desarrollo de modelos predictivos más avanzados para la estimación de la vida útil restante de los componentes. Shi et al. (2023) destacan que "la combinación de técnicas de aprendizaje automático con los datos obtenidos de los ensayos de ultrasonido puede mejorar la precisión de los modelos predictivos y brindar información más precisa para la planificación del reemplazo de componentes" (p. 107977).

La implementación exitosa de los ensayos de ultrasonido en celdas de flotación puede traer beneficios económicos y ambientales significativos. Hernandez-Aguilar et al. (2017) mencionan que "una evaluación precisa del desgaste permite planificar de manera efectiva el reemplazo de componentes y minimizar los tiempos de inactividad de las celdas, lo que a su vez reduce los costos operativos y mejora la rentabilidad de la operación minera" (p. 99).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Evaluar los espesores de los revestimientos de los componentes de las celdas de flotación, mediante ensayos de ultrasonido, con el fin de proporcionar información sobre el estado de desgaste de estos componentes para mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el límite crítico en los componentes de la celda de flotación en el periodo establecido.
- Establecer una correlación entre el peso del mineral acumulado y las medidas de espesores restantes de desgaste detectados por ultrasonido en las celdas de flotación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

El desgaste de los componentes de las celdas de flotación ha sido un desafío persistente en la industria minera debido a las condiciones abrasivas y corrosivas a las que se enfrentan estos equipos. Tradicionalmente, la evaluación del desgaste se ha realizado mediante inspecciones visuales y mediciones manuales, lo que conlleva a tiempos de inactividad y costos significativos. Según Wills y Napier-Munn (2006) "el mantenimiento y reemplazo de componentes desgastados en las celdas de flotación representa un costo significativo en las operaciones mineras" (p. 267).

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado diversas técnicas de monitoreo y evaluación del desgaste en los últimos años. Por ejemplo, Sivamohan y Forssberg (1985) exploraron el uso de sensores de desgaste basados en radiación para medir el desgaste en los componentes de las celdas de flotación. Sin embargo, estas técnicas presentaban limitaciones en cuanto a la precisión y la capacidad de detección en tiempo real.

Más recientemente, los avances en las técnicas de ensayos no destructivos han abierto nuevas oportunidades para abordar este desafío. En este sentido, los ensayos de ultrasonido han demostrado ser una alternativa

prometedora para la evaluación del desgaste en componentes de celdas de flotación. Como señalan Zhao et al. (2019) "los ensayos de ultrasonido permiten detectar y caracterizar defectos internos y cambios en las propiedades de los materiales, lo que posibilita una evaluación precisa y confiable del desgaste sin necesidad de desmontar los componentes" (p. 39).

Varios estudios han explorado la aplicación de ensayos de ultrasonido en celdas de flotación. Hernandez-Aguilar et al. (2017) desarrollaron una técnica de ultrasonido para evaluar el desgaste en paletas de celdas de flotación, logrando una precisión del 95% en comparación con las mediciones manuales. Asimismo, Kraipech et al. (2018) utilizaron ensayos de ultrasonido para monitorear el desgaste en impulsores de celdas de flotación, demostrando la capacidad de esta técnica para detectar cambios en el grosor de los componentes debido al desgaste.

Estas investigaciones han sentado las bases para el desarrollo de sistemas de monitoreo en tiempo real basados en ensayos de ultrasonido, lo que puede permitir una planificación más eficiente del mantenimiento y el reemplazo de componentes desgastados en las celdas de flotación.

2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1. Principios de la Flotación

La flotación es uno de los métodos clave en el procesamiento de minerales, empleado para separar las partículas valiosas de la ganga. Este proceso se basa en la adhesión selectiva de burbujas de aire a las partículas de mineral objetivo, lo que facilita su separación de la pulpa. Según Wills y Napier-Munn (2006) "la flotación se utiliza ampliamente en la minería para la concentración de minerales sulfurados, óxidos y minerales de sales solubles".

Proceso de la flotación

El proceso de flotación involucra tres fases principales: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está compuesta por materiales que se desea separar, mientras que la fase líquida corresponde al agua, lo cual, gracias a sus propiedades específicas, es un medio adecuado para estas separaciones. Antes de iniciar el proceso, los sólidos se mezclan con el agua formando una pulpa, que puede contener entre unas pocas unidades hasta un 40% de sólidos. En cuanto a la fase gaseosa, se utiliza aire, el cual se introduce en la pulpa de forma neumática o mecánica, permitiendo la creación de burbujas que actúan como puntos de adherencia para las partículas sólidas.

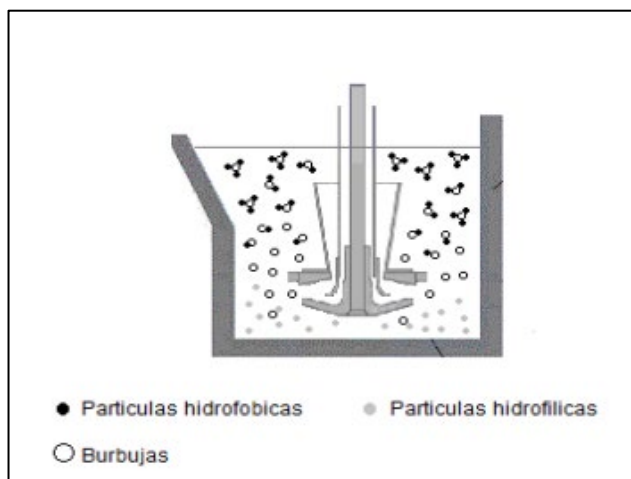
La flotación se basa en las características hidrofílicas e hidrofóbicas de los materiales sólidos. Es decir, el proceso depende del comportamiento

de los sólidos en contacto con el agua, o de su capacidad para mojarse. Los minerales como óxidos, sulfatos, silicatos, y carbonatos, que conforman la mayoría de los minerales estériles o ganga, suelen ser hidrofóbicos, lo que significa que no se mojan fácilmente con el agua. Al mismo tiempo, estos minerales también tienden a ser aerofílicos, lo que implica que tienen afinidad por las burbujas de aire. En contraste, los minerales hidrofílicos se mojan más fácilmente y no se adhieren a las burbujas de aire.

La separación de los minerales hidrofílicos e hidrofóbicos en una pulpa acuosa se logra tras molerlos finamente y acondicionarlos con reactivos que acentúan sus propiedades respectivas. Luego, al introducir burbujas de aire en la pulpa, las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas y son llevadas hacia la superficie, formando una espuma, mientras que las partículas hidrofílicas permanecen mojadas y se depositan en el fondo de la máquina de flotación, como se puede apreciar en la Figura 1.

Figura 1

Partículas de la flotación.



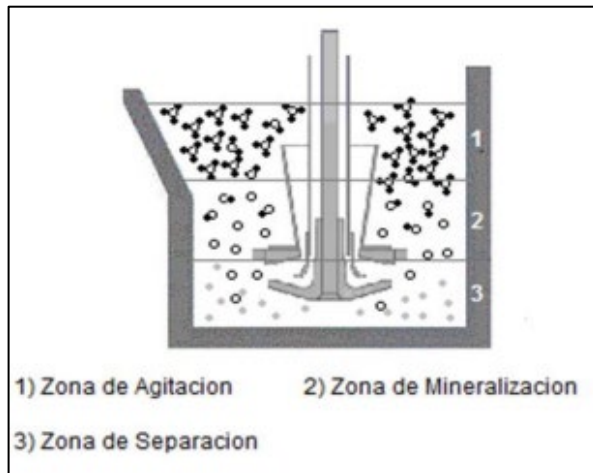
Nota: Adaptado de “Flotación de minerales”, por Alexander Sutulov (1963).

Elementos tecnológicos del proceso

El tratamiento mediante el proceso de flotación incluye los siguientes pasos: el mineral crudo, o mineral de cabeza, se introduce en una planta de trituración en seco, donde se repite el proceso de trituración hasta obtener fragmentos de aproximadamente 10 mm. Estos fragmentos se trasladan a una planta de molienda, en un circuito de molienda fina en húmedo, reduciendo a partículas de entre 50 y 100 micrones, dependiendo de la distribución del mineral. La molienda continúa hasta que el mineral queda completamente "liberado".

Figura 2

Corte transversal de una celda de flotación



Nota: Adaptado de “Flotación de minerales”, por Alexander Sutulov (1963).

Al mineral se agrega o trata con diversos reactivos y algunos de estos reactivos están diseñados para modificar las superficies de los minerales y facilitar la adsorción de otros compuestos (modificadores), mientras que otros se encargan de aumentar las propiedades hidrofóbicas de los minerales (colectores). Además, se utilizan reactivos que promueven la formación de una espuma uniforme y estable (espumantes). Una vez que la pulpa ha sido acondicionada con estos reactivos, se introduce en las máquinas de flotación, donde los minerales valiosos se separan en el concentrado, mientras que la ganga o parte estéril se elimina como relave.

2.2.2. Equipos de Flotación

Las celdas de flotación son equipos clave en el proceso de flotación, donde se lleva a cabo la separación de las partículas valiosas. Estas celdas consisten en tanques cilíndricos o rectangulares, con sistemas de inyección de aire y mecanismos de agitación. Rao (2004) define una celda de flotación como "un recipiente en el que se alimenta una pulpa de mineral y aire, y se produce la separación de las partículas valiosas mediante la adhesión selectiva de burbujas de aire" (p. 125).

2.2.2.1. Celdas Mecánicas

A principios del siglo XX, las celdas de flotación tenían volúmenes que oscilaban entre 10 y 100 pies cúbicos (equivalentes a 0,3 a 3 metros cúbicos). En las instalaciones industriales, era común emplear grandes filas de celdas dispuestas en serie y en paralelo para cumplir exigencia del procesamiento. Denver destacó como innovadora con sus celdas Sub-A (sub-aireadas), que tenían la capacidad de aspirar aire de forma autónoma, aprovechando parte de la energía del motor eléctrico destinada principalmente a la agitación y mezcla de la pulpa con el aire, sin requerir una fuente externa de aire. Además, las celdas Agitair (Galigher) y Wemco (Envirotek) también eran populares en el mercado.

En la década de 1960, se empezó a avanzar en el desarrollo de celdas de flotación de mayor capacidad, alcanzando los 500 pies cúbicos, con

Denver y Agitair fueron los principales proveedores. En 1975, se introdujo en la industria celdas de 1000 pies cúbicos. Durante la década de 1980, Denver perfeccionó los equipos "cell-to-cell" como una evolución de la tecnología SubA.

A medida que las celdas aumentaron en tamaño, perdieron gradualmente su capacidad de aspirar aire de manera autónoma. Esto condujo a la adopción de celdas con aire forzado, las cuales requieren un soplador externo para garantizar el suministro de aire necesario y optimizar el proceso. Denver también introdujo las celdas DR (Recirculación Directa), capaces de procesar mineral con un grado de molienda más grueso sin que este se asiente en el fondo de los tanques.

En todos los casos, los tanques utilizados eran de geometría cuadrada o rectangular. En los años 90, se introdujeron celdas más grandes, de hasta 4500 pies cúbicos, con diseño cilíndrico, lo que mejoró el comportamiento hidrodinámico y el rendimiento, especialmente en términos de selectividad. Desde entonces, se dejó de utilizar el pie cúbico como unidad común, siendo reemplazado por el metro cúbico. El volumen de los equipos disponibles se ha incrementado 20 veces desde la década de 1980 hasta el presente.

Beneficios del aumento en la escala de las celdas:

- Avance en la automatización gracias a la reducción de la cantidad de instrumentos y controles requeridos.
- Disminución del espacio necesario para la instalación.
- Reducción del consumo de energía por unidad de volumen.
- Mejora en la automatización gracias a la reducción de instrumentos y controles necesarios.

Estas ventajas han fomentado el crecimiento en el tamaño de los equipos, lo que ha permitido reducir tanto los costos de inversión como de operación. Además, se han simplificado los diseños de las plantas, requiriendo un menor número de equipos para una capacidad establecida, lo que facilita la operación y reduce la necesidad de personal para las tareas de operación y mantenimiento.

Figura 3

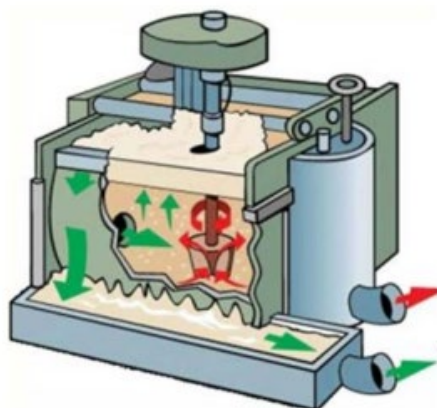
Celda mecánica cilíndrica



Nota: Tomado de “Operaciones Unitarias en ingeniería química” por J. Smith et al. (2007).

Figura 4

Celda mecánica con tanque rectangular



Nota: Tomado de “Operaciones Unitarias en ingeniería química” por J. Smith et al. (2007).

Diversas empresas han formado parte del mercado de celdas de flotación en las últimas décadas, entre las más destacadas se encuentran:

Metso1. Tecnologías Denver y Sala.

- *RCS (Reactor Cell System):* Celdas de aire forzado con capacidades que van desde 0,8 hasta 300 m³.
- *Celdas Denver DR:* Hasta 1500 pies cúbicos, principalmente utilizadas para minerales de molienda gruesa como el potasio.

FLSmidth. Reúne tecnologías Wemco y Dorr Oliver, anteriormente eran competidoras.

- **Wemco 1+1:** Celdas con estanque rectangular hasta 3000 pie cúbicos.
- **Wemco Smartcell:** celdas cilíndricas tipo autoaspirante hasta 257 m³
- **Dorr Oliver:** celdas de aire forzado con capacidad de hasta 350 m³
- **Supercell:** Celdas estándar de hasta 300 o 350 m³, en las que se pueden instalar mecanismos autoaspirantes (Wemco) o de aire forzado (Dorr Oliver). Actualmente, se desarrollan las Supercell de 600-660 m³.

Outotec (anteriormente denominada Outokumpu):

- TankCell aire forzado hasta 300 m³, con Tankcell 500 m³ en desarrollo.

Tenova. Tecnología desarrollada por Bateman, adquirida por Delkor en 2008:

- Celdas BQR Delkor aire forzado con capacidad de hasta 150 m³

BGRIMM. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy.

- Celdas aire forzado con volúmenes de hasta 300 m³

Aker y **Agitair** actualmente no tienen actividad en este mercado.

Figura 5

Esquema celda tipo aire forzado



Nota: Tomado de “Diagnostico y Análisis estratégico del negocio equipos de Flotación” por Rodrigo Andrés Núñez Ruiz (2014).

