

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un equipo de recuperación de tuberías con hormigón fraguado

INGE-2539

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Nicolás Leonardo Mármol Valenzuela

Rosa Mishell Pilamonte Olmus

Guayaquil – Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi querida madre, Ángela del Carmen Valenzuela Chamaidan, quien ha sido mi pilar y fuente de fortaleza a lo largo de todo este camino. También lo dedico a mi abuelito, Leonardo Mármol, cuya pasión por las matemáticas y apoyo constante me han inspirado y guiado en mi carrera. Su influencia y amor han sido fundamentales en mi trayectoria.

Nicolás Mármol

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a mi madre Luz, una dama invaluable, por enseñarme a persistir en la vida y demostrarme con su ejemplo e infinito amor que una mujer fuerte jamás se doblega ante nada y a mi padre José, un hombre valioso, por darme su entrega y amor a manos llenas.

A mi pequeño E.B. por su cariño genuino y compañía fiel durante los últimos 10 años de mi vida.

Rosa Mishell Pilamonte

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres y hermanos, quienes siempre han velado por mí y me han brindado un apoyo incondicional. Gracias a su constante respaldo y a las herramientas que me han proporcionado, he podido avanzar hacia el cumplimiento de mis objetivos. Un agradecimiento especial va dirigido a mis abuelos, quienes siempre confiaron en mí y se sentirían muy orgullosos del profesional en el que me estoy convirtiendo. Su fe y apoyo han sido fundamentales en mi trayectoria.

Nicolás Mármol

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por ser mi sustento, mi motor e inspiración para no darme por vencida en el proceso de alcanzar mis metas, haberme educado con valores, fortaleza e independencia y así formar una mujer de bien y de valor para la sociedad.

A mi prestigiosa universidad ESPOL, porque fue el lugar en donde exploraré mis talentos y habilidades, además me permitió hacer realidad ese encuentro tan ansiado para mi vida personal durante el viaje del 2022; jamás se borrará de mi mente y mi corazón todas las lindas experiencias que viví y la persona especial que conocí.

Agradezco a Juan por apoyarme de corazón y desinteresadamente en esta etapa final de mi carrera.

Rosa Mishell Pilamonte

Declaración Expresa

Nosotros Nicolás Leonardo Mármol Valenzuela y Rosa Mishell Pilamonte Olmus acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, miércoles 15 de mayo del 2024.



Nicolás Leonardo
Mármol Valenzuela



Rosa Mishell Pilamonte
Olmus

Evaluadores

Ph.D Emérita Alexandra Delgado Plaza

Profesor de Materia

MSc. Ernesto Rolando Martínez

Lozano

Tutor de proyecto

Resumen

En esta tesis se diseñó un equipo para la limpieza del material fraguado en el interior de las tuberías de las bombas hormigoneras, utilizando un software de modelado 3D. El objetivo principal es realizar la limpieza de las tuberías sin comprometer su integridad, reduciendo al mismo tiempo el impacto ambiental y los costos asociados con la reposición del material. La investigación comparó un sistema mecánico, que se basa en la extracción del material mediante taladrado y un equipo de mantenimiento sencillo, con una alternativa basada en tecnología ultrasónica. En el caso de la tecnología ultrasónica, se investigó la frecuencia más eficiente para romper el hormigón y se diseñó un sistema para facilitar el izaje de las tuberías. Los resultados demostraron que la tecnología ultrasónica es más rentable y eficaz que el sistema mecánico. Además, esta tecnología no solo mejora la eficiencia del proceso de limpieza, sino que también reduce los riesgos y la fatiga de los operadores.

Palabras Clave: hormigón fraguado, tuberías de bombas hormigoneras, taladrado, limpieza ultrasónica

Abstract

In this thesis, a system was designed for cleaning cured material inside the pipes of concrete pumps, utilizing 3D modeling software. The primary objective is to clean the pipes without compromising their integrity, while also reducing environmental impact and the costs associated with material replacement. The research compared a mechanical system, which focuses on material extraction through drilling using equipment with simple maintenance, with an ultrasonic technology alternative. For the ultrasonic technology, the research determined the most efficient frequency to break the concrete and designed a system to facilitate the lifting of the pipes. The results demonstrated that the ultrasonic technology is more cost-effective and efficient than the mechanical system. Furthermore, this technology not only enhances cleaning efficiency but also reduces risks and operator fatigue.this section.

Keywords: *cured concrete, concrete mixer pump pipes, drilling, ultrasonic cleaning*

Índice General

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice General	III
Abreviaturas	VII
Simbología	VIII
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XI
Índice de Planos	XII
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1. Descripción del Problema.....	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Marco teórico.....	5
1.4.1. Propiedades del hormigón	7
1.4.2. Densidad del hormigón	8
1.4.3. Tiempo de fraguado	9
1.4.4. Resistencia y su relación con tiempo de fraguado del hormigón	9
1.4.5. Tipos de hormigón más utilizados	11
1.4.6. Tipos de bombas de hormigón	12
1.4.7. Mecanismos actuales de remoción de residuos.....	13
1.4.7.1. Taladrado de hormigón.....	13
1.4.7.2. Broca porta-insertos acoplada.....	13
1.4.7.3. Máquina extractora de núcleo.....	14

1.4.7.4.	Limpieza ultrasónica.....	15
1.4.7.5.	Roscado.....	19
1.4.7.6.	Broca copa diamantada para hormigón.....	22
1.4.7.7.	Brocas tricónicas.....	23
Capítulo 2	24
2.	Metodología	25
2.1.	Diseño 1 del equipo con sistema mecánico.....	26
2.1.1.	Requerimientos del diseño	27
2.1.2.	Factores de influencia.....	27
2.1.3.	Criterios de selección	28
2.1.4.	Matriz de ponderación.....	29
2.1.5.	Alternativas de solución	30
2.1.5.1.	Alternativa 1.....	30
2.1.5.2.	Alternativa 2.....	30
2.1.6.	Matriz de decisión	31
2.1.7.	Diseño de forma	31
2.1.8.	Material	35
2.1.9.	Modelo matemático.....	35
2.1.10.	Cálculo de esfuerzos de la broca	36
2.1.10.1.	Área de corte (A_c).....	36
2.1.10.2.	Resistencia al corte (σ_c).....	36
2.1.10.3.	Fuerza de corte (F).....	37
2.1.10.4.	Torque (T).....	37
2.1.10.5.	Potencia del motor (W).....	37
2.1.10.6.	Tensión de Von Mises (σ_{vm}).....	37
2.1.10.7.	Momento de Inercia (J).....	37
2.1.10.8.	Tensiones debido al torque (τ_t).....	37

2.1.10.9.	Esfuerzo de Von Mises (σ_{vm}).	38
2.1.10.10.	Velocidad de corte.	38
2.1.11.	Cálculo de paso para tornillo sin fin.	38
2.1.11.1.	Flujo másico.	38
2.1.11.2.	Flujo volumétrico.	38
2.1.11.3.	Paso de hélice del sin-fin.	38
2.1.12.	Simulación.	39
2.2.	Diseño 2 del equipo empleando tecnología ultrasónica	41
2.2.1.	Requerimientos y limitaciones para el diseño 2	41
2.2.2.	Alternativas de solución del Diseño 2	43
2.2.3.	Diseño conceptual del diseño 2	46
2.2.3.1.	Diseño de forma inicial.	46
2.2.3.2.	Rediseño de forma.	47
2.2.4.	Componentes mecánicos y selección de materiales para diseño 2	49
2.2.5.	Ecuaciones para diseño 2 del equipo y su metodología de cálculo.	56
Capítulo 3		63
3.	Resultados y análisis	64
3.1.	Resultados del diseño 1 del equipo mecánico	64
3.1.1.	Resultados de simulación	64
3.1.2.	Esfuerzo de Von Mises del equipo.	65
3.1.3.	Deformación.	66
3.1.4.	Factor de Seguridad.	67
3.1.5.	Análisis de resultados.	70
3.1.6.	Evaluación Estructural	71
3.2.	Resultados del diseño 2 del equipo empleando tecnología ultrasónica.	72
3.2.1.	Diseño mecánico de los componentes del diseño 2 del equipo.	72
3.2.2.	Análisis de costos del diseño 2.	78

3.2.3.	Ecuaciones metodológicas aplicadas	79
3.2.4.	Plan de limpieza post operacional y reutilización de escombros del diseño 2.....	80
3.2.4.1.	Tratamiento post operacional para las tuberías recuperadas.....	80
3.2.4.2.	Reutilización de escombros resultantes de la limpieza ultrasónica.	82
Capítulo 4	84
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	85
4.1.	Diseño 1 del equipo empleando un sistema mecánico	85
4.1.1.	Conclusiones	85
4.1.2.	Recomendaciones.....	85
4.2.	Diseño 2 del equipo empleando tecnología ultrasónica	86
4.2.1.	Conclusiones	86
4.2.2.	Recomendaciones.....	87
4.3.	Conclusión y Recomendación General.....	88
4.3.1.	Conclusión General	88
4.3.2.	Recomendación General	88
Referencias Bibliográficas	89
Apéndices	94

Abreviaturas

ASTM American Society for Testing and Materials

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

Simbología

Hp	Caballos de fuerza
h	horas
Hz	Hertz
kg	Kilogramos
l	Litros
m	Metros
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetros
mm ³	Milímetros cúbicos
RPM	Revoluciones por minuto
V	Voltaje
s	Segundos
W	Watts
Q	Caudal
Wh	Watts/horas

Índice de Figuras

Figura 1.1 Componentes importantes del Cemento Portland para hormigón	8
Figura 1.2 Cementos recomendados en determinadas circunstancias de hormigón	8
Figura 1.3 Relación entre resistencia y relación agua/cemento del hormigón.....	10
Figura 1.4 Relación agua/cemento para alcanzar distintas resistencias a compresión	10
Figura 1.5 Propiedades del hormigón	11
Figura 1.6 Extractor de núcleos, marca Hilti	15
Figura 1.7 Sentido de oscilación de las partículas y Dirección de propagación.....	17
Figura 1.8 Transmisión de onda longitudinal y transversal	17
Figura 1.9 Características de las ondas transversales.....	17
Figura 1.10 Esquema del método de Inmersión.....	18
Figura 1.11 Máquina perforadora con roscadora	20
Figura 1.12 Herramienta raspadora TETRA AdvanceClean	21
Figura 1.13 Set de brocas copa diamantada y brocas guías	22
Figura 1.14 Broca tricónica.....	23
Figura 2.1 Flujograma metodológico general	26
Figura 2.2 Parámetros de calificación	29
Figura 2.3 Diseño del equipo de limpieza de tuberías con hormigón.....	32
Figura 2.4 Diseño del equipo de limpieza de tuberías con hormigón.....	32
Figura 2.5 Especificaciones del acero a utilizar en la simulación.....	39
Figura 2.6 Mallado para análisis por método de elementos finitos.....	41
Figura 2.7 Boceto inicial del equipo de recuperación de tuberías con hormigón fraguado	47
Figura 2.8 Boceto corregido del equipo de recuperación de tuberías con hormigón fraguado ...	48
Figura 2.9 Modelo de tanque de fibra de vidrio referencial para inmersión.....	50
Figura 2.10 Transductor de inmersión ultrasónica de alta potencia tipo placa.....	52
Figura 2.11 Componentes del transductor tipo placa.....	52
Figura 2.12 Generador ultrasónico de alta potencia.....	54

Figura 2.13 Catálogo de detergentes ultrasónicos.....	55
Figura 2.14 Representación de las Fuerzas impulsiva y convectiva para tanques y piscinas rectangulares.....	59
Figura 2.15 Modelo dinámico equivalente Masa-Resorte	60
Figura 2.16 Fuerza impulsiva y fuerza convectiva de un líquido	60
Figura 3.1 Esfuerzo de Von Mises de equipo	65
Figura 3.2 Esfuerzo de Deformación de equipo.....	66
Figura 3.3 Esfuerzo de Factor de Seguridad del equipo	67
Figura 3.4 Diseño inicial del equipo de recuperación de tubería con sus componentes.....	73
Figura 3.5 Rediseño del tanque de inmersión con fibra de vidrio	74
Figura 3.6 Tanque de fibra de vidrio con sus elementos interiores	74
Figura 3.7 Base estructural de acero con garruchas para colocar el tanque de inmersión.....	75
Figura 3.8 Vista inferior del equipo con su base estructural de acero	75
Figura 3.9 Diseño del equipo de recuperación con tecnología ultrasónica.....	76
Figura 3.10 Vista previa ilustrativa del video de Cavitación Ultrasónica.....	77