Figura 6

Esquema Celda Tipo Auto Aspirante



Nota: Tomado de “Diagnostico y Análisis estratégico del negocio equipos de Flotación” por Rodrigo Andrés Núñez Ruiz (2014).

Además del aumento en el tamaño de los equipos, se han añadido otros elementos en los diseños:

- Se han implementado controles de nivel independientes en cada celda cuando su capacidad supera los 200 m³, lo que es posible debido a la menor cantidad de equipos requerida con el aumento en la escala.
- Se ha reducido o eliminado el número y tamaño de los cajones de traspaso entre celdas, lo que disminuye el espacio necesario para la instalación y los costos de fabricación y montaje.
- La transmisión de potencia mediante poleas ha sido reemplazada por cajas reductoras, una tendencia impulsada por el incremento de potencia instalada en los equipos, que supera los 250 hp.
- Se han añadido canaletas recolectoras internas, ya sean radiales o transversales, para compensar la disminución relativa de la capacidad de rebose a medida que aumenta el volumen de los equipos.
- En las celdas con aire forzado, se ha implementado el control automatizado del flujo de aire independiente para cada celda.
- Además, se han integrado sistemas que permiten visualizar la espuma en cada celda y medir las leyes en tiempo real de los productos principales, junto con sistemas de control avanzado.

Columnas de Flotación

Se consideran celdas neumáticas de flujo en contracorriente, fue creado en Canadá en los años 60, para aplicaciones en carbón y hierro. Después de demostrar su eficiencia en circuitos de flotación de molibdeno, fue adoptada de manera definitiva en la industria del cobre en los años 80.

Debido a sus características, las columnas se emplean en las etapas de limpieza, que son fundamentales para obtener productos finales de alta calidad. En las plantas de flotación modernas, se combinan celdas mecánicas en las etapas de flotación primaria, barrido y, en ocasiones, en la primera etapa de limpieza, mientras que las columnas se utilizan en las etapas de limpieza final o intermedia. Generalmente, una sola etapa de flotación en columnas puede sustituir a varias etapas de flotación en celdas mecánicas de los diseños más antiguos, simplificando tanto los circuitos como los diseños del proceso.

La Minera Escondida en Chile, fue la pionera a nivel mundial en incorporar columnas en los 90, y hoy en día, todos los proyectos de flotación de cobre, con la excepción de Carmen de Andacollo (Teck), han incluido columnas en su diseño.

Además del cobre, las columnas, en conjunto con las celdas mecánicas, se consideran el equipo estándar para la flotación de molibdeno, zinc y plomo.

La evolución de la flotación en columnas ha seguido los siguientes ejes principales:

a) Sistema de inyección de gas:

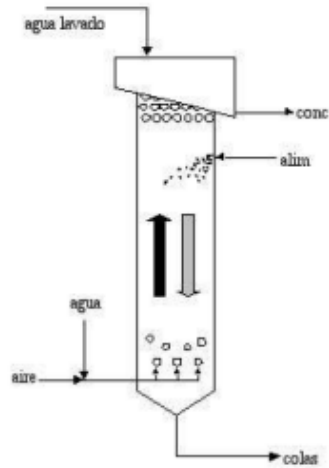
La inyección de gas es considerada el componente más importante y distintivo de una columna. Estos sistemas están divididos en dos tipos: internos y externos:

- **Burbujeador de medio poroso (internos):** Utilizados en los primeros diseños, las burbujas se generaban al atravesar elementos como tela filtrante o cerámica. Este sistema, ya obsoleto, presentaba problemas de mantenimiento (obstrucciones) y un rendimiento limitado al no generar burbujas del tamaño adecuado.
- **Lanzas perforadas (internos):** El aire, generalmente mezclado con agua, se inyectaba a través de tubos con perforaciones para formar burbujas dentro del tanque. Este diseño ha caído en desuso debido a dificultades de mantenimiento (desgaste) y a su limitada flexibilidad operativa.
- **Lanzas de abertura fija (internos):** Se trata de tubos con una única salida, cuyo diámetro se reduce para incrementar la velocidad del aire y favorecer la formación de burbujas más pequeñas.

- **Lanzas de abertura variable (internos):** Similar a las de abertura fija, pero con una cabeza ajustable desde el exterior que permite un mejor control del tamaño de las burbujas. Aunque su costo es accesible, su rendimiento es limitado, ya que genera tanto burbujas finas como otras de mayor tamaño, lo que reduce su eficiencia.
- **Mezclador estático Microcel (externo):** Este sistema combina aire con la pulpa recirculada desde la parte inferior del tanque mediante una bomba centrífuga. Un dispositivo externo genera burbujas finas de tamaño controlado, entre 1 y 2 mm, optimizando así el proceso. Luego, la mezcla se introduce en el tanque.
- **Tubo de cavitación (externo):** Variante del mezclador estático, donde la mezcla de aire y pulpa pasan por una restricción con alta velocidad, provocando cavitación y generando burbujas de tamaño fino y ultrafino. Sin embargo, las burbujas demasiado pequeñas resultan ineficaces, ya que no pueden adherirse adecuadamente a partículas más grandes, lo que disminuye tanto la eficiencia energética como el rendimiento del proceso.

Figura 7

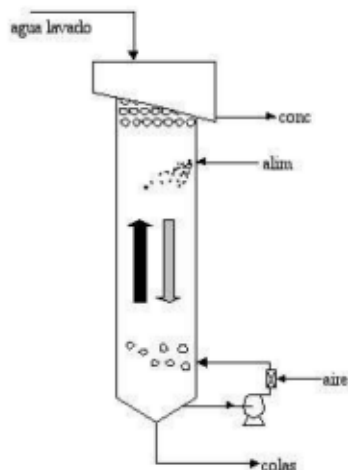
Columna con inyección de aire interna.



Nota: Tomado de “Diagnostico y Análisis estratégico del negocio equipos de Flotación” por Rodrigo Andrés Núñez Ruiz (2014).

Figura 8

Columna con inyección de aire externa.



Nota: Tomado de “Diagnostico y Análisis estratégico del negocio equipos de Flotación” por Rodrigo Andrés Núñez Ruiz (2014).

La flotación en columnas generalmente se distingue por tener estanques con alturas variables entre 10 y 15 metros, y secciones transversales que van de 0,5 m² a 28 m², dependiendo de la aplicación. Estas dimensiones no son fijas y se ajustan según los requerimientos de cada diseño.

Desde la década de 1980, se utilizaban divisores internos en columnas con más de 5 m² de sección transversal, dispuestos verticalmente para crear compartimientos internos, generalmente de un metro cuadrado, que mejoraban el comportamiento hidrodinámico del equipo. No obstante, con el tiempo, la necesidad de reducir costos de fabricación, junto con la incorporación de sistemas más eficientes de inyección de aire y el diseño de circuitos que compensan la pérdida de eficiencia metalúrgica, ha llevado a la eliminación de estos divisores.

Además, los tanques de equipos de tamaño medio y grande ya no utilizan geometrías cuadradas o rectangulares, ya que estas requerían un refuerzo estructural adicional que aumentaba significativamente el peso del equipo, a veces duplicándolo en comparación con los diseños cilíndricos.

En resumen, la tendencia actual es eliminar los divisores internos y optar por estanques cilíndricos, ajustando su altura y diámetro según las necesidades de cada proyecto. Los materiales estándar utilizados en su construcción son acero al carbono, con

recubrimientos de pintura o goma, dependiendo de las condiciones específicas de corrosión en cada caso.

Se usa agua de lavado en las columnas, en conjunto con la utilización de espumantes, generando espumas más profundas, lo que contribuye a la alta selectividad de estos equipos en comparación con las celdas mecánicas. El agua puede aplicarse sobre la espuma mineralizada mediante un sistema de tuberías perforadas. No obstante, el uso de tuberías perforadas no es recomendable si no se garantiza un suministro de agua sin impurezas, ya que estas pueden obstruir el sistema rápidamente, incrementando la necesidad de mantenimiento.

Figura 9

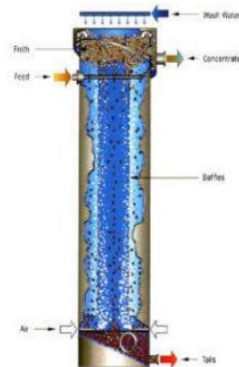
Columna de geometría rectangular e inyección de aire mediante lanzas.



Nota: Tomado de “Diagnostico y Análisis estratégico del negocio equipos de Flotación” por Rodrigo Andrés Núñez Ruiz (2014).

Figura 10

Columna de geometría cilíndrica con divisores internos e inyección de aire mediante lanzas



Nota: Tomado de “Diagnostico y Análisis estratégico del negocio equipos de Flotación” por Rodrigo Andrés Núñez Ruiz (2014).

Figura 11

Columna de geometría cilíndrica sin divisores internos y con sistema de inyección de aire externo.



Nota: Tomado de “Diagnostico y Análisis estratégico del negocio equipos de Flotación” por Rodrigo Andrés Núñez Ruiz (2014).

b) Instrumentación y control

Las columnas han aprovechado los avances en instrumentación y control que ha desarrollado la industria. De forma estándar, cada equipo incluye tres lazos de control:

- Flujo de Aire
- Flujo agua de lavado
- Control nivel de interfase pulpa/espuma (profundidad de espuma)

En las décadas de 1980 y 1990, estos controles solían realizarse mediante controladores locales tipo PLC. Sin embargo, con el tiempo esta función fue reemplazada por sistemas de control distribuido (DCS) en las plantas

Asimismo, la disminución de gastos y la experiencia acumulada en las actividades han permitido eliminar de ciertos elementos relacionados con la inversión y el mantenimiento, como la medición del caudal de alimentación y de relaves, así como el control del flujo de agua que se combina con aire, los cuales ya no se emplean en las plantas. En su lugar, se han implementado sistemas para visualizar la espuma y medir las leyes en línea, junto con el uso de estrategias de control avanzado, lo que ha mejorado la estabilización y optimización de las operaciones.

Durante casi treinta años de empleo de columnas como estándar en los circuitos de flotación de metales no ferrosos, la industria ha incorporado modificaciones, sobresaliendo los principales fabricantes de equipos:

Metso: Desde el año 2000, ha incorporado a CISA, una empresa francesa derivada de Control International Inc., fundada en EE. UU. en los años 80, y comercializa columnas con tecnología de inyección externa de aire, llamada Microcel.

Eriez: Empresa especializada en equipos magnéticos, adquirió a CPT (Canadian Process Technology), que heredó el conocimiento sobre columnas desarrollado por Cominco antes del año 1990. Proporciona equipos que introducen aire externamente mediante tubos de cavitación o emplean inyectores internos de abertura fija, denominados Slamjet.

SGS: Es una empresa canadiense con experiencia en flotación columnar, que se dedica a desarrollar y comercializar inyectores internos de abertura variable.

FLSmidth: En la década de 1990, desarrolló las columnas conocidas como Pyramid, pero luego desistió esta actividad. Más adelante, amplió su gama de celdas mecánicas con columnas obtenidas de CPT, hasta que esta última fue adquirida por Eriez.

MolyCop: Es un proveedor de columnas que opera exclusivamente en Chile, y tiene como actividad principal la venta de medios de molienda (bolas de acero) para plantas de molienda. Ofrece inyectores internos de abertura fija y no ha incorporado como estándar la geometría cilíndrica de los estanques ni la eliminación de separadores internos.

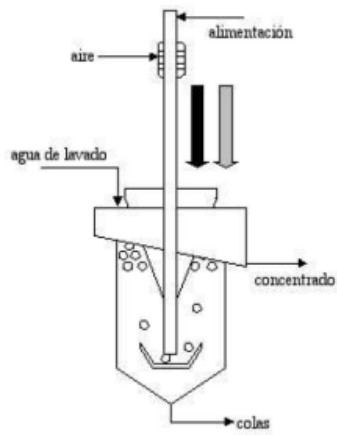
Celdas Neumáticas

También conocidas como celdas de contacto, son dispositivos en los que la mezcla de pulpa de alimentación y aire se lleva a cabo de manera intensiva a través de un tubo descendente llamado "downcomer". Este proceso ocurre en un corto período de tiempo, de solo unos pocos segundos, con un alto concentrado de gas en contacto con la pulpa mineralizada. Posteriormente, esta mezcla se dirige a un tanque de menor capacidad en comparación con las celdas mecánicas o columnas que tienen capacidades de tratamiento equivalentes. La función de este tanque es permitir la separación de la espuma, que se extrae como producto final de alta calidad.

Esta celda se emplea en la industria del carbón, ya que presenta beneficios con los diseños de celdas mecánicas y columnas, que generalmente son más grandes y requieren una mayor inversión.

Figura 12

Esquema de una celda neumática o celda de contacto.



Nota: Tomado de “Diagnostico y Análisis estratégico del negocio equipos de Flotación” por Rodrigo Andrés Núñez Ruiz (2014).

Los actores más destacados en el mercado son:

Glencore Xstrata Technology: Se encarga de comercializar la celda Jameson, que fue desarrollada en Australia a partir de 1969 y comenzó a tener aplicaciones industriales exitosas desde 1980.

Maelgwyn: Ofrece la celda G-Cell, que se comercializa en Chile por Ingeniería de Minerales y proviene de una tecnología desarrollada en Alemania (Imhoflot), anteriormente conocida como celda Ekof.

Siemens: Ha desarrollado tecnologías destinadas a su uso en la industria del carbón.

En relación con los diferentes tipos de celdas desarrolladas a lo largo de un siglo, es decir que su evolución ha sido gradual y se distingue por varios factores, tales como:

- La dificultad de probar nuevos diseños a escala industrial, ya que podrían interferir con las operaciones continuas y causar pérdidas irrecuperables en caso de fallos.
- Aunque se han creado numerosas variaciones de los diseños originales de celdas de flotación, los principios fundamentales del proceso no han cambiado de manera significativa. El escalado y diseño de estas celdas han enfrentado limitaciones debido a la falta de modelos y criterios sólidos que impulsen avances tecnológicos.
- El sector minero es prudente y asume riesgos de forma cuidadosa, lo que dificulta la incorporación de tecnologías recientes y diseños novedosos.
- Los periodos de desarrollo en proyectos mineros son extensos, con un promedio 10 años. Desde la etapa de diseño del proceso y selección de equipos de flotación hasta su ejecución y puesta en funcionamiento, suelen transcurrir al menos cinco años, durante los cuales no se pueden introducir cambios tecnológicos o nuevos diseños que se hayan desarrollado.

2.2.3. Mecanismos de desgaste en celdas de flotación

El desgaste en las celdas de flotación se produce por varios mecanismos, incluyendo abrasión, erosión, corrosión y fatiga. Según Napier-Munn (2014) "Los principales mecanismos de desgaste en las celdas de flotación son la abrasión por partículas sólidas en suspensión y la erosión por la turbulencia del fluido" (p. 315). Estos mecanismos pueden actuar de manera individual o combinada, dependiendo de las condiciones operativas.

Mecanismo de desgaste

Entre los diversos mecanismos de desgaste progresivo, los más importantes son:

Fenómenos mecánicos:

- Desgaste por abrasión
- Desgaste por adhesión
- Desgaste por fatiga

Fenómenos fisicoquímicos:

- Oxidación
- Difusión química

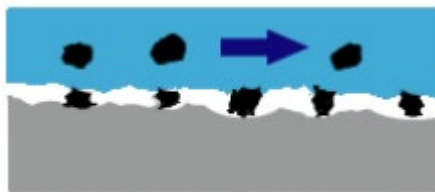
Desgaste por abrasión

Es el mecanismo de desgaste más habitual que se observa durante el mecanizado en la industria, según A. Cornet y J.P. Deville en Physique et

ingénierie des surfaces: EDP Sciences, 1998. Se define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella (Figura 13.). El desgaste por abrasión durante el mecanizado ocurre principalmente en la superficie de contacto de la herramienta. Este tipo de desgaste ocurre debido a la eliminación de las crestas superficiales durante el movimiento entre la herramienta y la pieza, especialmente cuando la pieza contiene componentes más duros que la herramienta, como nitruros, carburos u óxidos.

Figura 13

Desgaste por abrasión



Nota: Vigo, julio 2015

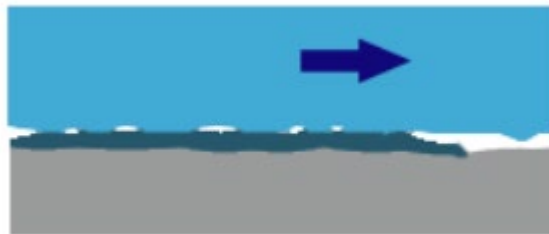
Desgaste por adhesión

El desgaste por adhesión es el segundo mecanismo más común de deterioro en herramientas de mecanizado. Ocurre cuando dos metales se encuentran bajo alta presión y temperatura, lo que provoca adhesión o soldadura entre ellos (ver Figura 14). Durante el mecanizado, las superficies de la herramienta y la pieza están sometidas a fuertes cargas y deformación.

Si existe afinidad química entre los materiales en contacto, puede generarse una adsorción (soldadura fría) o solubilidad (soldadura caliente). Este tipo de desgaste se presenta principalmente en la superficie de desprendimiento de la herramienta, formando cráteres. A medida que la viruta se desliza sobre la herramienta, pequeñas partículas de ésta se desprenden, lo que lleva al desgaste de la superficie. La aparición y crecimiento de estos cráteres suelen tener un comportamiento lineal en función del tiempo y se incrementan con mayores velocidades de corte.

Figura 14

Desgaste por adhesión



Nota: Vigo, julio 2015

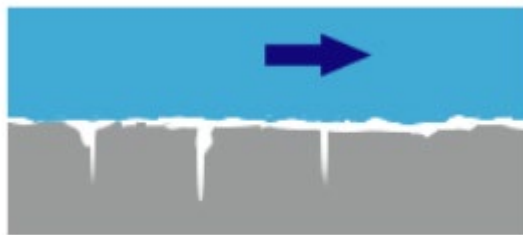
Desgaste por fatiga

El fenómeno de fatiga suele originarse por solicitaciones tanto mecánicas como térmicas. La fatiga térmica se produce debido a las variaciones cíclicas de temperatura en las zonas de la herramienta que no pueden expandirse libremente. El gradiente térmico entre la superficie y las capas internas genera tensiones que provocan la aparición de fisuras y grietas en la herramienta (ver Figura 15). Por otro lado, la fatiga mecánica

surge a causa de las vibraciones, fricciones y esfuerzos alternos de compresión y tracción a los que la herramienta está sometida.

Figura 15

Desgaste por fatiga



Nota: Vigo, julio 2015

Desgaste por oxidación

Las elevadas temperaturas y la exposición al aire provocan oxidación en la mayoría de los metales, aunque los tipos de óxidos pueden variar considerablemente. Por ejemplo, el tungsteno y el cobalto producen capas de óxido porosas que se desprenden fácilmente con las virutas, mientras que otros óxidos, como el de aluminio, son significativamente más duros y resistentes. Esto hace que algunos materiales de corte sean más susceptibles al desgaste por oxidación, especialmente en la zona de contacto entre el filo y la viruta. Durante el mecanizado con lubricación, el aumento de la temperatura de la herramienta provoca la evaporación del agua presente en los fluidos de corte. Esta combinación de la evaporación del agua con el oxígeno del aire causa oxidación, lo que debilita la herramienta y genera pequeñas entallas en el filo. Aunque este tipo de desgaste por

oxidación no es muy común en el mecanizado (ver Figura 16), puede afectar el rendimiento de la herramienta.

Figura 16

Desgaste por oxidación



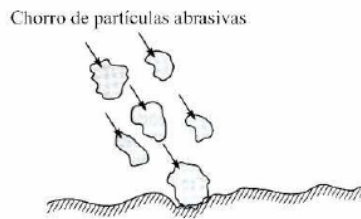
Nota: Vigo, julio 2015

Desgaste por impacto

El desgaste por impacto abarca dos fenómenos principales: el desgaste erosivo, causado por partículas aleatorias, y el desgaste percusivo, originado por impactos reiterados en un mismo lugar. La erosión ocurre cuando chorros o flujos de pequeñas partículas sólidas, llevadas por fluidos como aire o agua, o por gotas líquidas, impactan sobre una superficie. En cambio, la percusión se produce debido a impactos repetidos de cuerpos sólidos más grandes. Este tipo de desgaste se considera una forma de abrasión, pero se trata de manera diferente, ya que la presión de contacto aumenta en función de la energía cinética del flujo de partículas en un chorro de aire o líquido al impactar sobre una superficie. Factores como la velocidad de las partículas, el ángulo de impacto y el tamaño promedio de las partículas abrasivas influyen en la energía cinética de las partículas que colisionan.

Figura 17

Esquema del desgaste por erosión.



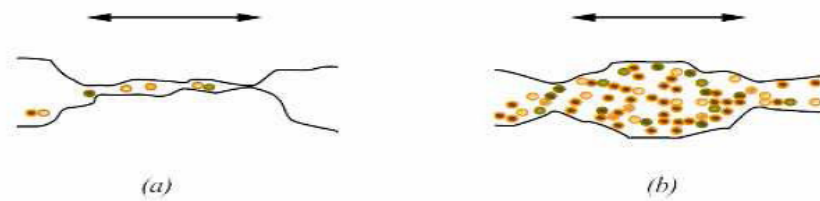
Nota: Ronald M. Gomez Angarita

Desgaste químico

El desgaste químico conocido también como corrosión, se produce con el deslizamiento de dos superficies entre sí que ocurre en entorno corrosivo. En el aire, el agente corrosivo principal es el oxígeno, por lo que este tipo de desgaste se conoce comúnmente como oxidación. En ausencia de deslizamiento, los productos de la corrosión, tales como los óxidos, pueden crear una capa protectora que detendría el proceso corrosivo. Sin embargo, el movimiento entre las superficies desgasta esta película, permitiendo que el ataque químico prosiga. Por lo tanto, el desgaste químico requiere tanto la reacción química (corrosión) como el roce entre las superficies.

Figura 18

Ilustración del desgaste químico entre dos superficies en deslizamiento, (a) inicio del desgaste y (b) desgaste avanzado de las superficies



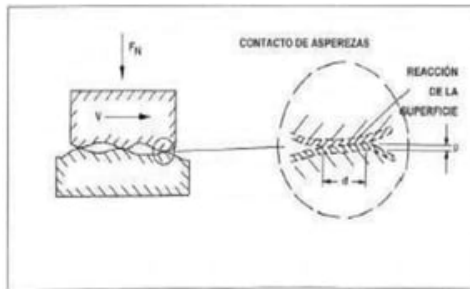
Nota: Ronald M. Gomez Angarita

Desgaste por cavitación

La cavitación se produce cuando en un fluido, sometido a altas velocidades o a ondas sónicas de gran energía, se generan pequeñas cavidades o burbujas de vacío. Este fenómeno provoca el desgaste del material debido a las elevadas presiones temporales que surgen cuando dichas burbujas colapsan. A diferencia de la erosión, este tipo de desgaste es más suave y parece estar relacionado con la resistencia a la fatiga de los materiales. Es común en maquinaria que experimenta vibraciones durante su funcionamiento. En esencia, el desgaste por vibración es un tipo de desgaste adhesivo o abrasivo, donde las asperezas de las superficies se adhieren por la carga normal y el movimiento oscilante causa su separación.

Figura 19

Desgaste por cavitación



Nota: Modelo representativo de la formación de la capa de óxido.

2.2.4. Principios de los ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos se basan en la interacción de diversas formas de energía (ondas, radiación, campos magnéticos, etc.) con los materiales y componentes analizados. Hellier (2003) define los ensayos no destructivos como "técnicas que permiten la inspección y evaluación de materiales, componentes o estructuras sin alterar su capacidad de uso futuro" (p.1). Estas técnicas aprovechan los principios físicos y las propiedades de los materiales para detectar defectos o anomalías.

Las técnicas de inspección no destructiva se emplean para detectar y evaluar discontinuidades que pueden encontrarse en la superficie, debajo de la superficie o en el interior de los materiales, sin causarles daño ni comprometer su funcionalidad futura.

Estas pruebas se utilizan en diversas etapas, como:

- Recepción de materia prima
- Procesos de fabricación
- Maquinado o ensamblaje final
- Procesos de reparación
- Servicios y mantenimiento preventivo

Cada método de ensayo no destructivo tiene tanto beneficios como restricciones. Sin embargo, una de sus principales fortalezas es que pueden complementarse entre sí, de manera que las limitaciones de un método pueden ser compensadas por las ventajas de otro.

Tabla 1

Métodos de ENSAYOS No Destructivos

NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS	ABREVIATURA	METODOS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS
Acoustic Emission Testing	AE	Emisión Acústica
Electromagnetic Testing	ET	Electromagnetismo
Laser Testing Methods	LTM	Pruebas por Láser
Leak Testing	LT	Prueba de Fuga
Liquid Penetrant Testing	PT	Líquidos Penetrantes
Magnetic Particle Testing	MT	Partículas magnéticas

Nota: Según la Práctica Recomendada ASNT SNT-TC-1A-2011

Tabla 2*Métodos de Ensayos No Destructivos*

NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS	ABREVIATURA	MÉTODOS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS
Neutron Radiographic Testing	NRT	Radiografía con Neutrones
Thermal / Infrared Testing	TIR	Termografía Infrarroja
Ultrasonic Testing	UT	Ultrasonido industrial
Vibration Analysis	VA	Análisis de vibración
Visual Testing	VT	Inspección visual
Radiographic Testing	RT	Inspección radiográfica
Magnetic flux leakage	MFL	Inspección con fugas de campo magnético
Ground Penetrating Radar	GPR	Radiación penetrante en tierra
Guided Wave	GW	Onda guiada

Nota: Según la Práctica Recomendada SNT-TC-1A-2011

2.2.4.1. Técnicas de END basadas en ultrasonido:

Los ensayos ultrasónicos se basan en la propagación de ondas sonoras de alta frecuencia a través de los materiales. Según Krautkramer y Krautkramer (1990) "Los ensayos ultrasónicos permiten detectar defectos, discontinuidades y variaciones de espesor en componentes metálicos mediante el análisis de la reflexión y atenuación de las ondas ultrasónicas" (p. 13). Esta técnica es ampliamente utilizada para evaluar el desgaste en celdas de flotación.

2.2.4.2. Técnicas de END basadas en corrientes inducidas:

Los ensayos de corrientes inducidas se basan en la generación de corrientes eléctricas en materiales conductores mediante la aplicación de un campo magnético alternante. Según García-Martín et al. (2011), "Las corrientes inducidas en un material conductor varían en función de la presencia de defectos, discontinuidades o variaciones de espesor, lo que permite su detección y caracterización" (p. 1). Esta técnica es útil para evaluar el desgaste en celdas de flotación metálicas.

2.2.4.3. Técnicas de END basadas en termografía infrarroja:

La termografía infrarroja está basada en la detección de la radiación infrarroja emitida por los objetos, relacionada con su temperatura superficial. Según Maldague (2001) "La termografía infrarroja permite detectar defectos y anomalías en materiales y componentes mediante el análisis de los patrones de distribución de temperatura en la superficie" (p. 9). Esta técnica es útil para identificar áreas de desgaste diferencial en celdas de flotación.

2.2.4.4. Técnicas de END basada en emisión acústica:

Los ensayos de emisión acústica se basan en la detección de ondas de estrés transitorias generadas por la liberación repentina de energía dentro de un material. Según Choi y Kim (2019) "Las técnicas de emisión acústica pueden proporcionar información valiosa sobre el inicio y la progresión del desgaste en las celdas de flotación, permitiendo la detección temprana y la

planificación del mantenimiento preventivo" (p. 107). Esta técnica es capaz de detectar el inicio del desgaste y el crecimiento de grietas en los componentes de las celdas de flotación.

2.2.4.5. Técnicas de END basada en ensayos de líquidos penetrantes:

Las pruebas de líquidos penetrantes se emplean para identificar defectos en la superficie de materiales no porosos. ("Tinta penetrante para soldadura: guía completa de uso y beneficios") Según Hellier (2003) "Los ensayos de líquidos penetrantes implican la aplicación de un líquido penetrante coloreado en la superficie del material, el cual ingresa en cualquier grieta o defecto superficial presente" (p. 109). En las celdas de flotación, esta técnica puede emplearse para detectar grietas y defectos superficiales asociados con el desgaste en los componentes metálicos.

2.2.5. Principios básicos de la acústica (términos)

Oscilación (ciclos): Se refiere a una variación periódica en el estado o el comportamiento de un cuerpo.

Onda: Es la difusión de una oscilación y que ocurren cuando las partículas de un material vibran y transmiten su movimiento a las partículas adyacentes.

Periodo (T): Se refiere al tiempo que dura una oscilación.

Frecuencia (f): Es el valor inverso del período.

Amplitud (A): Representa la máxima desviación de la oscilación. Si la amplitud se mantiene constante en el tiempo, se considera que la oscilación

es desamortiguada (como en materiales perfectamente elásticos). Si, por el contrario, disminuye con el tiempo, se considera que es amortiguada, siendo esta disminución atribuida a la disipación de energía en materiales que no son perfectamente elásticos.

Amortiguación o Atenuación: Se refiere a la reducción de la amplitud de una oscilación a lo largo del tiempo.

Velocidad de propagación: Es la rapidez con la que una onda se desplaza, en este caso, se refiere a la velocidad del sonido (C), la cual varía según las propiedades del material que actúa como medio de transmisión (estas propiedades se explicarán más adelante).