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Tipos de hormigón según la resistencia, tiempo de fraguado y generalidades	12
Tabla 2.1 Factores de influencia	27
Tabla 2.3 Criterios de selección	28
Tabla 2.4 Comparación por pares	29
Tabla 2.5 Comparación por pares	30
Tabla 2.6 Matriz de decisión	31
Tabla 2.7 Componentes de la alternativa 1	33
Tabla 2.8 Componentes de la alternativa 2	34
Tabla 2.9 Especificaciones del acero a utilizar	35
Tabla 2.10 Especificaciones del acero a utilizar en la simulación	40
Tabla 2.11 Cargas a las que se encuentra sometida la estructura.....	40
Tabla 2.12 Requerimientos para el diseño 2 del equipo	42
Tabla 2.13 Niveles de satisfacción para cada criterio	45
Tabla 2.14 Matriz de decisión de las tres alternativas del diseño 2	46
Tabla 2.15 Caracterización del tanque de inmersión	50
Tabla 2.16 Caracterización de la base estructural del tanque	51
Tabla 2.17 Caracterización de transductor ultrasónico aplicable al diseño	51
Tabla 2.18 Caracterización de la herramienta de izaje.....	53
Tabla 2.19 Caracterización del generador ultrasónico aplicable al diseño	54
Tabla 2.20 Atributos del agente limpiador aplicable al equipo ultrasónico.....	56
Tabla 3.1 Resultados del programa de simulación.....	68
Tabla 3.2 Resultados de los cálculos teóricos	69
Tabla 3.3 Resultados de los esfuerzos teóricos y modelados.....	70
Tabla 3.4 Resultados de las ecuaciones metodológicas del diseño.....	79

Índice de Planos

- PLANO 1 Plano acotado de las partes del equipo del diseño mecánico (Diseño 1)
- PLANO 2 Plano vista explotada y lista de elementos del equipo del diseño mecánico (Diseño 1)
- PLANO 3 Plano vista explotada del equipo de recuperación empleando tecnología ultrasónica (Diseño 2)

Capítulo 1

1. Introducción

La limpieza de hormigón fraguado en tuberías metálicas utilizadas en el bombeo de hormigón es un proceso existente que se realiza por métodos varios según la elección del personal de mantenimiento, disponibilidad de recursos y dependiendo de la eficiencia de los sistemas de bombeo que se ha utilizado en la operación. El método más conocido de limpieza se realiza con una esponja que barre el recorrido de las tuberías al final de cada operación, sin embargo, el tiempo de demoras en la limpieza puede resultar en hormigón fraguado dentro del sistema de tuberías. El hormigón mencionado se vuelve extremadamente rígido y adherente en las tuberías conforme pasa el tiempo, lo que puede causar severos taponamientos en el sistema de bombeo.

El reto durante toda la operación de las bombas hormigoneras es cumplir el tiempo preciso para prevenir el fraguado del hormigón, porque una vez que las tuberías han sufrido de este fenómeno, no queda más que interrumpir las operaciones de bombeo, daños en las tuberías por métodos de limpieza agresivos o incrementar los costos de mantenimiento y reparación.

Cuando el fraguado ha ocurrido, se requiere reemplazar los tubos afectados o adquirir un nuevo sistema de tuberías, pero, instaurar un equipo eficiente que garantice la recuperación de estas tuberías, una solución viable y económica para diseñar. También hay que considerar buenas prácticas con las tuberías recuperadas, como su limpieza adecuada y regular para prevenir la acumulación de residuos de hormigón.

1.1. Descripción del Problema

El caso especial de tuberías obstruidas por hormigón fraguado es una contrariedad que surge cuando se sobrepasa el tiempo de fraguado del tipo de hormigón dentro de los tubos de la bomba hormigonera, pluma. Entre las causas más frecuentes que ocasionan el fraguado en mención se contemplan inconvenientes tales como demora en la hora de llegada del vehículo mezclador a la zona de trabajo por percances en el trayecto, daños inesperados de cierto elemento

de la bomba pluma o la falta del aditivo químico que ralentice el proceso del fraguado cuando existen demoras inesperadas, así mismo, en algunas empresas clientes del servicio de bombas hormigoneras no se autoriza la limpieza inmediata de la bomba y los tubos. Todas estas causas resultan en la obstrucción de la tubería por fraguado de hormigón, por lo que nace el interés de rehabilitar estas tuberías solucionando la problemática.

Al reutilizar los tubos rehabilitados se reduce los costos por reemplazo, se optimiza la productividad del sector de la construcción, mejoría en el manejo de residuos de hormigón, incremento en la competitividad de la empresa que brinda el mantenimiento al sistema de tuberías. Adquirir un equipo como el que se pretende diseñar, la empresa ERMARLO S.A., contará con la optimización para su servicio de mantenimiento en las industrias cementeras y hormigoneras.

1.2. Justificación

El fraguado y endurecimiento del hormigón, es el resultado de reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento. La fase inicial de hidratación se llama fraguado y se caracteriza por el paso del estado de la pasta al estado sólido, lo que es verificable por simple inspección de forma sencilla al presionar con el dedo sobre la superficie del hormigón.

Cuando la temperatura es muy alta, el proceso de fraguado se inicia muy rápidamente, ya que se produce una desecación acelerada de la mezcla, lo que puede llevar a pérdidas de resistencia, fisuración y un alto grado de retracción. Para evitar estos fenómenos, puede refrescarse con escamas de hielo en el interior de la mezcla, almacenar el árido sin soleamiento directo o cubrir las superficies, preferiblemente permitiendo una buena ventilación de las superficies protegidas. Además, por norma, no debe hormigonarse por encima de 35 grados centígrados. (Escuela Técnica Obrero Argentina, pp 1-3)

Cuando no se puede utilizar una tubería obstruida por hormigón fraguado resulta indispensable buscar un reemplazo de los tubos, modificarlos o recurrir a un método de recuperación de las tuberías por ser una opción económica.

Retirar el hormigón fraguado dentro de los tubos reflejará la aplicación de un método efectivo donde el equipo retire la totalidad del hormigón sin comprometer la estructura de la tubería, ni emanar contaminación por partículas diminutas hacia los operadores o desperdicio de agua. Actualmente, el cliente ERMARLO S.A. realiza el mantenimiento de estas tuberías con herramientas que le llevan mayor tiempo, siendo tedioso para los operadores encargados. Las tuberías utilizadas en el bombeo de hormigón tienen 5 pulgadas de diámetro y 3 metros de largo que al obstruirse pueden formar una columna de hormigón de 34 kg de escombros generados, por lo que es muy indispensable su tratamiento posterior a la limpieza, es decir, contar con un plan de reutilización de los escombros en beneficio del medio ambiente.

La propuesta para el tratamiento de escombros se plantea desarrollar en dos formas:

- Enviar los escombros hacia un centro de acopio para desechos de construcción, contemplando los costos por movilización.
- Negociar el desalojo de escombros con las hormigoneras a las que se realiza el servicio de limpieza, para su reutilización como agregado.

Del mismo modo, la construcción de canaletas alrededor del área de limpieza permitirá recolectar el agua que se usará durante todo el proceso de limpieza de las tuberías de hormigón, posterior a ello enviarla hacia un sedimentador que separe los restos de hormigón y se reutilice el agua en próximas limpiezas.

Por estos antecedentes, en este proyecto se propone el diseño de un equipo que desintegre el fraguado de hormigón, opere precautelando la integridad de las tuberías metálicas en el menor tiempo posible, la seguridad del operador y la responsabilidad con cuidado del medio ambiente. El diseño de un prototipo de limpieza para las tuberías representará para el cliente ERMARLO SA, la herramienta que le facilite el mantenimiento brindando un servicio de calidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un equipo capaz de desobstruir tuberías de impulsión con hormigón fraguado para rehabilitarlas mediante un método de remoción de residuos.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Discriminar alternativas de diseño que se ajusten a las especificaciones del cliente en relación con el tiempo máximo de limpieza, costo de construcción y facilidad del operador.
2. Modelar la operación del equipo mediante el uso de softwares de diseño y simulación para representar sus componentes, determinación de esfuerzos y deformaciones del equipo.
3. Desarrollo de un documento matriz donde se contemplen especificaciones técnicas del funcionamiento del equipo, mantenibilidad y costos de construcción.

1.4. Marco teórico

El hormigón, también conocido como concreto en algunos lugares, es un material fundamental en la ingeniería civil y la construcción debido a sus propiedades únicas que lo hacen versátil y duradero. Según (Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D., 2003), el hormigón es "una mezcla de agregados pétreos, aglutinante hidráulico y agua, que después de cierto tiempo de fraguado adquiere una resistencia que le permite ser utilizado en construcción".

Las propiedades del hormigón están determinadas por su composición y por el proceso de fraguado y endurecimiento. Como señala (Neville, 1996), "las propiedades del hormigón endurecido

dependen de la proporción de los ingredientes, de su naturaleza, del tamaño y distribución de los agregados, de la cantidad de agua y del procedimiento de fabricación".

Entre las propiedades más destacadas del hormigón se encuentran su resistencia a compresión, su durabilidad frente a condiciones ambientales adversas, su capacidad de aislamiento acústico y térmico, así como su versatilidad para adoptar diversas formas y tamaños según las necesidades del diseño estructural (Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D., 2003).

El estudio continuo de estas propiedades y el desarrollo de nuevas técnicas y aditivos permiten mejorar constantemente las características del hormigón, ampliando así sus aplicaciones en la construcción moderna.

Los equipos de bombeo de hormigón son indispensables en la distribución de este, permitiendo el transporte eficiente y la colocación precisa del hormigón en obras de gran envergadura. Según (Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C., 2002), "el bombeo de hormigón es esencial para la colocación eficiente del hormigón en ubicaciones inaccesibles o difíciles de alcanzar por medio de métodos convencionales de colocación"

Existen dos tipos principales de equipos de bombeo de hormigón: las bombas estacionarias y las bombas montadas en camión. Las bombas estacionarias son utilizadas principalmente en proyectos de construcción de gran altura o de gran volumen, donde se requiere un bombeo continuo y constante desde un solo punto fijo (ACI304, 2017).

Por otro lado, las bombas montadas en camión ofrecen mayor movilidad y flexibilidad, permitiendo la colocación del hormigón en múltiples ubicaciones dentro de un sitio de construcción (ACI304, 2017).

La tecnología y diseño de estos equipos han evolucionado significativamente, mejorando la eficiencia operativa y la seguridad durante su uso. Según (ACI304, 2017), "los avances en la tecnología de bombeo de hormigón han permitido aumentar la distancia de bombeo, mejorar el control del flujo de hormigón y reducir el desgaste de las partes móviles, aumentando así la productividad y la confiabilidad del proceso de colocación" (ACI304, 2017).

Las bombas de hormigón, esenciales en la construcción, se componen principalmente de:

1. **Sistema de bombeo:** Utiliza pistones, émbolos o tornillos para mover el hormigón desde la bomba hasta la manguera de entrega.
2. **Mangueras de entrega:** Transportan el hormigón hacia el lugar de colocación, resistiendo la presión y el desgaste.
3. **Sistema de control y operación:** Permite regular la velocidad y dirección del flujo del hormigón para una colocación precisa.
4. **Motor o fuente de energía:** Proporciona la potencia necesaria, siendo diésel o eléctrico según la bomba.
5. **Componentes de seguridad y accesorios:** Incluyen válvulas de seguridad, alarmas y dispositivos de emergencia para protección.

1.4.1. Propiedades del hormigón

De acuerdo con (Alberto, 1955), el hormigón o también denominado concreto, es el resultado de la mezcla de cemento, agua, agregados y aditivos. La resistencia y las propiedades varían según la proporción de ingredientes añadidos a la mezcla; esta dosificación afecta de manera directa la retracción hidráulica el hormigón (Figura 1.1).

Por otro lado, las propiedades están sujetas a modificarse dependiendo de algunos factores importantes del propio hormigón o ambientales, por ejemplo, la resistencia a compresión simple

del hormigón, la influencia de temperatura ambiente durante la elaboración del hormigón, el método de la puesta en obra del hormigón y el aditivo que se añade a la mezcla en el caso de haber retrasos y permita retardar el fraguado. Así mismo, la temperatura de los climas cálidos demanda emplear mayor cantidad de agua lo que significa que se modificará la consistencia de la mezcla de hormigón en base a la cantidad que se añada (Figura 1.2), también la temperatura repercute en la velocidad del agua al ser absorbida y en el rozamiento de los elementos áridos de la mezcla internamente.