Longitud de onda (λ): Es la distancia entre dos puntos sucesivos que tienen el mismo estado de oscilación a lo largo de la dirección de propagación.

"Si el fenómeno se desplaza a una velocidad (V), se establece lo siguiente:"

$$\lambda = V * T \quad [1]$$

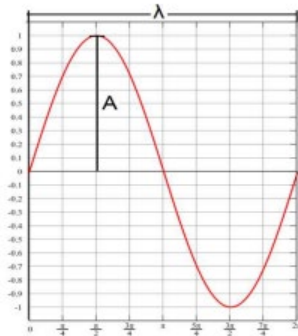
O teniendo en cuenta la frecuencia:

$$\lambda = V/f \quad [2]$$

A continuación, se muestra la imagen de una onda senoidal arbitraria con sus principales características:

Figura 20

Onda senoidal

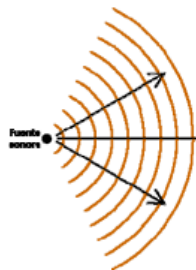


Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Frente de onda: Es el conjunto geométrico donde los puntos del medio son alcanzados simultáneamente por una onda específica. Cuando una onda se propaga en el espacio o sobre una superficie, los frentes de onda pueden observarse como líneas o superficies que avanzan con el tiempo, alejándose de la fuente sin interceptarse entre sí.

Figura 21

Frente de onda



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

2.2.6. Tipos de ondas

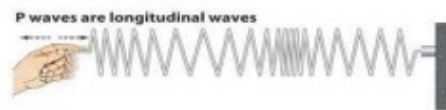
Las ondas pueden propagarse de diversas formas, cada una relacionada con el movimiento específico de las partículas del medio:

Ondas longitudinales: En este tipo de ondas, las partículas del medio se desplazan en la misma dirección que la onda se propaga.

Un ejemplo de esto es la propagación del sonido o el movimiento en un resorte.

Figura 22

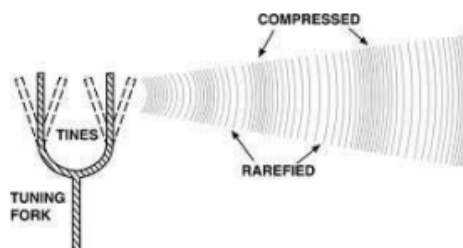
Movimiento de un resorte.



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Figura 23

Propagación del sonido



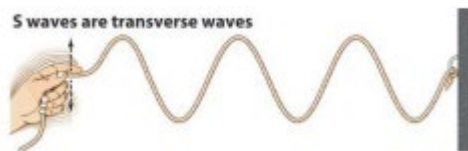
Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Estas ondas son las más empleadas en ultrasonido debido a que se propagan en cualquier medio y son fáciles de generar y detectar. Además, pueden ser dirigidas y localizadas por un haz concentrado, y tienen una alta velocidad.

Ondas Transversales: En este tipo de onda, el desplazamiento de las partículas ocurre de forma perpendicular a la dirección en la que se propaga la onda. Un ejemplo sería el movimiento de una cuerda cuando se agita o el comportamiento del agua ante una perturbación.

Figura 24

Movimiento de una soga



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Figura 25

Perturbación en superficie de líquidos



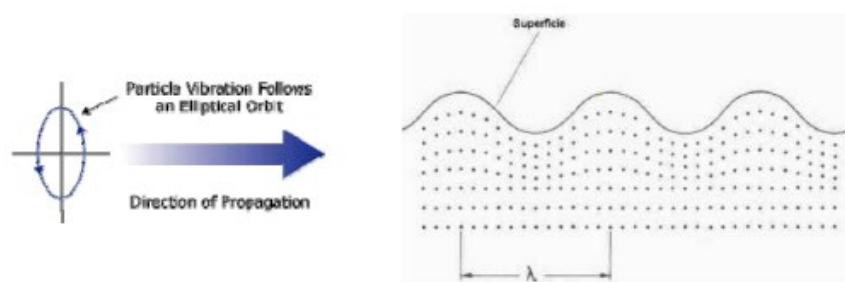
Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Dado que los líquidos y gases no presentan resistencia a los esfuerzos de corte, las ondas transversales no pueden propagarse en estos medios; por lo tanto, solo las ondas longitudinales pueden viajar a través de líquidos y gases. En cambio, en los sólidos, es posible que se propaguen tanto ondas transversales como longitudinales, así como sus combinaciones.

Ondas superficiales o de Raileigh: Estas ondas se desplazan a lo largo de las superficies de sólidos con espesores relativamente grandes, penetrando alrededor de una longitud de onda en el material. Tienen la característica de que el desplazamiento de las partículas es una combinación de movimientos longitudinales y transversales, describiendo una trayectoria elíptica donde el eje mayor es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Se utilizan en el método de ultrasonido debido a su alta sensibilidad a defectos en la superficie, y son capaces de seguir las curvaturas que puedan presentar dichas superficies.

Figura 26

Ondas Superficiales.



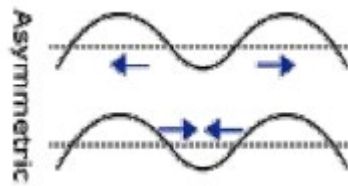
Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Ondas de LAMB: Las ondas de Lamb se manifiestan en cuerpos cuyo espesor es comparable a la longitud de onda, como en chapas delgadas. Estas ondas se propagan de manera paralela a la superficie a lo largo del espesor del material y son altamente influenciadas por el espesor y la frecuencia del movimiento. Se generan al ingresar al material en un ángulo de incidencia donde la componente de velocidad paralela a la superficie coincide con la velocidad de propagación del sonido en el mismo material, permitiendo que viajen distancias de varios metros en el acero. Su uso es común para escanear chapas, alambres y tubos.

La oscilación de las partículas es similar al movimiento elíptico mencionado, lo que da lugar a dos modos principales de vibración: el Modo Simétrico o Extensional, donde las partículas se mueven paralelamente a la superficie de manera simétrica respecto al plano medio, y el Modo Antisimétrico o Flexional, en el cual, el movimiento predominante de las partículas es perpendicular a la superficie, haciendo que la placa se flexione. Las ilustraciones que se ofrecen a continuación, muestran estos movimientos.

Figura 27

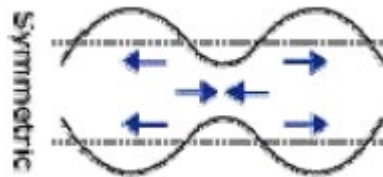
Ondas de Lamb Asimétrica



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Figura 28

Ondas de Lamb Simétrica



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Ondas de torsión: Este tipo de ondas se desplazan en cuerpos con forma de barra, generando oscilaciones de rotación alrededor de su eje longitudinal, mientras que la propagación ocurre a lo largo de dicho eje.

2.2.7. *Ondas sonoras*

Propagación del sonido

El sonido, como se define comúnmente, se transmite en forma de ondas. Una diferencia clave entre estas ondas, generadas por medios elásticos, y las ondas electromagnéticas (como la luz, los rayos X y los rayos gamma), es que las ondas sonoras requieren un medio para su propagación

(ya sea sólido, líquido o gaseoso). Sin embargo, ambas comparten propiedades, ya que transportan energía de un punto a otro en el espacio. Cuando un objeto en el aire (como una cuerda tensa o la voz humana) perturba el aire circundante en una dirección que coincide con la de la propagación, se producen Ondas Longitudinales.

Impedancia acústica

El sonido se transmite a través de los materiales debido al movimiento de moléculas unidas de forma elástica. Por lo tanto, la impedancia acústica (Z) se define como la resistencia de un medio a la transmisión de ondas y se calcula multiplicando la densidad del medio por la velocidad de la onda en dicho medio. Un material con baja impedancia acústica indica que ofrece menor resistencia a las deformaciones elásticas provocadas por las ondas sonoras. Esta propiedad es una característica constante de los diferentes materiales.

$$Z = \rho * V \quad [3]$$

$$(gr/cm^3 * cm/seg)$$

ρ : Densidad del material.

V : Velocidad del sonido en el material.

La impedancia acústica es importante en:

- La evaluación de la forma cómo se transmiten y reflejan las ondas acústicas en la interfaz de dos materiales con diferentes propiedades.

- El diseño de cabezales ultrasónicos.
- La evaluación de la capacidad de un medio para absorber el sonido.

Frecuencias

Independientemente de las diversas clasificaciones que se puedan realizar, es un hecho conocido que no todo el espectro de frecuencias es perceptible para el oído humano. Solo un rango específico de frecuencias es audible, el cual puede variar entre diferentes personas y cambiar con el tiempo y la edad.

El umbral inferior de audibilidad se sitúa cerca de 16 Hz, mientras que el umbral superior se encuentra alrededor de 20 kHz. Los rangos de interés son:

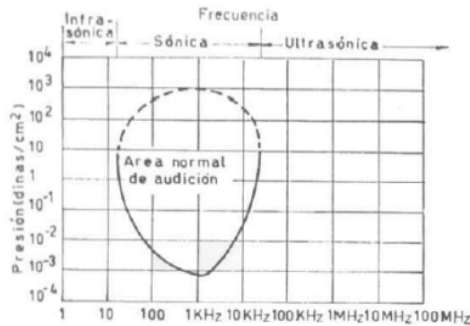
Subsónico: $f < 16\text{Hz}$, en este rango no se escucha ningún tono, solo se notará presión. **Sónico:** $16\text{Hz} \leq f \leq 20\text{KHz}$, rango audible por el ser humano.

Ultrasónico: $f > 20\text{KHz}$.

Las frecuencias utilizadas en los ensayos ultrasónicos se encuentran en el rango de 0,5 a 25 MHz.

Figura 29

Espectro acústico



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de estas ondas (velocidad del sonido) es constante a través de un sólido y se determina principalmente por el módulo de elasticidad (también llamado módulo de Young) y la densidad del material. A partir de la ecuación diferencial de una onda longitudinal:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{E}{\rho} * \frac{d^2y}{dx^2} \quad [4]$$

Con, E: módulo de elasticidad del material; ρ : Densidad del material. Se llega a la velocidad de la onda longitudinal:

$$V = \sqrt{E/\rho} \quad [5]$$

Considerando la relación de Poisson:

$$V = \sqrt{\frac{e}{\rho} * \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad [6]$$

En consecuencia, se concluye que la velocidad del sonido no está influenciada por la amplitud o la frecuencia, sino que depende del medio por

el cual se desplaza. En el caso de una onda transversal, su velocidad es aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales y se expresa de la siguiente manera:

$$V_t = \sqrt{G/\rho} \quad [7]$$

Siendo ρ : Densidad del material; G: Módulo de corte.

Respecto a las ondas superficiales, que son un caso particular de las transversales, su velocidad se aproxima a:

$$V_s = 0.9 V_t \quad [8]$$

La velocidad de propagación de las ondas de Lamb y las ondas de torsión depende de las dimensiones del material en sí, del tipo de onda y de su frecuencia.

Energía específica

La energía específica (E) de una onda sónica se define como:

$$E = \frac{1}{2} * \frac{p^2}{\rho V^2} \quad [9]$$

Donde “p” es la amplitud de la onda sónica (presión del sonido).

Intensidad del sonido

La intensidad del sonido (I) es la cantidad de energía que transporta la onda por unidad de área en una unidad de tiempo y está dada por:

$$I = E * V \quad [10]$$

O utilizando $Z = \rho \cdot V$

$$E = \frac{1}{2} * \frac{p^2}{Z} \quad [11]$$

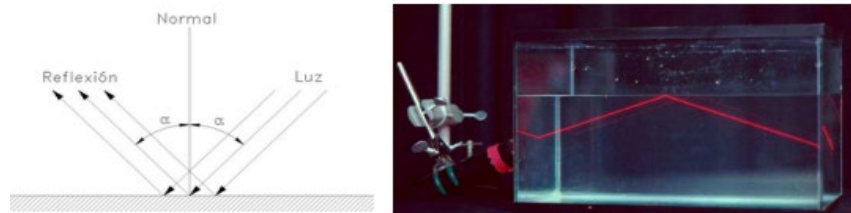
Descomposición de ondas

Las ondas sonoras, sufren los siguientes fenómenos:

- 1) Cuando una onda impacta una superficie que posee propiedades elásticas diferentes a las del medio en el que se está propagando, una porción de su energía se refleja en una dirección que forma el mismo ángulo con la normal de la superficie que el ángulo de incidencia de la onda. Este fenómeno se conoce como REFLEXIÓN y es responsable del eco que se produce en el instrumento de ensayo.

Figura 30

Reflexión de una onda

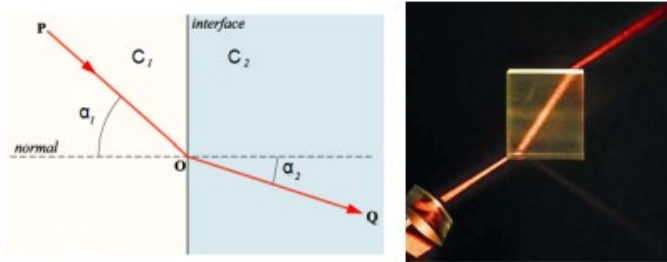


Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

- 2) La porción de la onda que no se refleja ingresa al segundo medio (que comienza a vibrar a la misma frecuencia) en una dirección diferente a la de la onda incidente. Sin embargo, la relación entre los senos de los ángulos formados por el rayo incidente y el rayo que penetra, en relación con la normal, permanece constante. Este fenómeno se conoce como REFRACCIÓN.

Figura 31

Refracción de una onda



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

La Ley de Snell, que también se aplica a ondas sonoras, establece una relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción cuando una onda se encuentra con un medio de diferente impedancia acústica. Al igual que en la óptica, esta ley indica que la dirección de una onda se altera al cruzar la frontera entre dos medios, lo que resulta en un cambio de velocidad de propagación en cada medio.

$$\frac{\text{sen } \alpha_1}{\text{sen } \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad [12]$$

Donde:

α_1 : Ángulo de incidencia de la onda incidente.

α_2 : Ángulo de incidencia de la onda refractada.

C_1 : Velocidad del sonido en el medio de la onda incidente.

C_2 : Velocidad del sonido en el medio de la onda refractada.

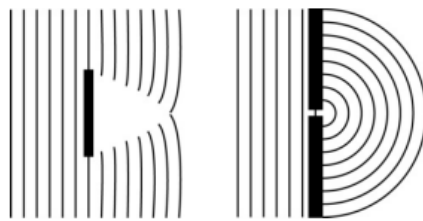
Al analizar el ángulo de reflexión de una onda, dado que el medio de reflexión es el mismo que el medio de incidencia, la relación entre los senos de los ángulos resulta ser 1. Esto implica que el ángulo de la onda reflejada es idéntico al ángulo de la onda incidente.

Cuando una onda sonora choca con un objeto pequeño o un orificio con dimensiones similares a la longitud de onda, algunos puntos del frente de onda pueden funcionar como fuentes secundarias de ondas, lo que se conoce como difracción. Este fenómeno puede presentarse en dos situaciones:

- Cuando la onda se encuentra con un objeto cuyo tamaño es similar a su longitud de onda, rodea el objeto al interactuar con él.
- Cuando el frente de onda llega a un orificio cuyo tamaño es pequeño en comparación con su longitud de onda.

Figura 32

Efecto de difracción.

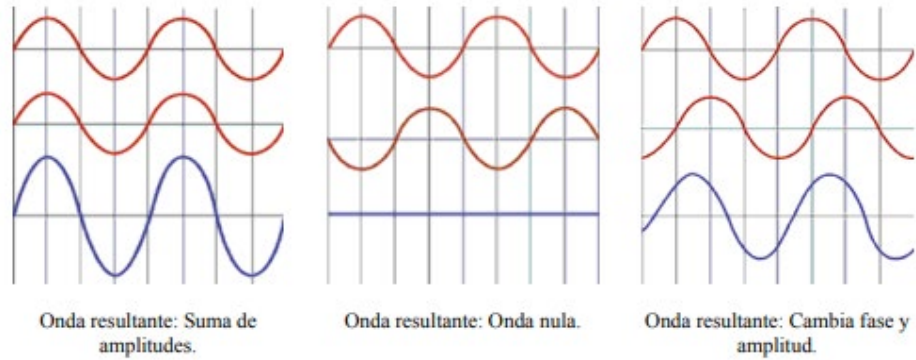


Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

- 3) Cuando las ondas sonoras se generan al mismo tiempo desde diferentes puntos o fuentes, ocurre un "solapamiento" de estas ondas, dando lugar al fenómeno conocido como **interferencia**, lo que genera una onda resultante diferente a las originales. Las siguientes figuras ilustran este fenómeno.

Figura 33

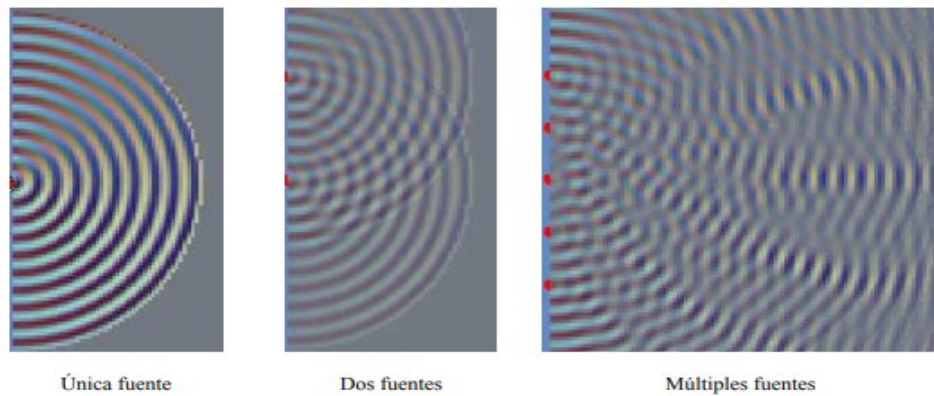
Efecto de Interferencia



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Figura 34

Efecto de Interferencia en Ondas de Sonido



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

- 4) Parte de la energía acústica se pierde debido a la fricción, que se convierte en calor; este fenómeno se denomina ABSORCIÓN. La "fricción interna" aumenta con la frecuencia. Los materiales que poseen una alta fricción interna, y por lo tanto una mayor capacidad de absorción, se utilizan como eficaces amortiguadores de sonido.

- 5) Se encuentran factores llamados coeficientes de atenuación acústica que indican cuánta atenuación del sonido ocurre por cada unidad de longitud que este recorre a través de un material determinado. La cantidad de atenuación del sonido no solo está relacionada con las propiedades del material, sino también con la frecuencia de la onda y el tipo de onda que se propaga.

2.2.8. Generación de ultrasonido

Se presentan múltiples métodos para producir ondas ultrasónicas, aprovechando diferentes fenómenos físicos, que se pueden aplicar en los ensayos no destructivos, dependiendo de la frecuencia deseada y del rendimiento esperado. El principio fundamental consiste en transformar impulsos eléctricos en movimientos mecánicos y viceversa.

Estos métodos se clasifican en:

Procedimientos mecánicos

Estos son similares a los utilizados para crear sonido audible. Consisten en dispositivos que oscilan y están diseñados para tener una frecuencia natural alta. Sin embargo, esta técnica no se aplica para ensayos no destructivos.

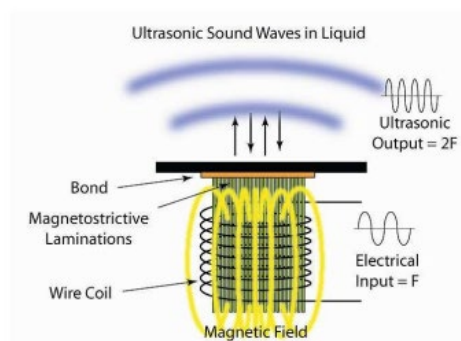
Efecto magnetostrictivo

Este método se basa en la característica de ciertos materiales ferromagnéticos, como el acero y el níquel, que pueden comprimirse o expandirse en una dirección específica cuando se exponen a campos

magnéticos bajo ciertas condiciones. Este fenómeno es reversible, lo que permite tanto la generación como la detección de ondas ultrasónicas.

Figura 35

Esquema de Generación por Método Magnetoestrictivo



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Efecto piezoeléctrico

Este fenómeno se utiliza ampliamente en la evaluación no destructiva de materiales. Los componentes principales son una pieza de material polarizado, en el cual, ciertas moléculas tienen una carga positiva en una parte y una carga negativa en otra. Al aplicar un campo eléctrico a través del material, las moléculas polarizadas se orientan en la dirección de este campo, generando un dipolo dentro de la estructura cristalina. Esta alineación resulta en un cambio dimensional que se denomina electrostricción. También puede suceder lo contrario, donde un cambio en las dimensiones del material genera un campo eléctrico.

Algunos de los materiales más utilizados en cristales para transductores son:

Cuarzo: Siendo el primer material empleado y tiene propiedades de frecuencia muy estables, aunque es poco eficiente en la generación de energía acústica, por lo que suele ser sustituido por otros más eficaces.

Sulfato de Litio: Es un receptor altamente efectivo de energía acústica, aunque es bastante delicado, soluble en agua y su uso está restringido a temperaturas inferiores a 75 °C.

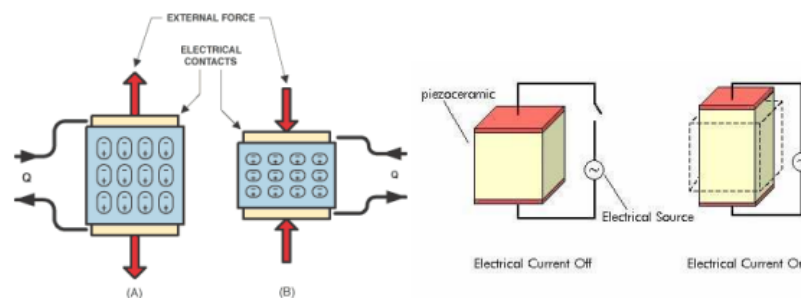
Cerámicas sintetizadas: Estos materiales generan energía acústica más eficaces, aunque tienden a desgastarse con el tiempo.

Generalmente, el espesor del elemento activo (cristal) se determina según la frecuencia requerida para el transductor.

Por lo general, el grosor del elemento activo (cristal) se determina según la frecuencia necesaria para el transductor. A medida que las frecuencias aumentan, los cristales empleados son más delgados. El método de generación de ultrasonido puede alcanzar frecuencias de hasta 25 megaciclos por segundo (25 MHz).

Figura 36

Esquema de elementos piezoeléctricos



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Características del cabezal

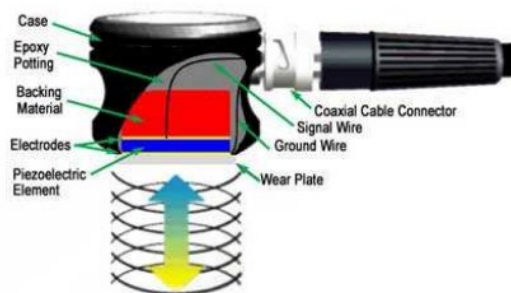
El cabezal es un elemento fundamental del dispositivo de ultrasonido, incluye el elemento piezoeléctrico que convierte señales eléctricas en vibraciones mecánicas durante la emisión, y a su vez transforma las vibraciones mecánicas en energía eléctrica durante la recepción.

El rendimiento del cabezal se ve afectado por varios factores, incluidos el diseño mecánico y eléctrico. El diseño mecánico abarca elementos como la superficie de radiación, el nivel de amortiguamiento, el tipo de encapsulado y el sistema de conexión, entre otros.

A continuación, se muestra una sección típica de un cabezal:

Figura 37

Esquema de cabezal ultrasónico.



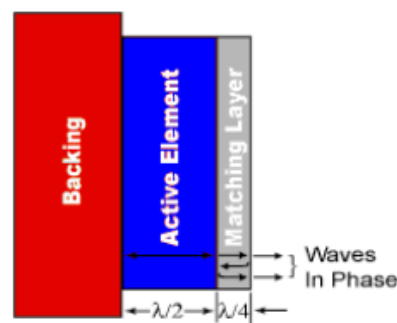
Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

El elemento piezoeléctrico se corta a la mitad de la longitud de onda deseada. Para maximizar la energía emitida, se coloca una lámina con una longitud de $1/4$ de la onda y con una impedancia específica entre el cristal

piezoeléctrico y la superficie del cabezal. Esta lámina garantiza que todas las ondas emitidas por el cabezal estén en fase.

Figura 38

Esquema de láminas de protección del cabezal



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Los cabezales de contacto incluyen una lámina protectora que resguarda sus componentes internos de posibles daños o arañazos. El material de soporte, representado en rojo en la imagen anterior, tiene un papel importante en las propiedades de amortiguación del cabezal. Al elegir un material de soporte con una impedancia similar a la del elemento piezoeléctrico, se logra un amortiguamiento óptimo, lo que se traduce en un mayor ancho de banda de operación y una mejor sensibilidad.

Aunque los cabezales están diseñados para resistir ciertos daños, es recomendable manejarlos con precaución. Un uso inapropiado, como golpes, puede dañar la lámina de protección o el material de soporte, lo cual se reflejará en la calidad de las lecturas durante el ensayo.

Longitud de onda y detección de defectos

En una prueba de ultrasonido, el usuario debe seleccionar la frecuencia a utilizar. Como se mencionó anteriormente, un cambio en la frecuencia de la onda modifica la longitud de onda del sonido, ya que la velocidad se mantiene constante. Además, la longitud de onda del ultrasonido afecta significativamente la capacidad para detectar discontinuidades. Una norma general establece que una discontinuidad debe tener al menos la mitad de la longitud de onda para que pueda ser detectada con una probabilidad razonable.

En la inspección por ultrasonido, se emplean comúnmente los términos sensibilidad y resolución. La sensibilidad se refiere a la capacidad de detectar pequeñas discontinuidades durante la prueba, y generalmente aumenta al incrementar la frecuencia (lo que reduce la longitud de onda). Por otro lado, la resolución indica la habilidad del sistema para identificar fisuras que están muy cercanas entre sí, y este parámetro también mejora con un aumento en la frecuencia.

No obstante, aumentar la frecuencia puede afectar negativamente el rendimiento del instrumento, ya que las ondas acústicas tienden a dispersarse en materiales con una estructura de grano grueso, como las piezas de fundición.

Además, incrementar la frecuencia disminuye la capacidad de penetración de la medición. Por lo tanto, al elegir la frecuencia óptima para

la inspección, es esencial equilibrar los resultados positivos y negativos. Antes de elegir la frecuencia, se deben considerar factores como el tamaño del grano, el espesor de la pieza, el tipo de discontinuidad, su tamaño y su ubicación probable.

Es fundamental señalar que diversos elementos también afectan el rendimiento del equipo, tales como la duración del pulso emitido, el tipo y voltaje aplicados al cristal, las características del cristal, el material y el tamaño del cabezal, además del circuito encargado del procesamiento de la información en el dispositivo.

Eficiencia, ancho de banda y frecuencia del cabezal

Hay cabezales que están diseñados para ser más eficientes en la transmisión, mientras que otros son más efectivos en la recepción. A menudo, un cabezal que funciona bien en una aplicación específica puede no ser el más adecuado para otras.

Es esencial comprender el rango de frecuencias o ancho de banda de un cabezal. Cada cabezal cuenta con una frecuencia principal, la cual está determinada principalmente por las características del material de soporte y del cristal empleado. Los cabezales con un alto nivel de amortiguamiento pueden responder a un amplio espectro de frecuencias, lo que les confiere una excelente capacidad de resolución. Por otro lado, los cabezales con menor amortiguamiento presentan un rango de frecuencias más restringido y una resolución inferior, aunque ofrecen una mejor penetración.

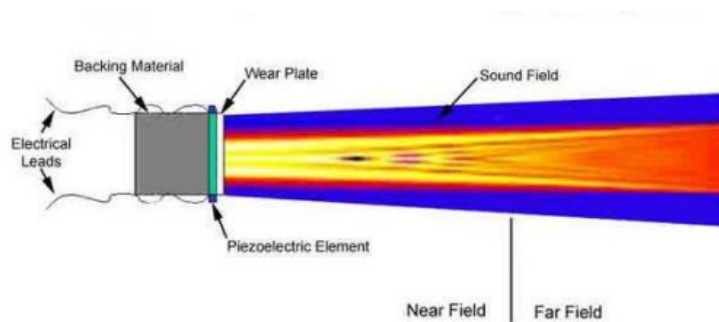
La frecuencia central establece las capacidades del cabezal. Las frecuencias bajas, que van de 0,5 MHz a 2,25 MHz, brindan mayor energía y penetración en el material. En cambio, los cristales de altas frecuencias, que oscilan entre 15 MHz y 25 MHz, tienen una penetración menor, pero son altamente sensibles para detectar pequeñas discontinuidades.

Campo de radiación del cabezal

El sonido producido por un cabezal piezoeléctrico no se emite desde un único punto, sino que proviene de toda la superficie del elemento piezoeléctrico. En la Figura siguiente se muestra el campo sonoro emitido por un transductor típico, donde se ilustra cualitativamente la intensidad del sonido mediante una escala de colores, donde los tonos más claros representan intensidades más elevadas.