Figura 1.1

Componentes importantes del Cemento Portland para hormigón

<i>Name of compound</i>	<i>Oxide composition</i>	<i>Abbreviation</i>
Tricalcium silicate	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Dicalcium silicate	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Tricalcium aluminate	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetracalcium aluminoferrite	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Figura 1.2

Cementos recomendados en determinadas circunstancias de hormigón

CIRCUNSTANCIA DEL HORMIGONADO	CEMENTOS RECOMENDADOS
Hormigonado en tiempo frío	Los cementos comunes tipo CEM I, CEM II/A y CEM IV/A.
Hormigonado en ambientes secos y sometidos al viento y, en general, en condiciones que favorecen la desecación del hormigón	Cementos comunes tipo CEM I y CEM II/A.
Insolación fuerte u hormigonado en tiempo caluroso	Los cementos comunes tipo CEM II, CEM III/A, CEM IV/A y CEM V/A.

1.4.2. Densidad del hormigón

La densidad del hormigón, que representa su masa por unidad de volumen, varía típicamente entre 2240 kg/m^3 y 2560 kg/m^3 para hormigón fresco, dependiendo de los materiales

utilizados (Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M., 2012). Durante el proceso de fraguado y endurecimiento, esta densidad puede incrementarse debido a la compactación interna y la eliminación del aire atrapado en la mezcla.

Hormigones especiales, como el hormigón pesado, pueden tener densidades aún mayores para cumplir con requisitos específicos de diseño, como la protección contra la radiación en aplicaciones industriales y nucleares.

1.4.3. Tiempo de fraguado

El tiempo promedio para que el hormigón empiece a fraguar es de 2 horas aproximadamente, pero este tiempo de fraguado puede ser mayor o menor según se requiera, mediante el uso de aditivos. El hormigón tiene una curva exponencial en una gráfica de resistencia (en MPa) vs tiempo, por lo que es imperativo que el tiempo de reacción entre que: la tubería sufre el taponamiento y se empieza con la remoción del material, sea el menor posible.

1.4.4. Resistencia y su relación con tiempo de fraguado del hormigón

La resistencia temprana del hormigón es ideal cuando al menos el 50 por ciento de las partículas se encuentran entre 3 y 30 μm , por consiguiente existirán menos partículas tan finas o gruesas. Una proporción aún mayor de partículas con un rango de 3 a 30 μm , hasta el 95 por ciento de estas partículas van a conducir a una mejoría de la resistencia temprana como la final del hormigón al volverse cemento.

La importancia de conocer la resistencia mecánica del hormigón radica por su uso en el cálculo estructural, dado que si el hormigón es preparado en obra tendrá resistencias relativamente bajas por lo que se requiere escoger un valor bajo de resistencia característica. Por el contrario, si el hormigón se prepara previamente por una empresa y es movilizadado en las bombas pluma, el hormigón tendrá consistencia más homogénea, por ende, mayor garantía en su resistencia. En este caso se tiene mayor confiabilidad de escoger un valor más alto de resistencia característica. Es

indispensable conocer cuál es la relación agua/cemento (Figura 1.4), porque la resistencia del hormigón es proporcional a esta relación como se establece en la Figura 1.3.

Figura 1.3

Relación entre resistencia y relación agua/cemento del hormigón

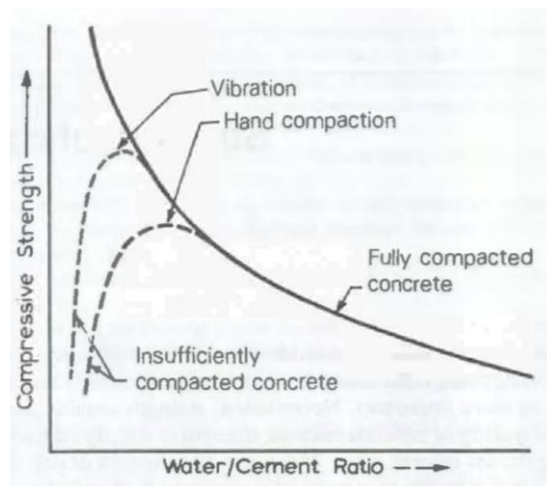


Figura 1.4

Relación agua/cemento para alcanzar distintas resistencias a compresión

Resistencia a compresión a 28 días (N/mm ²)	Relación a/c	
	Hormigón sin aire incorporado	Hormigón con aireante
45	0,38	—
40	0,43	—
35	0,48	0,40
30	0,55	0,46
25	0,62	0,53
20	0,70	0,61
15	0,80	0,71

El tiempo inicial del hormigón se expresa como el tiempo que transcurre desde que se añadió del agua de mezcla al cemento, el mínimo tiempo es de 60 minutos para cementos con concentraciones de 42.5MPa, 60 minutos para concentraciones de 52.5 MPa y 45 minutos para cementos con concentraciones mayores; es importante mencionar que el Estándar americano ASTM C150-09 establece correcciones según lo amerite. El tiempo final refiere desde que se agrega agua de mezcla al cemento.

$$Tf = 90 + 1.2 * Ti \quad (1.1)$$

Tf: tiempo final de corrección (min)

Ti: tiempo inicial de corrección (min)

La temperatura y la humedad del aire circundante son factores que influyen en el ajuste del cemento, por lo que la ecuación antes descrita se aplica considerando los siguientes parámetros:

- Temperatura: $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Humedad relativa: 65 %

1.4.5. Tipos de hormigón más utilizados

De acuerdo con las normativas y guías de diseño estructural de (ACI-318, 2014), existen nomenclaturas para clasificar los tipos de hormigones de acuerdo a su resistencia mínima en MPa.

- **Hormigón 420:** Se refiere a que tiene una resistencia de 420 kg/cm².
- **Hormigón 350:** Se refiere a que tiene una resistencia de 350 kg/cm².
- **Hormigón 280:** Se refiere a que tiene una resistencia de 280 kg/cm².

A continuación, se detallan las propiedades de los hormigones mencionados a 1 día de curado (Figura 1.5) y se establece sus generalidades de acuerdo con el tipo de hormigón detalladas en la Tabla 1.1.

Figura 1.5

Propiedades del hormigón

Planta:		RMX San Eduardo		Fecha:		2024-06-07	
Cliente:		ERMARLO S.A.		Obra:		Laboratorio	
Tipo de Hormigón	Edad	Diámetro	Carga Máxima	Resistencia	Promedio		Tiempo fraguado
	[días]	[mm]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[kg/cm ²]	[Horas]
420	1	100	100,3	12,8	12,2	124,3	6
420		100	91,1	11,6			
350	1	100	65,0	8,3	8,1	82,5	7
350		100	62,1	7,9			
280	1	100	50,2	6,4	6,6	67,1	7
280		100	53,1	6,8			

Tabla 1.1

Tipos de hormigón según la resistencia, tiempo de fraguado y generalidades

Tipos de Hormigón	Resistencia [MPa]	Tiempo de fraguado [minutos]	Generalidades
Hormigón de resistencia normal	10 a 40	30 a 90	Composición de cemento, agua y áridos.
Hormigón simple	19 a 50	30 a 45	Construcción de edificios y pavimentos.
Hormigón de alta resistencia	40 a 100	60 a 240	Reducción de relación agua-cemento.
Hormigón de áridos ligeros	0.3 a 40	30 a 60	Capacidad aislante para mejorar el confort térmico y acústico de edificios.

1.4.6. Tipos de bombas de hormigón

Bombas estacionarias. Estas bombas llegan al lugar de trabajo mediante camiones de arrastre, se fijan en un lugar y utilizan tuberías para transportar el hormigón hasta el punto de trabajo. Son ideales para construcciones de gran altura o lugares de difícil acceso.

Bombas plumas o autobombas. Bombas montadas en camiones y equipadas con una pluma que puede extenderse para alcanzar áreas específicas. Son más móviles y se utilizan en proyectos donde la flexibilidad es crucial.

Componentes de las bombas. La bomba es el mecanismo que impulsa el hormigón a través de las tuberías, estas en conjunto con las mangueras son canales a través de los cuales el hormigón es transportado desde la tolva de la bomba hasta el punto de colocación. Pluma corresponde al brazo articulado que permite acceder a lugares más lejanos.

1.4.7. Mecanismos actuales de remoción de residuos

1.4.7.1. Taladrado de hormigón.

El barrenado de hormigón es un proceso de perforación utilizado para crear agujeros precisos en estructuras de concreto. Este método emplea herramientas especializadas, como taladros de diamante, para atravesar el hormigón de manera eficiente y con alta precisión. El barrenado se utiliza comúnmente en una variedad de aplicaciones, tales como:

- **Instalación de anclajes y pernos:** Crear agujeros para fijar estructuras metálicas o maquinaria pesada.
- **Pasaje de tuberías y cables:** Permitir la instalación de sistemas eléctricos, de fontanería y HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) a través de muros y suelos de concreto.
- **Muestras para análisis:** Extraer núcleos de concreto para realizar pruebas de resistencia y calidad del material.
- **Creación de aberturas:** Formar huecos para puertas, ventanas, conductos de ventilación y otros elementos arquitectónicos en edificios.

1.4.7.2. Broca porta-insertos acoplada.

Con base en este proceso, se busca diseñar un eje con punta desmontable, para facilidad de cambio porque es un material de desgaste y un método para desalojar el hormigón. Dado que los ejes más grandes comercializados en el país son de 2 pulgadas se tiene las siguientes alternativas de solución:

- Insertos del extremo de la broca, con mayor longitud para aumentar la longitud de corte.
- Fabricar broca con proveedor local.

El material por utilizar es un acero anti-abrasivo para alargar la vida útil de las cuchillas.

1.4.7.3. Máquina extractora de núcleo.

Las máquinas extractoras de núcleos de diamante son equipos especializados utilizados en ingeniería civil y geotécnica para la extracción de muestras cilíndricas de materiales como hormigón, asfalto, rocas y suelos.

Estas muestras se extraen para análisis de laboratorio que permiten evaluar propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales.

Las características principales de una máquina extractora de núcleos de diamante incluyen:

1. **Corona de diamante:** Es el componente principal que corta y extrae el núcleo del material. Las coronas de diamante están diseñadas con segmentos de diamante industrial que garantizan un corte preciso y eficiente.
2. **Mandril de sujeción:** Es el mecanismo que sostiene la corona de diamante y facilita su rotación durante el proceso de extracción.
3. **Sistema de perforación:** Incluye motores eléctricos o hidráulicos que proporcionan la energía necesaria para la rotación y avance de la corona de diamante a través del material.
4. **Sistema de refrigeración:** Algunas máquinas están equipadas con sistemas de agua o lubricación para enfriar la corona de diamante y evitar el sobrecalentamiento durante la perforación.
5. **Control de velocidad y profundidad:** Permite ajustar la velocidad de perforación y la profundidad del núcleo extraído, adaptándose a las características del material y los requisitos del proyecto.

Figura 1.6

Extractor de núcleos, marca Hilti



Nota: Extraído de: (HILTI, 2024)

1.4.7.4.Limpieza ultrasónica.

Las ondas ultrasónicas son ondas acústicas que puede ser de naturaleza elástica o mecánica igual a las ondas sónicas. De acuerdo con sus rangos de frecuencia se clasifican tres bandas de ondas, las ondas reciben el nombre de ultrasónicas cuando sobrepasan el límite superior del rango audible de un ser humano considerando más de 20 kHz. Según (Zariefeh, 2013, pág. 44) " Las ondas con frecuencias entre 20 y 100 KHz, que es la zona en que operan las técnicas utilizan elevados niveles de energía. Un ejemplo son los sistemas de limpieza, agitación y, en general, cavitación". Por otro lado, las ondas por debajo de los 20 Hz se llaman Infrasonicas y no son aplicables en el control de ningún tipo de material estructural, puesto que, la técnica de ultrasonido es empleada para Ensayos no destructivos en el estudio de los materiales por su capacidad de dar a conocer el interior de un material gracias a una trayectoria de propagación de las ondas en el interior de la pieza en estudio.