Figura 39

Esquema cualitativo de intensidades de sonido emanadas por un cabezal piezoeléctrico

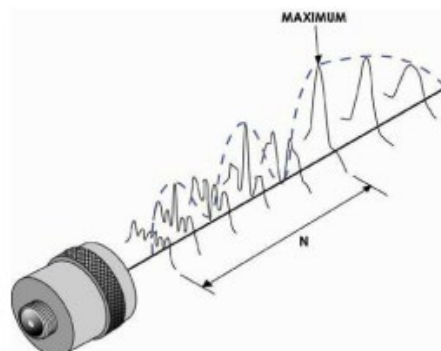


Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Dado que las ondas ultrasónicas se generan desde varios puntos en la superficie del elemento piezoeléctrico, su intensidad se ve influenciada por los efectos de interferencia entre estos puntos, como se mencionó anteriormente. Esta interferencia da lugar a fluctuaciones que se propagan en el área cercana al cabezal, conocida como Campo Cercano o ZONA MUERTA, donde puede resultar difícil identificar discontinuidades en el material. Al final del campo cercano, las ondas de presión tienden a volverse más homogéneas. Esta zona del haz con mayor homogeneidad se conoce como Campo Lejano, y la transición se produce a una distancia N , donde la amplitud de las ondas sigue un patrón mucho más suave. Para reducir este efecto no deseado, a menudo se utilizan accesorios que se describirán en las siguientes secciones.

Figura 40

Esquema cualitativo de intensidades de sonido emanadas por un cabezal piezoeléctrico



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Tipos de cabezales

Como se mencionó previamente, los cabezales se diseñan para diversas aplicaciones específicas, por lo que, es crucial considerar parámetros como la frecuencia deseada, el ancho de banda y el enfoque según las necesidades particulares. Su clasificación se realiza en función de su uso.

Cabezales de contacto

Se utilizan para evaluaciones que requieren interacción directa con la pieza y, por lo general, se operan manualmente. Tales dispositivos cuentan con elementos internos resguardados por una cubierta ergonómica y una interfaz que previene el desgaste en la superficie que entra en contacto con las piezas a inspeccionar. Además, requieren un medio de acoplamiento, como aceites, grasas o agua, para eliminar la película de aire entre el cabezal y el elemento que se está evaluando.

Figura 41

Cabezal de contacto



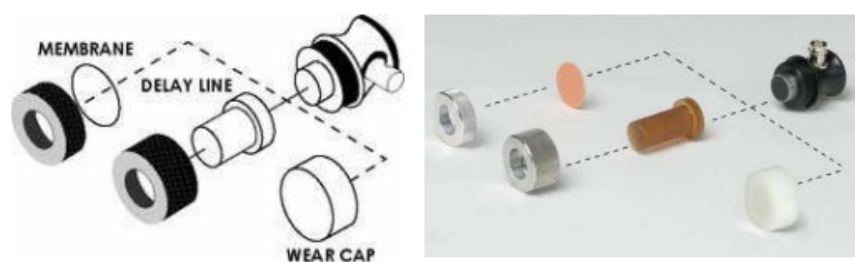
Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Accesorios

Para eliminar la llamada ZONA MUERTA mencionada previamente, se utiliza un elemento separador (denominado DELAY LINE en la siguiente imagen) que desplaza la fuente de ultrasonido de la superficie de la pieza, despejando dicha zona. Además, este tipo de separadores ofrece la ventaja de crear un retraso entre la emisión de la onda de sonido y la recepción de la onda reflejada, mejorando así las mediciones en áreas cercanas a la superficie del material en contacto con el cabezal. Esto los convierte en una opción ideal para mediciones de espesores con alta precisión y para la detección de delaminaciones en materiales compuestos. Además, para usos específicos que requieren ensayos en superficies a altas temperaturas, se utiliza una interfase de material cerámico.

Figura 42

Elementos separadores.



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Figura 43

Tipos de cabezales



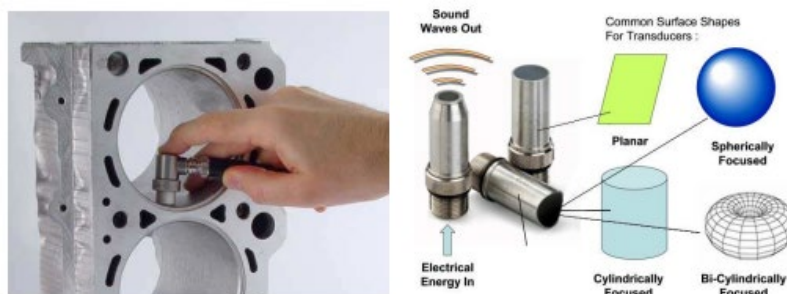
Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Cabezales para Superficies curvas

Los cabezales planos mostrados en las Figuras anteriores son ideales para evaluar superficies planas. Sin embargo, cuando la superficie a inspeccionar es curva, se utilizan interfaces diseñadas con curvatura para ajustarse mejor a dichas formas y optimizar el contacto.

Figura 44

Distintos tipos de cabezales de contacto



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Cabezales de doble cristal

Estos cabezales cuentan con dos cristales piezoeléctricos independientes dentro de la misma carcasa. Uno de los cristales se encarga de transmitir la señal ultrasónica, mientras que el otro la recibe. Ambos elementos son optimizados por separado, con el objetivo de lograr las mejores propiedades de emisión en el "Emisor" y las óptimas para la recepción en el "Receptor". Entre los cristales, se coloca una barrera acústica que bloquea la transmisión de señales entre ellos. Además, están posicionados en ángulo, lo que genera haces cruzados en el material evaluado. Este tipo de cabezales es comúnmente utilizado para medir espesores en piezas delgadas.

Figura 45

Cabezales de doble cristal.



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Cabezales angulares

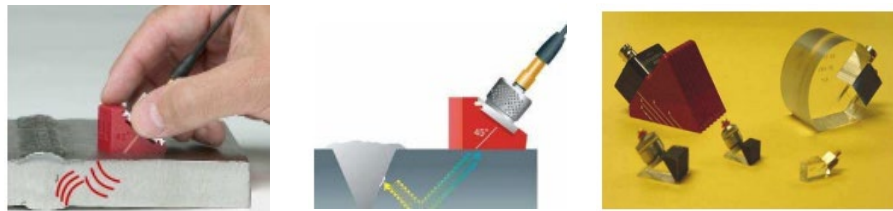
Los cabezales angulares emplean una interfaz en forma de cuña que establece un ángulo entre el haz emitido y la perpendicular de la superficie que se está evaluando. Esto facilita la introducción de ondas de corte

refractadas en el material y permite que estas ondas se reflejen en las paredes de la pieza, mejorando así la detección de imperfecciones en los cordones de soldadura.

Sin embargo, se utilizan para generar ondas superficiales que ayudan a identificar defectos en la superficie. Estos cabezales pueden adquirirse con diferentes ángulos fijos o en versiones ajustables. Es importante tener en cuenta que, en los cabezales de ángulo fijo, el ángulo de refracción de la onda variará según el material utilizado.

Figura 46

Configuraciones de cabezales angulares



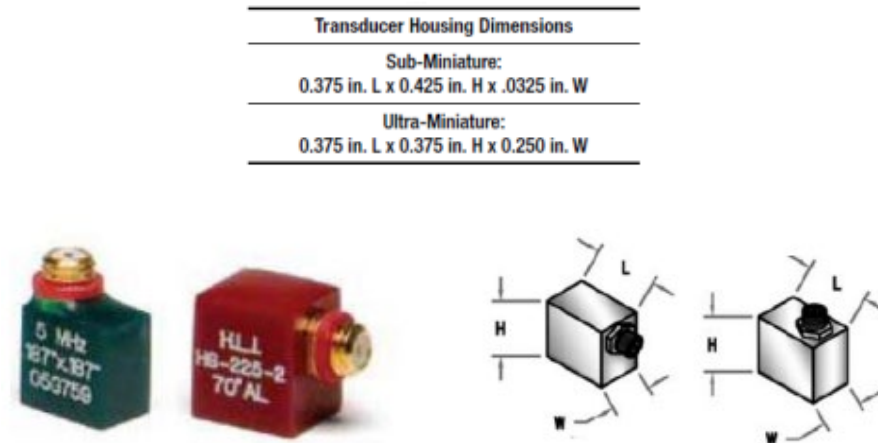
Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Micro cabezales

Con estructuras que tienen dimensiones del orden de milímetros, son perfectos para la inspección de soldaduras en tubos de diámetros reducidos o en situaciones donde es necesario introducir ondas transversales mediante un sondeo muy pequeño.

Figura 47

Configuraciones de micro cabezales



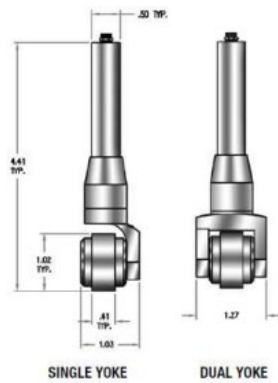
Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Cabezales de rodillos

Estos cabezales se utilizan para inspeccionar uniones de materiales metálicos y no metálicos, como conexiones de madera, concreto, soldaduras metálicas o plásticas, y vidrio, entre otros. Permiten realizar escaneos rápidos sin requerir la técnica de inmersión.

Figura 48

Configuraciones de cabezales de rodillo



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Cabezales del tipo lápiz

Los cabezales tipo lápiz se utilizan en ultrasonido para medir el espesor y evaluar superficies. Su diseño delgado permite acceder a áreas reducidas y detectar imperfecciones internas en materiales compuestos. Son eficaces en la generación de ondas ultrasónicas, siendo útiles en ensayos no destructivos.

Figura 49

Configuraciones de cabezales del tipo lápiz



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Cabezales del tipo brocha

Estos cabezales se emplean para examinar áreas grandes, lo que permite reducir el tiempo de ensayo. Están formados por una matriz de pequeños cristales piezoeléctricos, dispuestos de manera precisa para garantizar una variación mínima en el rendimiento y asegurar una sensibilidad homogénea en toda la superficie.

Figura 50

Configuraciones de cabezales del tipo brocha



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

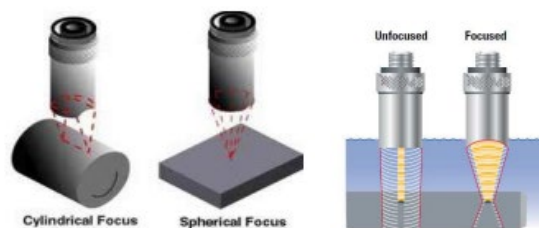
Cabezales de inmersión

Estos cabezales no establecen contacto directo con la pieza a inspeccionar. Están diseñados para funcionar en un entorno líquido y cuentan con conexiones selladas que protegen sus componentes del desgaste. Se ofrecen con haz plano o con enfoque cilíndrico o esférico, según la aplicación, siendo la principal ventaja de los cabezales con enfoque su capacidad para mejorar la sensibilidad y la resolución axial al concentrar

la energía sonora en un área reducida. En general, se utilizan cabezales dentro de un tanque de agua que forma parte de un sistema de escaneo. A continuación, se presentan las figuras que ilustran los diferentes tipos de cabezales mencionados y sus aplicaciones.

Figura 51

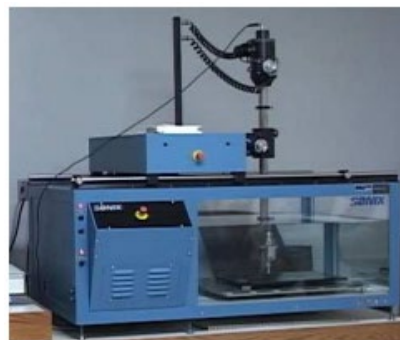
Tipos de cabezales de inmersión



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Figura 52

Máquina de ensayo de inmersión



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

Velocidad de propagación de onda en sólidos elásticos:

La siguiente ecuación muestra cómo determinar la velocidad de propagación de una onda en materiales sólidos elásticos:

$$V = \sqrt{E / P * (1 - \mu) / (1 + \mu) * (1 + 2 * \mu)} \quad [13]$$

Nota: (ASTM C597, 2016)

Donde:

E: Módulo de elasticidad dinámico

P: Densidad

μ : Razón de Poisson

Esta ecuación presentada se usa para medir la velocidad de propagación de onda en un sólido elástico con cualquier dimensión o tamaño (El & Material, 2010).

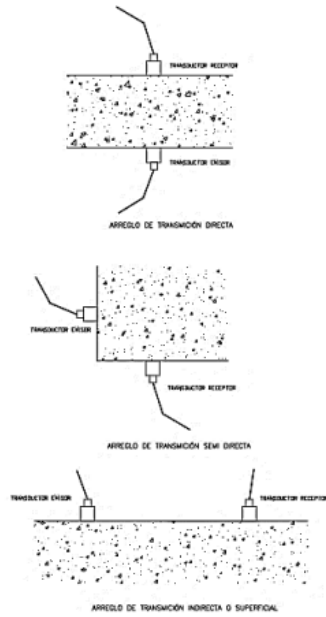
Dicha velocidad es inversamente proporcional a la frecuencia de esta, también estas dependerán de las características de la muestra ensayada teniendo como resultado la condición del material y su calidad (El & Material, 2010)

Posiciones de los transductores:

En la siguiente Figura se muestra 3 formas de colocar los transductores para poder medir el tiempo de transmisión de onda por el método directo:

Figura 53

Arreglos para la colocación de los transductores

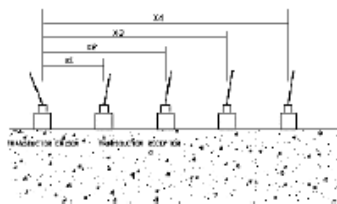


Nota: El & Material, 2010

Según El & Material (2010), el método indirecto es menos preciso, porque solo mide la velocidad de transmisión de la onda en la superficie de la muestra, sin alcanzar su interior, lo que puede llevar a un mayor margen de error. La siguiente Figura muestra el procedimiento de medición.

Figura 54

Determinación de la Velocidad del Pulso por el Método Indirecto



Nota: El & Material, 2010

Factores que afectan a la medición de la velocidad de transmisión de Onda:

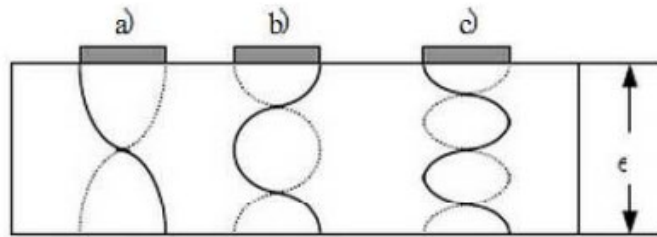
Metodología de Resonancia

Este método se basa en la medición de la frecuencia de resonancia a través de la reflexión (formación de ondas estacionarias) y se utiliza principalmente para determinar espesores en piezas con superficies paralelas. Cuando un haz ultrasónico de excitación continua y amplio espectro de frecuencias se propaga en una muestra con superficies paralelas de un espesor "e", las oscilaciones cuya semi longitud de onda es un submúltiplo del espesor de la muestra se refuerzan al superponerse en fase, mientras que las demás se debilitan, lo que da lugar a un fenómeno de resonancia y a la formación de ondas estacionarias.