Las ondas sónicas son aquellas que tienen un rango audible para los seres humanos que oscila entre los 20 Hz hasta 20KHz que viajan a una velocidad de sonido de 340 m/s aproximadamente. En cuanto a los dispositivos que pueden detectar y generar ondas ultrasónicas

se llaman transductores ultrasónicos encargados de convertir las ondas de ultrasonido en corriente alterna y viceversa.

Por ejemplo, el método de ultrasonido para el tratamiento del hormigón emplea ondas sonoras de alta frecuencia que evalúan tanto las características como el estado del hormigón. El funcionamiento esencialmente consiste en emitir pulsos de sonido y medir el tiempo que se demora en retornar el eco, por lo que se le proporciona al usuario información referente a la naturaleza de los defectos que se detectan y la profundidad.

Los parámetros característicos se detallan a continuación:

Longitud de Onda: Es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentra en el mismo estado de movimiento. Esta es inversamente proporcional al tiempo.

Frecuencia de Onda: Es el número de oscilaciones de una partícula por segundo.

Velocidad acústica: Es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada. Esta velocidad es una característica del material, y en general, es constante para un material determinado, para cualquier frecuencia y longitud de onda.

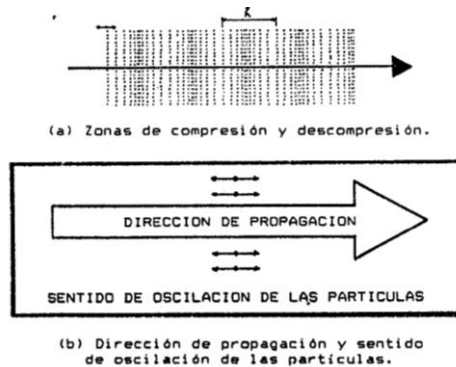
Velocidad Instantánea de vibración: Es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio.

Presión Acústica: Se define como la presión alterna de un material dado, sean gases, líquidos y sólidos. Donde en los puntos de gran densidad de partículas, la presión es también mayor que la presión nominal, mientras que en la zona dilatada es menor.

Ondas Longitudinales: Es una onda de compresión en donde el movimiento de las partículas se da en la misma dirección que la propagación de la onda como se ve en la Figura 1.7, es decir, ocurre en dirección longitudinal. Este tipo de onda se transmite a través de cuerpos sólidos, líquidos y gases. Las ondas longitudinales se pueden clasificar como onda mecánica.

Figura 1.7

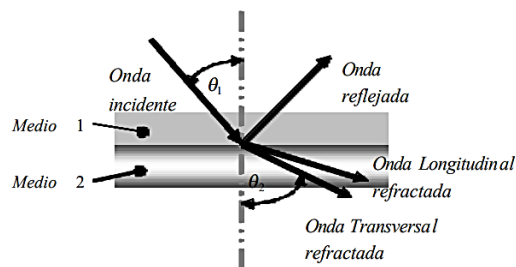
Sentido de oscilación de las partículas y Dirección de propagación



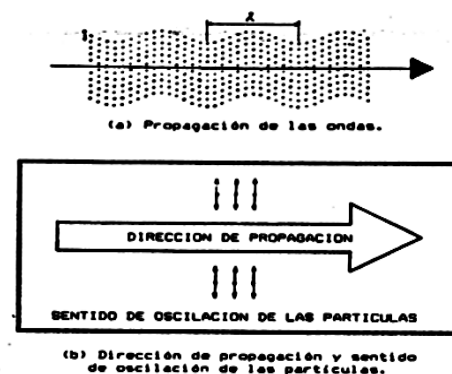
Ondas Transversales: El movimiento de las partículas de las ondas transversales (Figura 1.9) es perpendicular a la propagación, es decir en ángulo recto. Esta onda solo se transmite en cuerpos sólidos con una velocidad aproximada del 55% de la velocidad de una onda longitudinal (Figura 1.8).

Figura 1.8

Transmisión de onda longitudinal y transversal

**Figura 1.9**

Características de las ondas transversales



Dado que el aire es un mal transmisor de la energía ultrasónica. Adicionalmente, su impedancia acústica es muy diferente a la de los materiales sólidos. Tan sólo una pequeña capa de un material acústicamente transmisor es suficiente para proporcionar una buena transmisión de la onda. Para garantizar una mejor transmisión de energía ultrasónica se requiere añadir un acople que es el responsable de brindar una trayectoria entre la pieza y el palpador. Entre los acoples más comunes se tiene la glicerina, grasas en base del petróleo, agua, multicelulosa, etc y en cuanto a acoples secos se tiene las gomas suaves. Es indispensable realizar una adecuada selección de los acoples que se usará en base a tres criterios esenciales tales como, la temperatura de la superficie, la inclinación a la que se encuentre y las condiciones superficiales a la que se encontrará la pieza en cuestión.

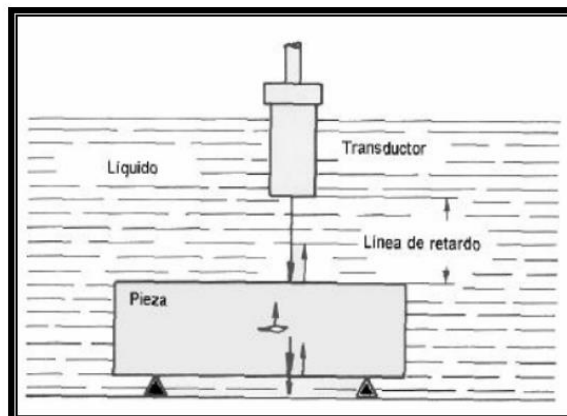
Métodos de Inspección del Ultrasonido:

Método de Resonancia: Método de Inspección en el que se varía la frecuencia de la onda transmitida al material de la **pieza** obteniendo un múltiplo de medias longitudinales de ondas que igualan a un determinado espesor de material.

Método de Inmersión: el objeto a ser inspeccionado ultrasónicamente es sumergido en un líquido y a través de este se transmiten y se reciben ondas ultrasónicas

Figura 1.10

Esquema del método de Inmersión



Beneficios del Ultrasonido:

- Grandes profundidades de alcance hasta de 10 metros
- Inofensivo para el operador
- Alta capacidad de penetración
- Necesitan tan solo una cara de la pieza para inspeccionar

La técnica de ultrasonido por inmersión consiste en utilizar el agua como medio de acoplamiento acústico entre el transductor y la pieza a examinar, que a diferencia de las técnicas tradicionales de ultrasonido por contacto, el transductor y la pieza son sumergidos total o parcialmente en un tanque con agua de tal manera que no se requiere tener contacto entre ellos, ya que la onda de ultrasonido viaja a través del agua hasta penetrar en la pieza (Pontigo & Amezola, 2006).

El método de ultrasonido resulta ineficiente cuando muestra defectos debido a la dispersión del haz de ultrasonido por la presencia de agentes contaminantes como burbujas de aire u otros externos en es. Cuando ha ocurrido la contaminación, la señal de emisión-recepción de ultrasonido se atenúa en su trayecto y provoca que el detector ultrasónico registre falla no confiable, por lo que al sumergir las tuberías obstruidas con hormigón en el tanque de inmersión se requiere precautelar su limpieza previa.

1.4.7.5.Roscado.

La máquina perforadora de núcleo de diamante de la marca VEVOR tiene una plataforma de perforación de núcleo para hormigón en húmedo y seco de 4 u 8 pulgadas de diámetro, posee un soporte incorporado en la base para facilidad durante la operación, su velocidad es de 750 RPM y el elemento indispensable que permitirá retirar una columna de hormigón fraguado es la rosca de 1-1/4" 5/8" y mango de elevación. El diámetro máximo de perforación de la rosca es de 8 pulgadas a 2500 W.

Figura 1.11*Máquina perforadora con roscadora*

Generalidades: La máquina incluye una broca de núcleo de 4,25 pulgadas, además se puede adaptar brocas de hasta 8 pulgadas, así mismo su soporte estabilizador brinda precisión al perforar agujeros con profundidad máxima de 23,62 pulgadas/60 cm. Para el presente proyecto resulta indispensable contar con alta profundidad de roscado tomando en consideración que se busca satisfacer la extracción de los 3 m de longitud de las tuberías, de igual manera destacar el tamaño de la rosca externa de la máquina de 1 hasta $\frac{1}{4}$ '' x UNC y de rosca interna $\frac{5}{8}$ '' x 11 UNC.

Seguridad: Si existiera atascamiento de la broca o esta encuentra resistencia más alta de cierto nivel, la máquina cuenta con un dispositivo de protección contra sobrecargas que función disparándose automáticamente lo que garantiza la seguridad de operación contra lesiones o daños.

Facilidad de operación: El eje de salida del taladro es forjado de acero inoxidable que soporta aún más presión, una tubería de agua que es suministrada para mantener la vida útil de las brocas saca núcleo y un riel engrosado que es guía estabilizadora de la máquina durante las sacudidas. Los materiales que perfora la máquina sin mayor esfuerzo son el concreto reforzado, ladrillo rojo, mármol, entre otros materiales resistentes.

Roscado con cepillos raspadores: Las herramientas de limpieza de pozos contemplan cepillos y raspadores que, por su variedad en tamaño, son ideales para tratamiento de tubos ascendentes como de tubería que requiera un trabajo demandante de limpieza. En el mercado actual, TETRA

Technologies oferta diseños exclusivos de este tipo de herramientas que garantiza la cobertura total de 360° durante la operación, por ejemplo, los cepillos y cuchillas raspadoras están diseñados con resortes independientes para evitar fallas por fatiga del metal. "La función de este equipo es eliminar mecánicamente revoques de lodo, revestimientos de cemento, incrustaciones de la tubería y otros, así también es una herramienta de perforación/fresado/pulido" (TETRA Technologies, Inc., 2019).

Figura 1.12

Herramienta raspadora TETRA AdvanceClean



El mandril que aloja las almohadillas actúa como una sola pieza y gira con las almohadillas. Esta herramienta puede girar dentro de las restricciones de par de torsión y moverse sin temor a dañar el revestimiento o la propia herramienta. Durante la perforación, es una buena práctica interrumpir la circulación y girar la tubería regularmente cada 1.500 metros para dispersar la acumulación de residuos.

1.4.7.6. Broca copa diamantada para hormigón.

La Broca copa diamantada para hormigón cuenta con dientes de acero con aleación de carburo de tungsteno que es un material ideal en ofrecer resistencia excelente al desgaste y al calor, el ángulo de corte positivo hace que la eliminación de virutas sea eficiente.

Es una herramienta duradera y robusta que permite una perforación rápida y limpia de agujeros en hormigón, cemento, ladrillo y bloque. Así mismo, el diseño del cuerpo del núcleo en espiral reduce la fricción existente en el orificio y el polvo residual de la operación se elimina de manera más cómoda y sencilla.

No obstante, se requiere brocas guías que alineen inicialmente y durante el proceso la perforación del agujero que se pretende realizar para que sea puntual. Cabe mencionar que es un tipo de broca que se adapta a todo taladro de martillo, y su tamaño obedece a tres diámetros de 40mm, 65 mm y 100 mm.

Figura 1.13

Set de brocas copa diamantada y brocas guías



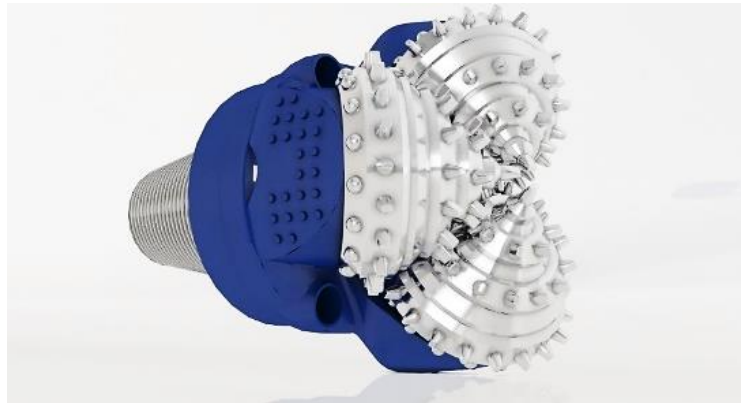
1.4.7.7. Brocas tricónicas.

Es una herramienta de perforación bastante usada en la perforación de pozos y la industria minera, la broca consta de tres cabezas giratorias que tienen forma cónica que consigo tienen varias filas de dientes que son concéntricos.

La inclinación de cada cabeza de la broca es de 45° aproximadamente, además el cojinete que viene en cada cabezal permite rotar sutilmente. La broca por lo general se la coloca en el extremo de una sarta para perforación, de tal manera que al girar los dientes de las tres cabezas cortan el material avanzando con una perforación que puede llegar a ser bastante profunda. Para la perforación, el cuerpo de la broca y las tres cabezas giran en sus propios ejes respectivamente, formando así un ángulo entre ejes lo que provoca un mecanismo efectivo de corte de acción multieje.

Figura 1.14

Broca tricónica



Capítulo 2

2. Metodología

Las tuberías obstruidas por hormigón fraguado es el objeto de estudio, donde se busca rehabilitarlas con el análisis previo de alternativas que describan un equipo o herramienta ideal para limpiar las tuberías sin perjudicar su estructura, por lo que se propuso desarrollar dos enfoques metodológicos de diseño tanto de índole mecánica (Diseño 1) como acústica (Diseño 2) para conocer la mejor solución que se adapte a las necesidades del cliente.

A partir de las dos ramas de estudio se describieron las alternativas correspondientes a cada estrategia de diseño respecto al fundamento teórico descrito en el Capítulo 1. Fue indispensable analizar las restricciones de diseño de cada enfoque metodológico para posteriormente elaborar las matrices de decisión de los dos diseños con los criterios necesarios que satisficieran la necesidad del cliente, posterior a ello de cada enfoque se seleccionó una sola alternativa y se propusieron dos diseños de forma del equipo (Diseño 1 y Diseño 2) con las dimensiones, atributos y componentes necesarios de cada uno.

Posterior al análisis de cada diseño, se desarrolló la alternativa seleccionada de cada enfoque metodológico de acuerdo con los ajustes de dimensionamiento del equipo y los cálculos obtenidos, así mismo, el diseño 1 y diseño 2 seleccionó los componentes y la funcionalidad de estos en beneficio de la solución de la problemática.

Finalmente, la metodología concluye con la presentación de las ecuaciones matemáticas utilizadas para desarrollar el diseño de forma final tanto del enfoque mecánico como acústico.

2.1. Diseño 1 del equipo con sistema mecánico

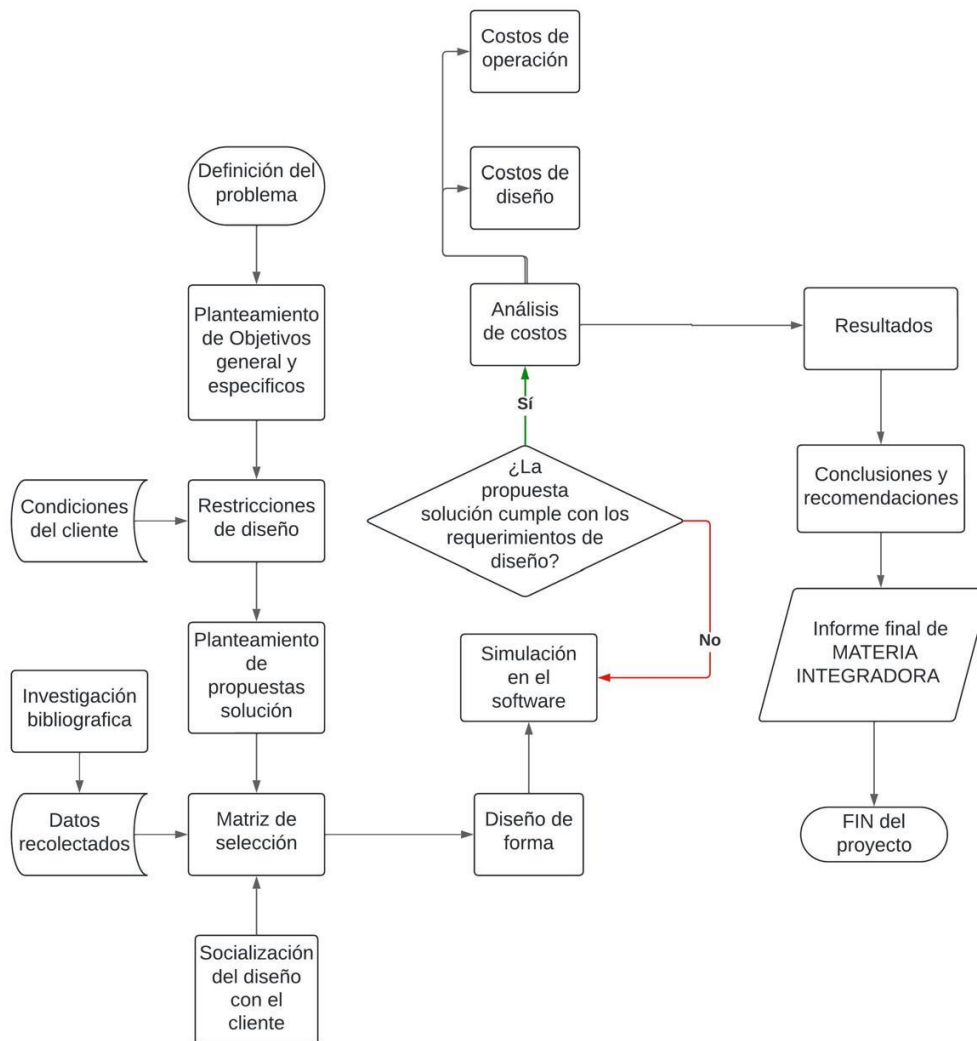
Flujograma

El flujograma (Figura 2.1) representa la secuencia de las actividades para realizar correctamente el diseño.

A continuación, se presenta imagen con el flujo de las etapas:

Figura 2.1

Flujograma metodológico general



2.1.1. *Requerimientos del diseño*

De acuerdo con el cliente se debe diseñar dos alternativas de solución y posterior al diseño realizar una matriz de decisión para seleccionar el equipo más viable de acuerdo a los criterios que el cliente considere pertinentes. Entre los detalles especificados se mencionó que el equipo debe ser rentable, versátil para otro tipo de limpieza, transportable y considerar una vida útil del equipo prolongada.

2.1.2. *Factores de influencia*

Los factores de influencia son los parámetros establecidos para un diseño eficiente, esto implica delimitar el problema para conocer los rangos de operación del equipo a diseñar. Estos factores son seleccionados por el diseñador, en conjunto con expertos sobre el tema y el cliente. A continuación, la Tabla 2.1 muestra los principales factores de influencia.

Tabla 2.1

Factores de influencia

Factor de influencia	Descripción
Presupuesto	Inversión inicial para la implementación del equipo.
Retorno de la inversión	Principalmente que la inversión sea rentable y el tiempo de retorno de esta no sea extenso.
Vida útil	Vida útil del equipo y sus componentes sea de un periodo extenso.

Mantenimiento	Mantenimiento preventivo de acuerdo al sistema. En los mantenimientos correctivos, verificar si los repuestos y componentes son de importación o fácil acceso.
Resistencia del hormigón	Dependiendo de la alternativa se debe considerar el tipo de material del equipo, para que este no se deforme durante la perforación del hormigón.
Operatividad	Fácil manejo para el operador.
Movilidad	Que el equipo sea transportable en caso de así requerirlo.

2.1.3. Criterios de selección

Los criterios de selección son los parámetros establecidos por el cliente, dando a conocer el orden de importancia general.

Tabla 2.3

Criterios de selección

Criterios de selección	Detalles
Costo	El de menor costo de inversión en comparación a las otras alternativas.
Vida útil	Si en una alternativa el periodo de vida útil es representativamente mayor a otra y el costo no es excesivamente diferente, se debe optar por esta alternativa.
Operatividad	Que sea seguro y de fácil manejo para los operadores.
Mantenimiento	Que los materiales o repuestos sean de fácil adquisición.

2.1.4. Matriz de ponderación

De acuerdo con (Grech, 2013), se tomó ponderaciones que van del 1 al 9 y para realizar la comparación por pares, esta se establece como una combinación entre los criterios de selección, lo cual da un total de 6 combinaciones. Véase la Figura 2.2.

Las ponderaciones para el sistema de puntos se visualizan en la tabla que se muestra a continuación (Tabla 2.4).

Figura 2.2

Parámetros de calificación

Resultado de la comparación	Puntos asignados	Comentarios
Infinitamente más importante	9	No merece la pena hacer la comparación. Es obvio.
Mucho más importante	8	Todos están de acuerdo en que es mucho más importante.
Notablemente más importante	7	La gran mayoría considera que es más importante.
Más importante	6	Aunque no tan claro, pero sí, es más importante.
Igual de importante	5	No hay mayores diferencias entre los dos.
Menos importante	4	Aunque no tan claro, pero sí, es menos importante.
Notablemente menos importante	3	La gran mayoría considera que es menos importante.
Mucho menos importante	2	Todos están de acuerdo en que es menos importante.
Infinitamente menos importante	1	No merece la pena hacer la comparación. Es obvio.

Nota: Criterios y metodología obtenida de: Grech, P. (2013). *INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA*. Colombia: PEARSON.

Tabla 2.4

Comparación por pares

Criterio de selección	Costo	Vida útil	Operatividad	Mantenimiento	Calificación
Costo	----	6	8	7	21
Vida útil	4	----	7	8	19
Operatividad	2	3	----	4	9
Mantenimiento	3	2	6	----	11
Total de puntos					60

De la matriz de comparación por pares se obtuvo el grado de importancia de cada criterio. Véase la Tabla 2.4 para mayor detalle.

Tabla 2.5

Comparación por pares

<i>Criterio de selección</i>	<i>Importancia</i>	<i>Peso [%]</i>
<i>Costo</i>	21	35,00%
<i>Vida útil</i>	19	31,67%
<i>Mantenimiento</i>	11	18,33%
<i>Operatividad</i>	9	15,00%
<i>Total</i>	60	100,00%

2.1.5. Alternativas de solución

2.1.5.1. Alternativa 1.

Diseño de un eje rotativo, usando un perfil tubular y en la punta un porta-filos o porta cuchillas, utilizando 4 cuchillas desmontables, que facilita su reemplazo en caso de desgaste.

Se utilizan 4 filos para mejorar el enfriamiento y el calor en el equipo, adicionalmente tiene acoplado un tornillo sin fin para facilitar el desalojo del concreto triturado. La punta que realizara el corte del concreto y la perforación tiene el diámetro interno del tubo con la finalidad de que este se pueda centrar y no existan posibles desvíos que causen potenciales danos en la integridad de las tuberías que se requieren limpiar.

2.1.5.2. Alternativa 2.

Diseño de una broca porta-insertos con cuchillas desmontables, que facilita su reemplazo en caso de desgaste. Para reducir el desgaste y el calentamiento durante el uso. Además, se

incorpora un rodamiento centrador en el diseño, que garantiza una alineación precisa de la broca y previene el perforado accidental de la tubería durante el proceso de perforación.

2.1.6. Matriz de decisión

De acuerdo con los criterios previamente establecidos, se evaluaron las alternativas descritas mediante una matriz de decisión para determinar cuál es la opción más viable. Posteriormente, se procederá a desarrollar el diseño de la alternativa seleccionada.