Como consecuencia, las oscilaciones propias pueden describirse en función del número de semi longitudes de onda que caben en el grosor del objeto. Por ejemplo, la oscilación característica fundamental, o primera, se asocia con una semi longitud de onda por unidad de grosor (como se ilustra en la parte a de la Figura siguiente), mientras que la oscilación de orden n está relacionada con n semi longitudes de onda (por ejemplo, las de orden 2 y 3, representadas en las Figuras b y c, respectivamente).

Figura 55

Frecuencia fundamental y armónicos en ensayo por resonancia.



Nota: Claudio Rimoldi, Luis Marino Mundo

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

3.1.DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La evaluación de la condición de los revestimientos de la celda de flotación WEMCO SMART CELL que se realiza por el método no destructivo aplicando la técnica de ultrasonido (UT), permite obtener un análisis completo de las superficies de los revestimientos de componentes de la celda WEMCO SMART CELL.

La inspección de los revestimientos de los componentes de la celda tiene una duración de 20 minutos, previa a la toma de las medidas, se tiene un tiempo de 10 a 15 min para la revisión, traslado de equipos, herramientas, materiales, y realizar la documentación necesaria de seguridad para el ingreso al interior de la celda, agregando el tiempo de coordinación del bloqueo, etiquetado y desbloqueo, registro de personal y equipos que ingresaran y salen del interior de la celda, en total la duración máxima es de 35 min para la inspección de la celda FTR001 modelo WEMCO SMART CELL.

Según el Manual de Pruebas No destructivas SNT-TC-1A, se debe verificar que el personal técnico NDT, debe estar certificado de acuerdo con los procedimientos para capacitar, calificar y certificar al personal de NDT.

Antes de comenzar la inspección, el operador debe ajustar el instrumento a la velocidad del sonido del material, utilizando el patrón de calibración y el transductor especificados en el procedimiento del fabricante.

Siguiendo estas recomendaciones se planifica la inspección NDT al interior de la celda, iniciando con la calibración del equipo OLYMPUS modelo EPOCH650, el material a inspeccionar es caucho, por ende, se efectúa una inspección preliminar de la parte o pieza a ser verificada para tener certeza de su espesor nominal, este puede variar dependiendo del fabricante y la velocidad del caucho (1620 m/s) que permanece en un dato constante. El transductor que se recomienda utilizar según el fabricante es de 1 MHz, pero este puede variar dependiendo de la experiencia del Inspector Nivel III, acción que debe ser documentada en detalle en la orden de trabajo. Para la adherencia del transductor a la superficie se usa acoplante en gel de la Marca SONOTECH.

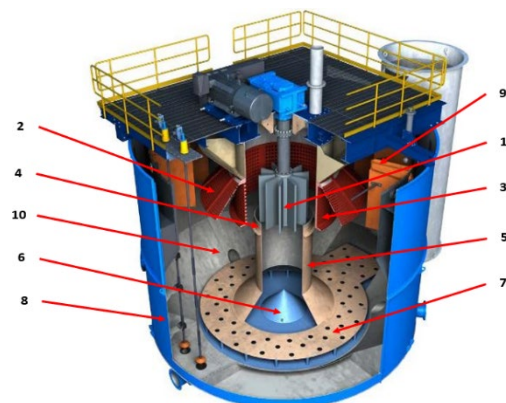
En el interior de celda para realizar la inspección se tiene el equipo EPOCH650 previamente calibrado al material a medir y se hará uso de instrumentos y herramientas como es el vernier, flexómetro, marcadores blancos, trapos, linternas de mano y cabeza, libreta de apuntes. El uso de estos instrumentos y herramientas facilitan la inspección, como realizar la limpieza con un trapo en la superficie del caucho, antes de colocar el

acoplante en gel SONOTECH y el transductor de 1 MHz, este procedimiento previo de limpieza una mejor lectura del haz de onda en la superficie del componente.

En la inspección de los revestimientos de los componentes de la celda según procedimiento se establece tomar 4 lados en grados de 0°, 90°, 180°, 270°, seleccionando 4 puntos de medición en cada lado, estas medidas de los espesores son escritas en la superficie del caucho con el marcador blanco de cada componente, y anotadas en la libreta, posteriormente en el término de la inspección se toma evidencia fotográfica, terminada la inspección se avisa al vigía para retirarse del área interna de la celda, y proceder al desbloqueo, finalizando en su totalidad la inspección.

Lo componentes principales en la celda WEMCO SMART CELL, son los siguientes:

1. ROTOR flsmith (Negro)
2. CAMPANA-FALDÓN
3. DISPERSER
4. SPLIT COLLAR
5. DRAFT TUBE
6. CONO DE ASCELERACIÓN
7. FALSO PISO
8. PARED DE LA CELDA
9. DEFLECTORES
10. BEVEL BOTTOM (pared inclinda)



En esta inspección para la celda flotación FTR001 se considera los siguientes componentes: rotor del alabe, Split collar, draft tube, falso piso, pared de la celda, Bevel Bottom. La campana, el disperser y los deflectores no se puede inspeccionar con ultrasonido por el acceso restringido, pero si se realizó una inspección visual del componente y el área en general.

3.2. ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

Las mediciones recopiladas diariamente de la inspección de espesores de los componentes de la celda FTR001 modelo WEMCO SMART CELL durante un periodo de 6 meses, son para generar una base de datos que permita la proyección del desgaste de los espesores en el tiempo, y encontrar el límite crítico de la celda FTR001, mediante los límites críticos de los componentes, desde su espesor nominal hasta el espesor restante o remanente, aplicando métodos estadísticos en Excel y demostrando gráficamente la proyección de desgaste, el perfil del desgaste de los espesores en cada componente y el % del desgaste que presenta a lo largo del tiempo establecido.

Se utiliza SPSS para realizar una correlación estadística del peso acumulado diario entre las medidas de los espesores recopilados de los componentes de la celda FTR001, para comprobar si el peso del mineral también influye en el desgaste de los componentes de la celda.

A continuación, se muestra en la gráfica 1. La proyección del desgaste de los espesores de los componentes de la celda de flotación FTR001 modelo

WEMCO SMART CELL, desde su espesor nominal de cada componente hasta el espesor límite de crítico, que tuvo una duración de 6 meses de seguimiento diario con la inspección de los componentes.

Alabe del Rotor

El espesor nominal del Alabe del rotor es de 15 mm, y en la inspección se encontró un espesor remanente de 4.99 como límite crítico del alabe del rotor, presentando un desgaste del 67%, en un periodo de 5 meses y 4 días.

Draft tube (Tubo de aspiración)

El espesor nominal del Draft tube es 10 mm, y en la inspección se encontró un espesor remanente de 3.94 como límite crítico del Draft tube, presentando un desgaste de 61 %, en un periodo de 5 meses y 4 días.

Split Collar (cuello dividido en el tubo)

El espesor nominal del Split Collar es 10 mm, y en la inspección se encontró un espesor remanente de 1.02 mm como límite crítico del Split Collar, presentando un desgaste de 90%, en un periodo de 5 meses y 4 días.

Piso Falso

El espesor nominal del Piso falso es de 10 mm, y la inspección se encontró un espesor remanente de 1.54 mm como límite crítico del Piso falso, presentando un desgaste de 85 %, en un periodo de 5 meses y 4 días.

Pared de celda

El espesor nominal de la pared inclinada es de 6 mm, y en la inspección se encontró un espesor remanente de 0.21 mm como límite crítico de la pared de la celda, presentando un desgaste de 97 %, en un periodo de 5 meses y 4 días.

Bevel Bottom (fondo biselado o pared inclinada)

El espesor nominal de la pared inclinada es de 6 mm, y en la inspección se encontró un espesor remanente de 0.70 mm como límite crítico de la pared inclinada, presentando un desgaste de 88%, en un periodo de 5 meses y 4 días.

Tabla 3

Resumen del desgaste en el revestimiento de la celda de Flotación FTR001-WEMCO SMART CELL

Fechas de Inspección	01-de mayo-2023	31 de mayo-2023	31 de Jun-2023	31 de Jul-2023	31 de Ago-2023	30 de Set-2023	31 de Oct-2023
Días de operación	0	31	61	92	123	153	184
Tonelaje Acumulado, MTn	0.034	1.085	2.103	3.154	4.205	5.222	6.274
Alabe del Rotor	15.00	13.04	11.14	9.17	7.21	5.31	3.35
Split Collar	10.00	8.25	6.54	4.77	3.01	1.30	-0.46
Draft tube	10.00	8.81	7.66	6.48	5.29	4.14	2.95
Piso falso	10.00	8.33	6.73	5.07	3.41	1.81	0.15
Pared	6.00	4.86	3.76	2.63	1.49	0.39	-0.75
Bevel Bottom	6.00	4.97	3.96	2.92	1.88	0.87	-0.17

Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS:

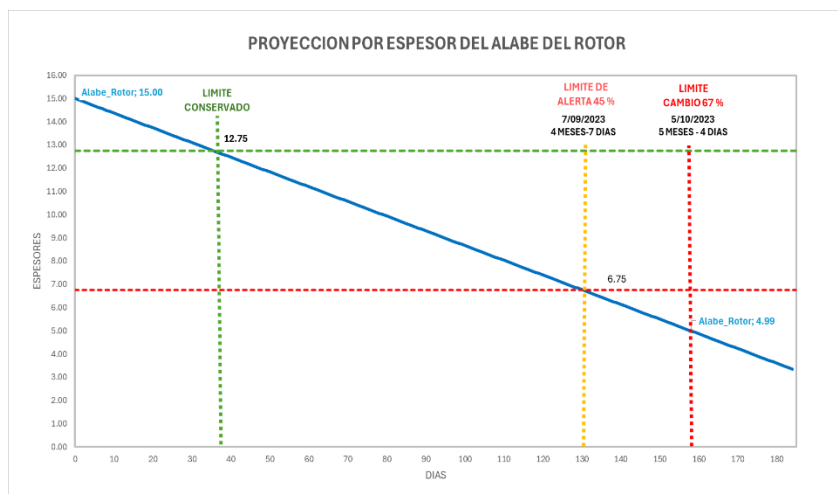
3.3.1. *Análisis del revestimiento del Alabe rotor*

Antecedentes de campaña:

- Fecha de instalación de revestimiento: 01-05-2023
- Fecha de inicio del monitoreo con ultrasonido: 02-05-2023
- Fecha límite de cambio (crítico) del revestimiento: 5-10-2023
- Fecha de término del monitoreo con ultrasonido: 31-10-2023
- Días de campaña: 184
- Días reales de campaña: 159
- Tonelaje procesado: 6.3 M-Tn
- Tonelaje real procesado: 5.4 M-Tn

Figura 56

Proyección por espesor “Alabe del Rotor” FTR001



Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

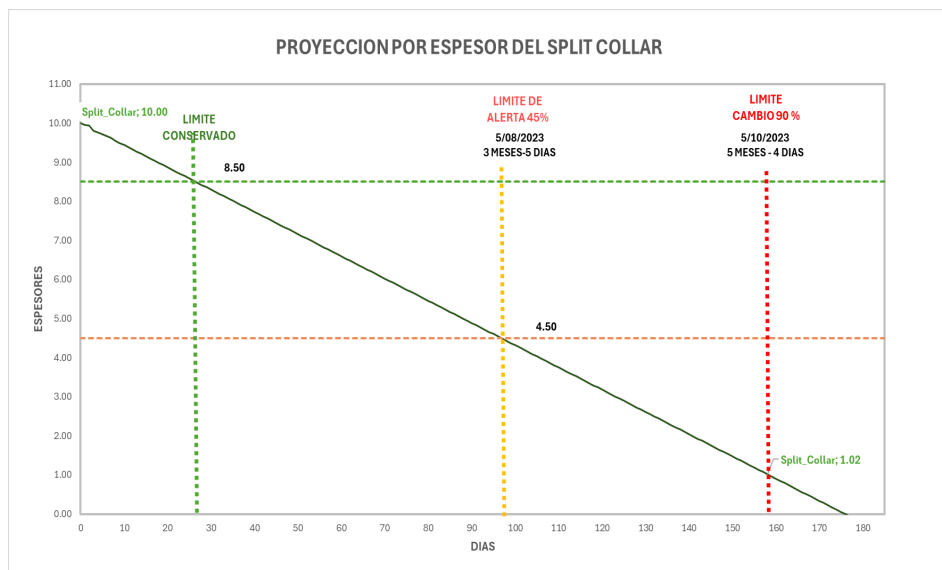
3.3.2. Análisis del revestimiento del Split Collar

Antecedentes de campaña:

- Fecha de instalación de revestimiento: 01-05-2023
- Fecha de inicio del monitoreo con ultrasonido: 02-05-2023
- Fecha límite de cambio (crítico) del revestimiento: 5-10-2023
- Fecha de término del monitoreo con ultrasonido: 31-10-2023
- Días de campaña: 184
- Días reales de campaña: 159
- Tonelaje procesado: 6.3 M-Tn
- Tonelaje real procesado: 5.4 M-Tn

Figura 57

Proyección por espesor "Split Collar" FTR001



Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

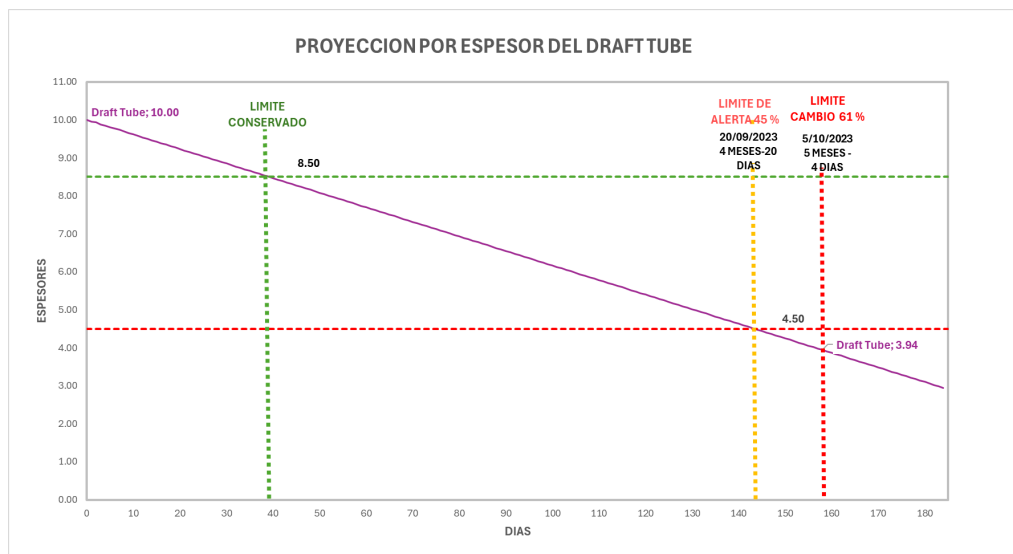
3.3.3. Análisis del revestimiento del Draft tube