Tabla 2.6

Matriz de decisión

CRITERIOS DE SELECCIÓN					
Soluciones	Costo	Vida Útil	Mantenimiento	Operatividad	TOTAL
Alternativa 1	8	6	9	7	7.5
Alternativa 2	5	8	6	7	6.5

2.1.7. Diseño de forma

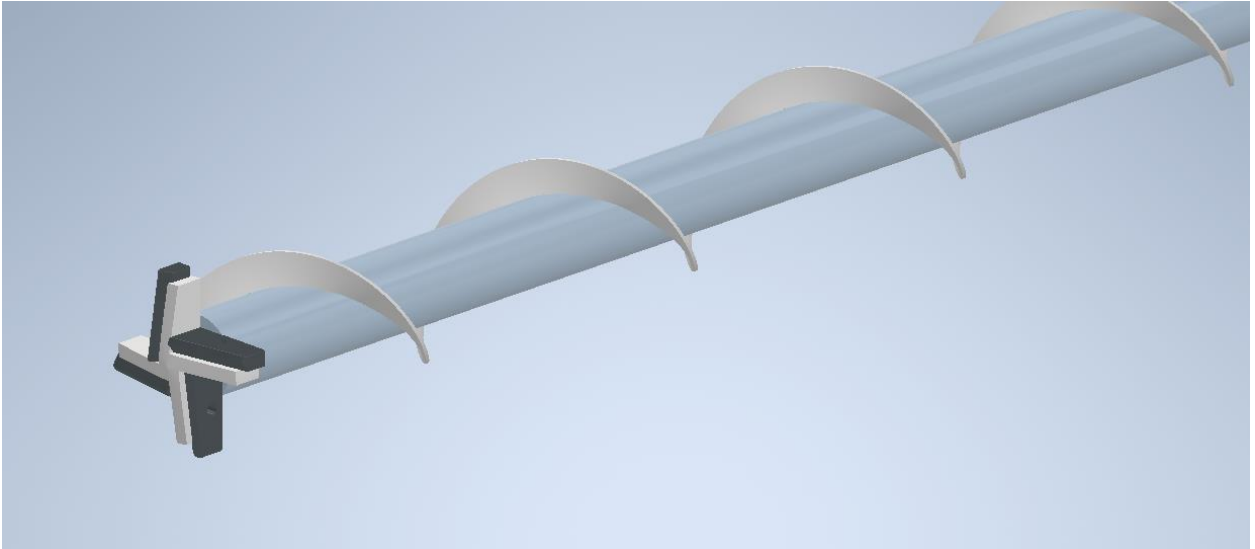
Se realizó el diseño de la alternativa teniendo en cuenta las recomendaciones del cliente y sus necesidades específicas. Se optó por un tubo de cédula 40 como eje principal, al que se acopla una punta roscada con cuatro filamentos desmontables, dado que estos componentes están sujetos a desgaste. Además, el tubo está equipado con conductos internos que llegan hasta los filamentos de corte, permitiendo la utilización de agua o aire para enfriar el material cuando sea necesario. Esta característica contribuye a prolongar la vida útil del equipo.

La solución debe realizar la remoción y traslado del hormigón que se encuentra en el interior de la tubería en un tiempo límite.

Figura 2.3

Diseño del equipo de limpieza de tuberías con hormigón

Alternativa 1.

**Figura 2.4**

Diseño del equipo de limpieza de tuberías con hormigón

Alternativa 2.

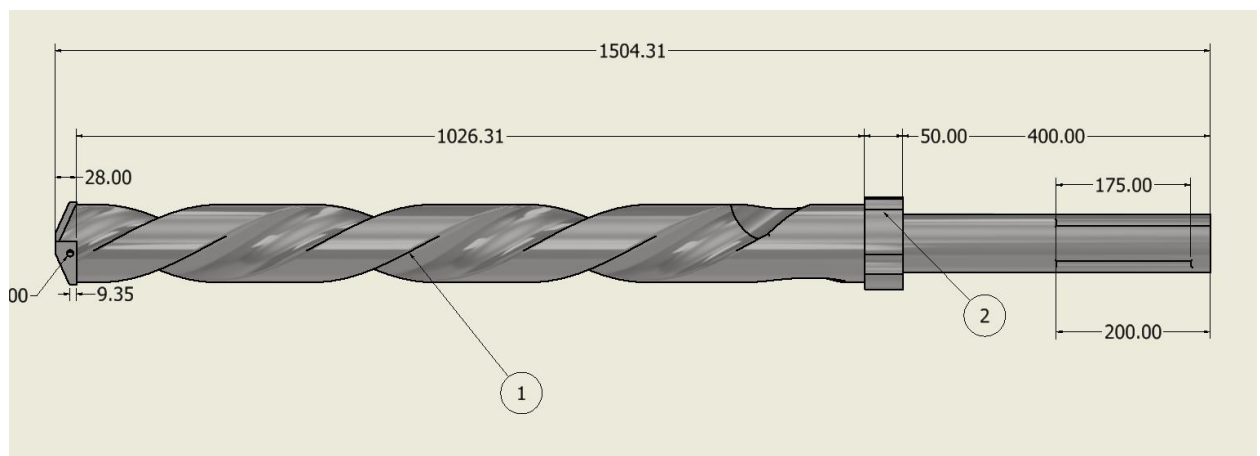


Tabla 2.7

Componentes de la alternativa 1

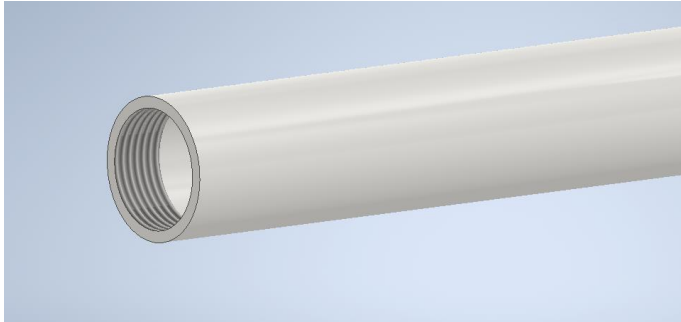
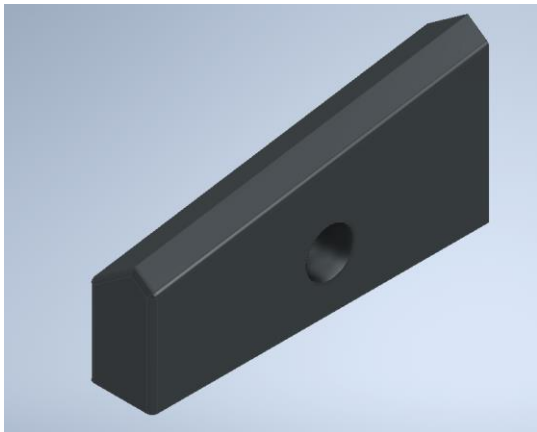
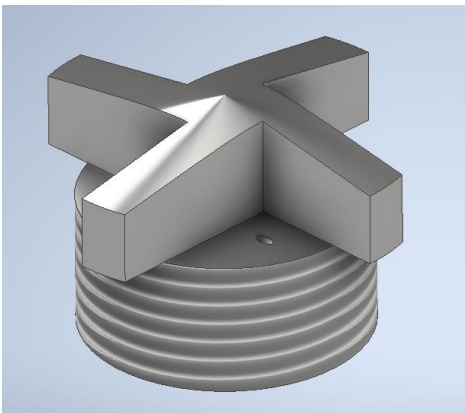
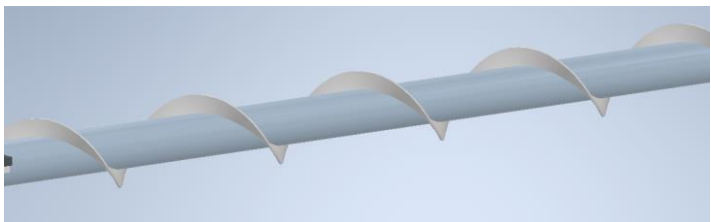
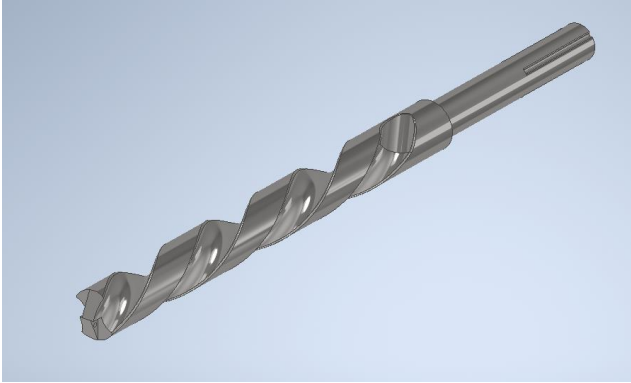
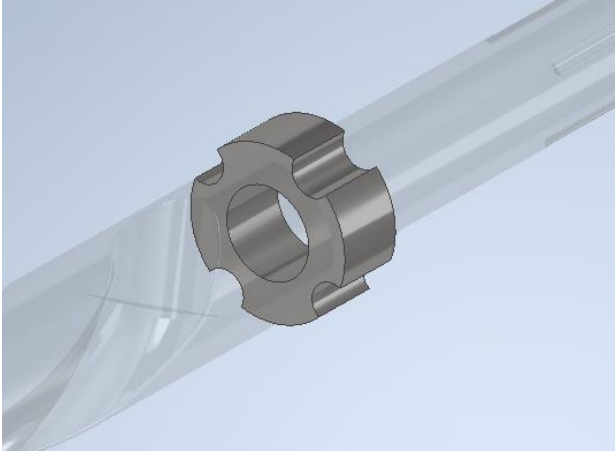
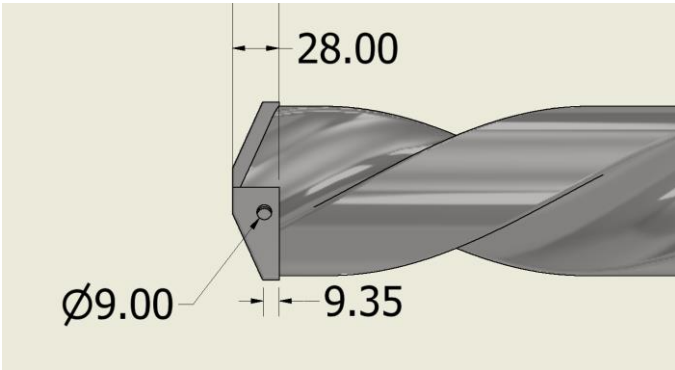
Componente	Bosquejo	características
Eje		Eje de broca, tubo de 2 pulgadas cedula 80 en acero ASTM A36.
Filos de corte		Filos de corte realizado por mecanizado en acero Dillidur 450 o carburo de tungsteno.
Porta filos roscado		Elemento donde se colocarán las 4 cuchillas o filos de corte, adicional tiene 2 perforaciones internas para el uso aire o agua, en caso de ser necesario enfriar el material.
Tornillo sin fin		Tornillo sin fin con relación 1:2

Tabla 2.8

Componentes de la alternativa 2

Componente	Bosquejo	características
Eje		Broca con hélice de dos filos, diámetro de
Cojinete		Estructura móvil, colocada a presión y permite centrar la broca para distribuir el momento generado en la punta.
Filos desmontables		Elemento de desgaste que se puede reemplazar con facilidad para optimizar el mantenimiento del equipo.

2.1.8. *Material*

El acero Dillidur 450 es un tipo de acero resistente al desgaste que se caracteriza por su alta dureza y tenacidad, diseñado para aplicaciones en las que se requiere una resistencia excepcional al desgaste y a la abrasión. Este material es especialmente utilizado en industrias como la minería, la construcción, y la fabricación de maquinaria pesada donde las condiciones de trabajo son extremadamente severas.

Se pueden observar las propiedades principales del acero Dillidur 450 en la Tabla 7:

Tabla 2.9

Especificaciones del acero a utilizar

PROPIEDADES DEL ACERO DILLIDUR 450	
Densidad	7.85 g/cm ³
Módulo de elasticidad	200 GPa
Resistencia máxima a tracción	1400 MPa
Dureza nominal	450 HBW
Límite elástico	950 MPa
Soldabilidad	Buena

2.1.9. *Modelo matemático*

Con los datos obtenidos en el laboratorio y estimaciones tomadas en base a recomendaciones obtenidas de (Concrete Construction Engineering Handbook), donde habla sobre técnicas de perforación y recomendaciones sobre herramientas y brocas utilizadas en trabajo con hormigón.

Para brocas de grandes diámetros se recomienda bajas revoluciones debido al sobrecalentamiento y desgaste al que se somete el material.

- Se recomienda un rango de revoluciones de 300 a 600 RPM.
- La fuerza a compresión (f_c) obtenida en el laboratorio de forma práctica es de 8.3 MPa.
- La fuerza cortante es mucho menor que la fuerza a compresión del hormigón, por lo que se considera que es el 10% de la fuerza de compresión.
- El diámetro externo de la tubería es de 127 mm o 5" y el espesor de la tubería es de 6 mm, lo que deja un diámetro interno de 115 mm para la broca

2.1.10. Cálculo de esfuerzos de la broca

2.1.10.1. Área de corte (A_c).

Es la sección transversal que está en contacto con el hormigón, se asume como área de corte el área proyectada por las cuchillas al momento de girar, es decir un área circular.

$$A_c = \pi \times r^2 \quad (2.1)$$

r= radio de broca [m]

2.1.10.2. Resistencia al corte (σ_c).

Como se observó en la Tabla 1 el esfuerzo a compresión es de 5 MPa, se considera que el esfuerzo de corte es el 10% de este valor por lo que:

$$\sigma_c = 0.1 \times \sigma'_{comp} \quad (2.2)$$

Donde:

σ_c = Resistencia de corte [MPa]

σ'_{comp} = Resistencia de compresión [MPa]

2.1.10.3. Fuerza de corte (F).

$$F = \sigma_c \times A_c \quad (2.3)$$

2.1.10.4. Torque (T).

$$T = F \times r \quad (2.4)$$

2.1.10.5. Potencia del motor (W).

Considerando 300 RPM, debido a la geometría de la broca y tomando como referencia catálogos de taladros HILTI.

$$W = T \times RPM \quad (2.5)$$

2.1.10.6. Tensión de Von Mises (σ_{vm}).

Por simplificación de cálculos se consideró el tubo como una sola geometría.

Área de sección transversal (A)

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \quad (2.6)$$

D_{ext} = Diámetro exterior [mm]

D_{int} = Diámetro interior [mm]

2.1.10.7. Momento de Inercia (J).

$$J = \frac{\pi}{32} \times (D_{ext}^4 - D_{int}^4) \quad (2.7)$$

2.1.10.8. Tensiones debido al torque (τ_t).

$$\tau_t = \frac{T}{J \times R} \quad (2.8)$$

R = Radio externo

2.1.10.9. Esfuerzo de Von Mises (σ_{vm}).

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_t^2} \quad (2.9)$$

2.1.10.10. Velocidad de corte.

$$V_a = N \times a \quad (2.10)$$

V_a = velocidad de avance [mm/min]

N = velocidad de rotación [RPM]

a = avance por revolución [mm/rev]

El tiempo de limpieza en un tubo de 3 metros es de:

$$t = \frac{\text{distancia}}{V_a} \quad (2.11)$$

$$t = 62.5 \text{ minutos}$$

2.1.11. Cálculo de paso para tornillo sin fin

En la practica el paso de un tornillo sin fin suele estar en un rango de 1 a 2 veces el diámetro del tornillo.

2.1.11.1. Flujo másico.

$$m = \rho_{hormigon} V_c A_c \quad (2.12)$$

m = Flujo masico [kg/h]

$\rho_{hormigon}$ = Densidad del hormigón (2400 kg/m³)

2.1.11.2. Flujo volumétrico.

$$Q = V_c A_c \quad (2.13)$$

Q = Flujo volumetrico [m³/h]

2.1.11.3. Paso de hélice del sin-fin.

$$P = \frac{Q \times 60}{\pi \times D^2 \times n} V_c A_c \quad (2.14)$$

P = Paso [m]

2.1.12. Simulación

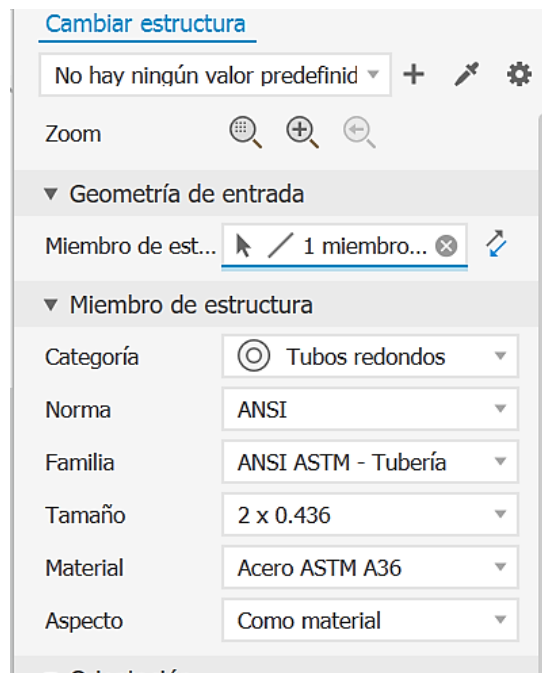
Se realizó un análisis estático en el software Autodesk-Inventor Pro 2025, el cual se basa en un modelo matemático de elementos finitos para aproximarse lo mayor posible al comportamiento real que tendrán las estructuras. Para garantizar la veracidad de los resultados obtenidos se analizó el esfuerzo y deformación proporcionados por el programa.

Para el análisis se consideró:

- Fijo en el extremo que va el motor.
- Torque igual a la resistencia a compresión.
- Que el material no presenta corrosión ni falla.

Figura 2.5

Especificaciones del acero a utilizar en la simulación



En la simulación se utilizó acero estructural ASTM A36 para los elementos que no están en contacto directo con el hormigón, como el eje, el porta-cuchillas y el tornillo sin fin.

Véase la Tabla 2.10 para las propiedades del material

Tabla 2.10*Especificaciones del acero a utilizar en la simulación*

PROPIEDADES DEL ACERO ASTM A36	
Densidad	7.85 g/cm ³
Módulo de elasticidad	200 GPa
Resistencia máxima a tracción	400-550 MPa
Límite elástico	250 MPa

Tabla 2.11*Cargas a las que se encuentra sometida la estructura*

Tipo de carga	Magnitud	Unidad
Aceleración de la gravedad	9.81	m/s ²
Momento	275	Nm
Fuerza	10	kN

En el equipo diseñado, el esfuerzo máximo que se aplica bajo las cargas estipuladas en este estudio es de 20.71 MPa y el límite elástico del material es aproximadamente de 250 MPa.

De acuerdo con el teorema de Goodman, tenemos un factor de seguridad de:

$$\eta = \frac{\sigma}{S_{max}} \quad (2.15)$$

Donde:

η = Factor de seguridad

σ = Límite elástico

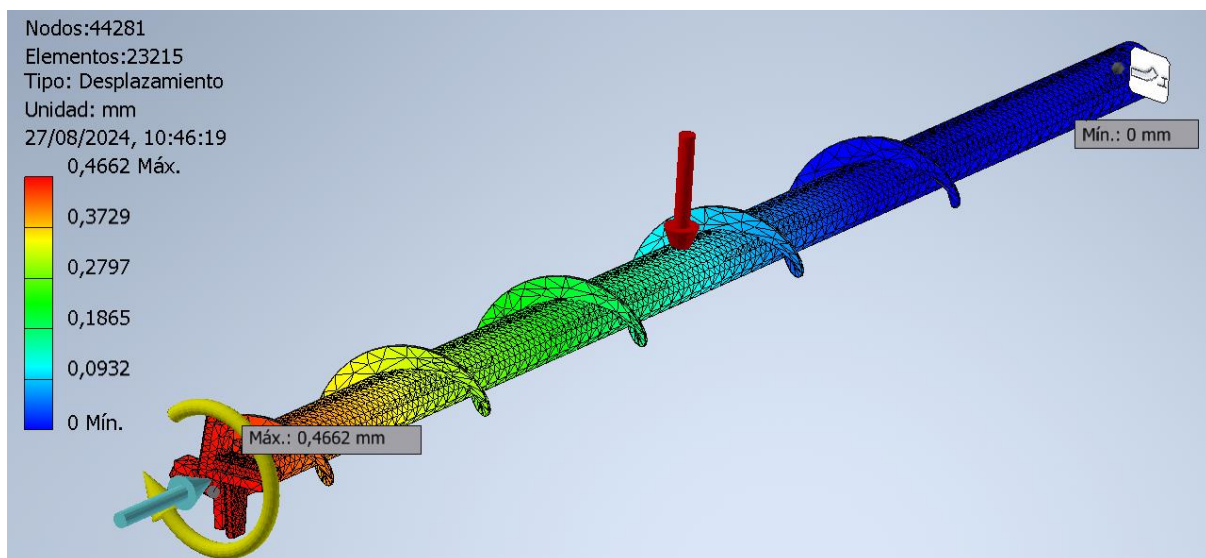
S_{max} = Esfuerzo máximo aplicado

El método de elementos finitos genera mallas en las superficies de cada estructura, dependiendo de la cantidad de nodos el estudio será más detallado y específico.

A continuación, se puede observar el mallado en la broca diseñada, véase la Figura 2.6.

Figura 2.6

Mallado para análisis por método de elementos finitos



2.2. Diseño 2 del equipo empleando tecnología ultrasónica

2.2.1. Requerimientos y limitaciones para el diseño 2

Para el constante progreso en el diseño del equipo de recuperación de tuberías con hormigón fraguado empleando la tecnología de ultrasonido fue indispensable mantener reuniones con el cliente ERMARLO S.A., de tal manera que se estuvo al tanto de los requerimientos del equipo y se analizaron cuáles serían las limitaciones implicadas a este diseño. A continuación, se exponen en la Tabla 2.12, los seis requerimientos indispensables que permitieron desarrollar el enfoque acústico de solución.

Tabla 2.12*Requerimientos para el diseño 2 del equipo*

Costo	Estimar el costo inicial para la adquisición de los componentes del equipo versus el costo de mantenimiento durante la vida del equipo.
Mantenibilidad	Debe existir en el mercado repuestos para las partes del equipo cuando se requiera cambiar de manera sencilla.
Vida útil	Prolongar la vida útil de las tuberías restauradas y el diseño debe estar presto para emplearse las contadas veces que se lo requiera.
Operatividad	Funcionamiento eficaz capaz de limpiar la totalidad del hormigón fraguado en la tubería sin perjudicar su estructura en un tiempo relativamente corto.
Factibilidad	El equipo debe tener los atributos y componentes necesarios para limpiar el hormigón fraguado dentro de la tubería.
Transportabilidad	Puede ser estático o móvil el equipo, pero indispensable que sea práctico de transportar.

La dureza del hormigón durante la remoción, la resistencia del tipo de hormigón endurecido en las tuberías y cuidar el revestimiento interior de la tubería son las principales limitaciones en el diseño del equipo de recuperación.

Se discutió que se pretende remover el hormigón fraguado de manera que el material al ser removido salga fraccionado en partículas de mayor tamaño posible para evitar que llegue al estado de pulverizarse y sea altamente contaminante para el operador y el área de trabajo, también se enfatizó que el equipo debe retirar el hormigón fraguado del centro de la tubería para que el hormigón adherido a las paredes de las tuberías se desprenda más sutilmente y cuidar la estructura de la tubería de acero.

2.2.2. Alternativas de solución del Diseño 2

Una vez que se conocen los requerimientos, las restricciones de diseño y la problemática planteada se propuso tres alternativas de diseño solución para el equipo de recuperación de tuberías que permita retirar el hormigón fraguado obstruyente, mediante técnicas destructivas de taladrado, roscado y tecnología de ultrasonido de inmersión. La presentación de propuestas se puntualiza a continuación:

Alternativa 1:

Emplear la tecnología de Ultrasonido de Inmersión de alta potencia a 25kHz de frecuencia como un método de remoción del hormigón, mediante sumergimiento de los tubos a través de una pinza de sujeción que garantice la fijación del tubo dentro de un tanque de inmersión. Se remueve las obstrucciones ultrasónicamente con ondas longitudinales, atraviesan el líquido que se mezcla con un agente químico limpiador para formar cavitación, lo que genera calor y agitación de choques entre burbujas del líquido limpiador y la superficie de la tubería, así se desintegra una fina capa de hormigón dentro del revestimiento interno del tubo remoción de los residuos del hormigón, que será cilíndrica. Así mismo, en el tanque se incorpora una válvula de bola con su puerto de drenaje para el fluido y partículas residuales resultantes de la limpieza.

Desventaja: El costo de adquisición del sistema de ultrasonido de alta potencia para remoción de partículas con alta resistencia como el hormigón podría resultar de alto costo, sin embargo, se puede evaluar mediante un análisis de costos y revisión del alcance si es factible optimizar este sistema con elementos genéricos.

Alternativa 2:

Diseño de un equipo mediante un sistema roscado para remoción de concreto, hormigón y piedra, las sierras de copa diamantada tienen una forma especializada con puntas característica de carburo de tungsteno que remueven el material. La sierra de copa saca núcleo es ideal por su forma de copa que permite estabilizar la perforación y recepción de los residuos de hormigón obtenidos.

Igualmente, se requiere incluir un sistema de lubricación para evitar el sobrecalentamiento de la herramienta, razón que obligaría a cambiar frecuentemente las sierras de copa.

Alternativa 3:

Diseño de un equipo con broca tricónica para perforación de hormigón y concreto incorporada a tornillo sin fin que retire los residuos durante la operación. La broca alcanza alto rango de profundidad al perforar del concreto al colocarse en una sarta de rotación.