Antecedentes de campaña:

- Fecha de instalación de revestimiento: 01-05-2023
- Fecha de inicio del monitoreo con ultrasonido: 02-05-2023
- Fecha límite de cambio (crítico) del revestimiento: 5-10-2023
- Fecha de término del monitoreo con ultrasonido: 31-10-2023
- Días de campaña: 184
- Días reales de campaña: 159
- Tonelaje procesado: 6.3 M-Tn
- Tonelaje real procesado: 5.4 M-Tn

Figura 58

Proyección por espesor "Draft Tube" FTR001



Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

3.3.4. Análisis del revestimiento del Piso falso

Antecedentes de campaña:

- Fecha de instalación de revestimiento: 01-05-2023
- Fecha de inicio del monitoreo con ultrasonido: 02-05-2023
- Fecha límite de cambio (crítico) del revestimiento: 5-10-2023
- Fecha de término del monitoreo con ultrasonido: 31-10-2023
- Días de campaña: 184
- Días reales de campaña: 159
- Tonelaje procesado: 6.3 M-Tn
- Tonelaje real procesado: 5.4 M-Tn

Figura 59

Proyección por espesor "Piso Falso" FTR001



Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

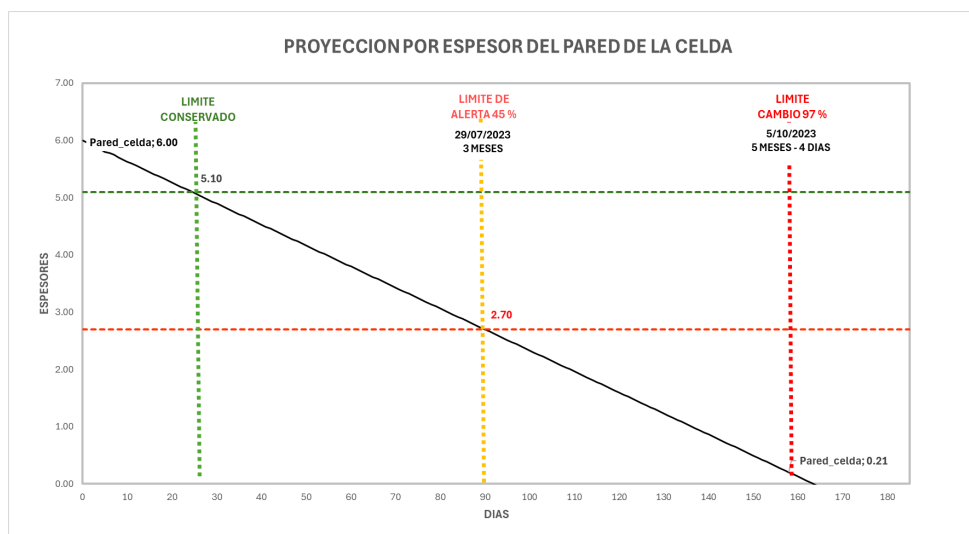
3.3.5. Análisis del revestimiento de la Pared -celda

Antecedentes de campaña:

- Fecha de instalación de revestimiento: 01-05-2023
- Fecha de inicio del monitoreo con ultrasonido: 02-05-2023
- Fecha límite de cambio (crítico) del revestimiento: 5-10-2023
- Fecha de término del monitoreo con ultrasonido: 31-10-2023
- Días de campaña: 184
- Días reales de campaña: 159
- Tonelaje procesado: 6.3 M-Tn
- Tonelaje real procesado: 5.4 M-Tn

Figura 60

Proyección por espesor “Pared de la celda” FTR001



Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

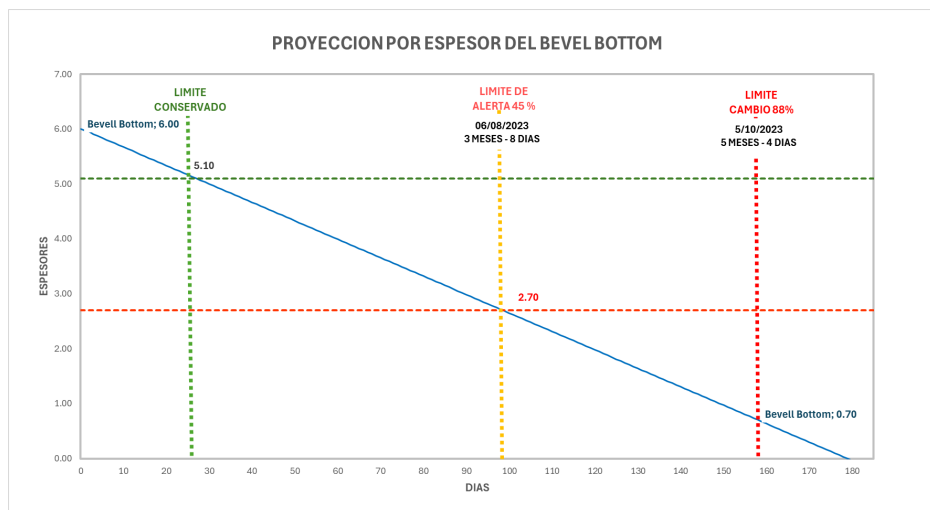
3.3.6. Análisis del revestimiento del Bevel Bottom

Antecedentes de campaña:

- Fecha de instalación de revestimiento: 01-05-2023
- Fecha de inicio del monitoreo con ultrasonido: 02-05-2023
- Fecha límite de cambio (crítico) del revestimiento: 5-10-2023
- Fecha de término del monitoreo con ultrasonido: 31-10-2023
- Días de campaña: 184
- Días reales de campaña: 159
- Tonelaje procesado: 6.3 M-Tn
- Tonelaje real procesado: 5.4 M-Tn

Figura 61

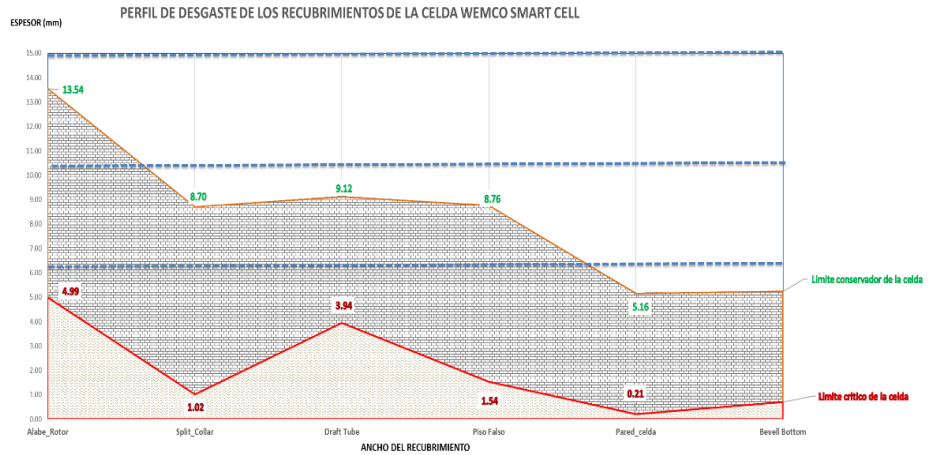
Proyección por espesor “Bevel Bottom” FTR001



Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

Figura 62

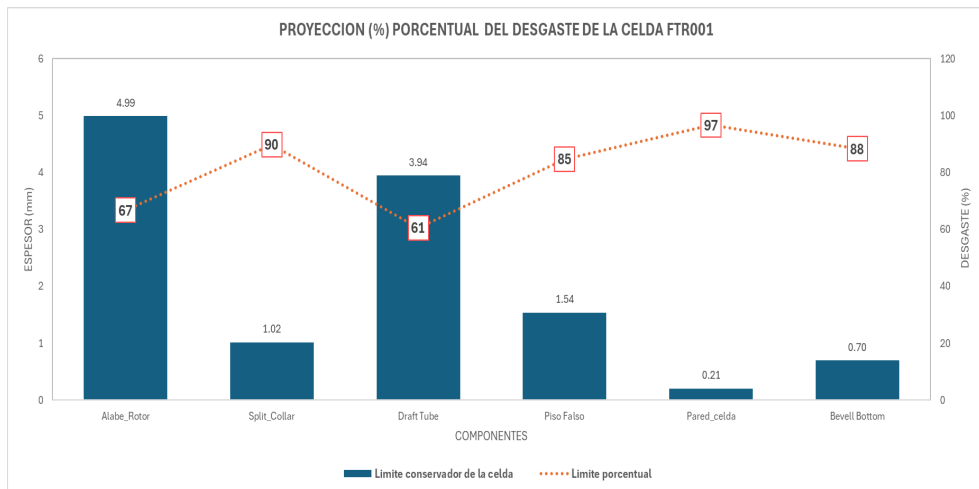
Perfil del desgaste de los recubrimientos de la celda WEMCO SMART CELL



Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

Figura 63

Proyección % porcentual del desgaste de la celda FTR001



Nota: Elaboración propia en base a datos de una fuente privada.

3.3.7. Análisis Estadístico con SPSS

1. Plantear las hipótesis

Ho: $p=0$ (No existe correlación)

Ha: $p \neq 0$ (Si existe correlación)

2. Nivel de Significancia

Confianza: 99.99 %

Significancia (Alfa): 0.01 %

3. Prueba estadística

Correlación de Pearson

Tabla 4

Alabe del Rotor

Correlaciones			
		Peso.mineral	Alabe.rotor
Peso.mineral	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	159	159

Nota: Adaptado con SPSS Statistics.

Tabla 5

Split Collar

Correlaciones			
		Peso.mineral	SplitCollar
Peso.mineral	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	159	159

Nota: Adaptado con SPSS Statistics.

Tabla 6*Draft Tube*

Correlaciones			
		Peso.mineral	DraftTube
Peso.mineral	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
N		159	159

Nota: Adaptado con SPSS Statistics.**Tabla 7***Piso Falso*

Correlaciones			
		Peso.mineral	PisoFalso
Peso.mineral	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
N		159	159

Nota: Adaptado con SPSS Statistics.**Tabla 8***Pared de la celda*

Correlaciones			
		Peso.mineral	Pared
Peso.mineral	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
N		159	159

Nota: Adaptado con SPSS Statistics.

Tabla 9

Bevel Bottom

Correlaciones			
		Peso.mineral	BevellBotom
Peso.mineral	Correlación de Pearson	1	-1,000**
	Sig. (bilateral)		,000
N		159	159

Nota: Adaptado con SPSS Statistics.

4. Regla de decisión

Si $p < 0.05$, aceptamos la hipótesis alterna (H_a) y rechazamos la hipótesis nula (H_0)

Si $p \geq 0.05$, rechazamos la hipótesis alterna (H_a) y aceptamos la hipótesis nula (H_0)

En este caso aceptamos la hipótesis alterna (H_a) y rechazamos la hipótesis nula (H_0).

5. Conclusiones

El nivel de significancia es menor o igual al 0.01, se considera que tiene un nivel de confianza del 99.99%, con un nivel de grado de correlación inversa negativa perfecta, muy significativa, es decir, la relación del peso del mineral y los espesores de los revestimientos son dos variables que tienen relación entre sí, quiere decir que, si el peso del mineral acumulado aumenta, el espesor disminuye por el desgaste que este produce sobre la superficie del revestimiento de los componentes.

CONCLUSIONES

En función de los objetivos planteados se llega a las siguientes conclusiones:

- En cada componente de la celda FTR001 MODELO WEMCO SMART CELL se encontró un límite crítico de los espesores y un porcentaje de desgaste en: alabe de rotor 4.99 mm con un 67 % de desgaste, Split collar 1.02 mm con un 90% de desgaste, draft tube 3.94 con un 61% de desgaste, piso falso 1.54 mm con de 85% de desgaste, pared de la celda 0.21mm con un 97 % de desgaste, Bevel Bottom 0.70 con un 88% de desgaste, y se concluye que el componente que presenta un mayor desgaste es en la pared de la celda con 97 % de desgaste y un límite crítico o de cambio de 0.21mm, por ende el periodo de desgaste de 6 meses disminuye a 5 meses y 4 días, quiere decir que en este periodo los revestimientos de la celda deberá ser cambiado.
- En la correlación del peso del mineral acumulado y los espesores restantes se concluye que el peso del mineral tiene una relación inversa perfecta con los espesores de los revestimientos, quiere decir que cuando aumenta el peso del mineral acumulado en el tiempo, el espesor de los revestimientos disminuye consecutivamente.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda al área de mantenimiento que se realice el cambio de inmediato en los revestimientos de caucho, para que no dañen la estructura de la celda de flotación FTR001 modelo WEMCO SMART CELL.
- Que se continúe con el diseño experimental, realizando pruebas con diferentes pesos de mineral y diferentes espesores nominales de caucho, para mejorar la eficiencia del proceso en la celda WEMCO SMART CELL
- Si fuera posible se cotice un cambio de proveedor de los revestimientos de la celda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hernandez-Aguilar, C., Dyakowski, T., Kraipech, W. & Nowakowski, A. (2017). Development of an ultrasonic technique for evaluating wear of flotation cell components. *Minerals Engineering*, 110, 95-102.
- Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D. & Kojovic, T. (1996). Mineral comminution circuits: Their operation and optimisation. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland.
- Ortiz, J. & Herrera, M. (2019). "Evaluación del desgaste en celdas de flotación mediante técnicas de ultrasonido en una planta concentradora de cobre". *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 22(43), 57-65.
- Quispe, E. & Valdivia, R. (2019). "Aplicación de termografía infrarroja para la evaluación del desgaste en celdas de flotación en una planta concentradora de zinc". *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 22(1), 41-48.
- Ramírez, F. & González, E. (2020). "Evaluación del desgaste en celdas de flotación mediante técnicas de ultrasonido en una planta

concentradora de cobre". *Revista Peruana de Ingeniería de Minas*, 21(2), 18-25.

Sivamohan, R. & Forssberg, E. (1985). A review of the flotation wear problem in mineral processing plants. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1(3), 145-165.

Wills, B. A. & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Elsevier Science & Technology Books.*

Zhao, Y., Qiu, Z., Yang, X. & Sun, Y. (2019). Ultrasonic detection of wear in flotation cell components. *Minerals Engineering*, 135, 38-46.