Con la finalidad de seleccionar la mejor alternativa para el diseño del equipo de recuperación, se evaluó cada alternativa de acuerdo con los criterios que se detallan a continuación:

- **Costo:** el precio de los componentes para el diseño del equipo debe ser competitivo sin comprometer calidad, considerando que se prioriza una inversión inicial a costos elevados por mantenimiento o remplazo de componentes (Ponderación: 20%).
- **Seguridad:** es el grado de complejidad de operación del equipo que genere confianza al ser utilizado (Ponderación: 15%).
- **Portabilidad:** es la facilidad con la que se transporta el equipo al área de trabajo considerando que puede ser desmontable o contar con accesorios adicionales (Ponderación: 15%).
- **Operatividad:** implica cuán eficaz es el funcionamiento del equipo al remover todo el hormigón fraguado sin presentar defectos de operación (Ponderación: 30%).
- **Mantenibilidad:** refiere a la facilidad de brindar mantenimiento al equipo cuando se requiera y garantizar la disponibilidad de remplazo de los elementos del equipo (Ponderación: 15%).
- **Ambiental:** refiere a cumplir con el ODS del consumo responsable del agua y manejo de escombros en un plan de reutilización del hormigón extraído (Ponderación: 5%).

Luego de postular las tres alternativas propuestas, se aplicó los criterios mencionados a evaluación mediante una matriz de decisión (Tabla 2.14) que determinó la selección de la alternativa 1 como la propuesta de diseño para el equipo de recuperación de mantenimiento de tuberías.

La propuesta cumplió con satisfacción los parámetros de seguridad, portabilidad y criterio ambiental; el contrario los aspectos de operatividad y factibilidad cumplieron media satisfacción porque la operatividad requiere evaluarse según el diseño del equipo en un software adecuado y la mantenibilidad depende del análisis de costos para adquirir repuestos del sistema ultrasónico cuando se requiera.

La herramienta de la matriz de decisión establece la relación entre aspectos cuantitativos y cualitativos como el peso de los criterios acorde a la ponderación porcentual establecida según la importancia que como diseñador se primó, además los requerimientos de diseño discutidos con el cliente ERMARLO S.A.

La calificación de las alternativas corresponde a tres niveles de satisfacción con un rango de 1 al 3 (Tabla 2.13), los resultados de la selección de la alternativa seleccionada se evidencian a continuación:

Tabla 2.13

Niveles de satisfacción para cada criterio

1	Poco Satisfactorio
2	Medianamente Satisfactorio
3	Satisfactorio

Tabla 2.14

Matriz de decisión de las tres alternativas del diseño 2

Pesos	Criterio						Resultados		
	2.0	1.5	1.5	3.0	1.5	0.5	Puntaje sin peso	Puntaje con peso	Prioridad
Alternativas	Costo	Seguridad	Portabilidad	Operatividad	Mantenibilidad	Ambiental			
1	1	3	3	2	2	3	14	21.5	1
2	2	1	1	3	2	2	13	20	2
3	2	1	1	3	2	1	10	19.5	3

2.2.3. Diseño conceptual del diseño 2

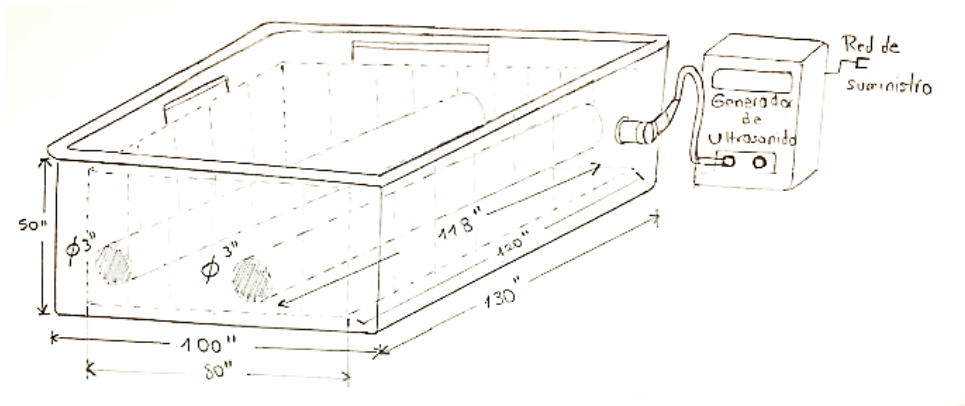
2.2.3.1. Diseño de forma inicial.

En la Figura 2.7 se ilustró un boceto inicial para el diseño propuesto del equipo de recuperación de tuberías, en donde se evidenció los elementos principales de la tecnología de ultrasonido de inmersión de alta potencia que en la actualidad se utiliza en aplicaciones de mantenimiento industrial.

Se consideró el diseño de una piscina o tanque para sumergir las tuberías de gran tamaño dada la longitud del tubo de 3 m y en cuanto al ancho se planteó ubicar más de un tubo hasta 4 en su interior considerando la forma rectangular del tanque referenciados a la capacidad de modelos de ultrasonido de alta potencia disponibles en el mercado.

Figura 2.7

Boceto inicial del equipo de recuperación de tuberías con hormigón fraguado



Nota: Los elementos constan de tanque de inmersión, generador de ultrasonido, rejilla canasta portaobjetos, tubos obstruidos por hormigón fraguado

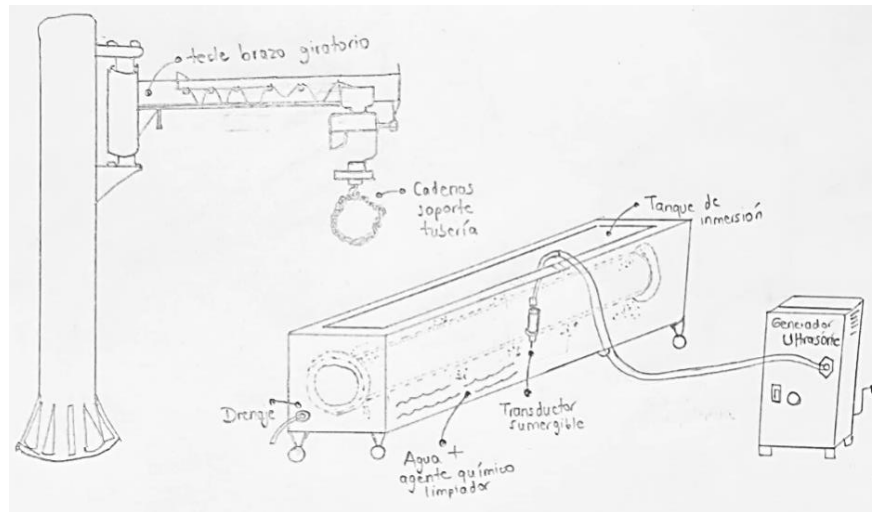
2.2.3.2.Rediseño de forma.

A partir del primer boceto del equipo de recuperación de tuberías se corrigió las dimensiones del tanque de inmersión, por lo que se determinó que solo puede ser sumergido un tubo a la vez para garantizar la eficiencia del proceso de cavitación sobre toda la superficie longitudinal del tubo. Se consideró añadir una válvula de drenaje al tanque para recolectar el fluido limpiador y evaluar si puede ser reutilizado en próximas limpiezas o en otras actividades eco amigables.

El diseño de una canasta portaobjetos encarecería el equipo y sería improductivo al implementar un tecele giratorio, eléctrico, manual o hidráulico, como herramienta auxiliar de izaje para soportar el peso total del tubo, sumerja y retire el tubo del líquido limpiador y mantenga suspendido el tubo mientras se retire el cilindro de hormigón residual resultado de la limpieza ultrasónica.

Figura 2.8

Boceto corregido del equipo de recuperación de tuberías con hormigón fraguado



Nota: Se detalla un tanque de inmersión con capacidad para un solo tubo, generador de ultrasonido de alta potencia, transductor ultrasónico, tecele giratorio, tubos obstruidos por hormigón fraguado, liquido con agente limpiador.

Mediante la elaboración de un diagrama de flujo general descrito en el diseño 1 (Figura 2.1) se determinó los procesos indispensables que se requieren llevar a cabo para diseñar el equipo y contemplar una funcionalidad satisfactoria durante la operación de remoción del hormigón fraguado para el enfoque ultrasónico.

El proceso de diseño del equipo mediante limpieza ultrasónica inició con la investigación de métodos de remoción de hormigón tomando en consideración las condiciones, requerimientos y restricciones del equipo de diseño manifestados por el cliente, posterior a esto se planteó las alternativas de solución para discriminar mediante la matriz de decisión cuál de ellas satisface la necesidad. Una vez ya seleccionada la alternativa se socializó con el cliente para desarrollar los elementos de la propuesta, cálculos respectivos y posibles simulaciones futuras del funcionamiento del equipo durante la remoción del hormigón fraguado dentro del revestimiento de la tubería.

2.2.4. Componentes mecánicos y selección de materiales para diseño 2

Con la alternativa seleccionada como punto de partida, se diseñó el equipo empleando la tecnología de ultrasonido por inmersión de alta potencia, mismo que consiste en la emisión de ondas ultrasónicas o sonoras que entran en contacto con un líquido de inmersión para agitarlo hasta obtener un entorno de burbujas microscópicas que chocan entre ellas para incrementar la energía que es la responsable de limpiar el objeto sumergido. Fue importante establecer los parámetros de funcionamiento del sistema ultrasónico de este equipo referenciados en los modelos existentes en el mercado para determinar el tiempo de operación, la mantenibilidad del equipo, si hay reducción de la mano de obra durante la limpieza de los tubos, disminución en el consumo energético y de agua para el cliente.

Por lo general, el ultrasonido de alta potencia puede retirar suciedad de las superficies visibles y las que no son de fácil acceso de materiales como metal, plástico, caucho, vidrio. El material contaminante que se retira con frecuencia en equipos de limpieza industrial por ultrasonido son virutas, residuos de materiales de moldeo, grasa, cal, entre otros, así que se determinó un agente limpiador con alto rendimiento y precio asequible capaz de remover la capa de hormigón fraguado en el revestimiento interior de la tubería.

A continuación, se detalla los elementos el sistema ultrasónico:

Tanque de inmersión: Se decidió trabajar con un tanque de inmersión de fibra de vidrio (Figura 2.9), porque a pesar de disponer otras opciones de material de alta resistencia como el acero inoxidable o polipropileno PVC, se seleccionó en función de la compatibilidad del detergente industrial para resistir el accionar del agente químico sin producir daños en las paredes del tanque. Tanto las dimensiones y demás pormenores del tanque que se detallan en la Tabla 2.15, fueron aspectos importantes para determinar el volumen de la mezcla de agua con el agente de limpieza para que sea capaz de eliminar las incrustaciones de hormigón en la tubería. Según la aplicación ultrasónica, en este tanque se produce cavitación en la que la presión cae por debajo de la presión

de vapor para provocar que las ondas de presión como de calor desintegren el hormigón fraguado de cada rincón del revestimiento interior de la tubería.

Para garantizar la resistencia del tanque se optó por agregar una estructura base auxiliar de acero (Tabla 2.16) para el soporte total del peso del tanque, el líquido limpiador, el transductor de placa y el tubo con hormigón obstruido, así mismo se añadieron tres pares de ruedas garruchas a esta estructura con la finalidad de facilitar la portabilidad del equipo.

Figura 2.9

Modelo de tanque de fibra de vidrio referencial para inmersión



Tabla 2.15

Caracterización del tanque de inmersión

Material	Fibra de vidrio
Dimensión a*h*l (mm)	300*350*3600
Espesor del tanque (mm)	4
Accesorios	Estructura metálica con tres pares de garruchas para transportabilidad del tanque
	Sistema de drenaje
	Dos soportes internos de fibra de vidrio adheridos al tanque para el tubo de 200*100*150 (mm) cada uno

Tabla 2.16*Caracterización de la base estructural del tanque*

Material	Acero estructural ASTM A-36
Espesor (mm)	4
Dimensiones a*h*l (mm)	318*3618*56
Accesorios	Tres pares de garruchas de 5'' (dos pares móviles y un par fijo)

Transductor ultrasónico de alta potencia: Transductor sumergible (Figura 2.10) es empleado para distribuir uniformemente las ondas longitudinales ultrasónicas transmitidas en el fluido limpiador dentro del líquido del tanque.

El transductor cumpliría con la caracterización de la Tabla 2.17 e internamente presenta la estructura detallada en la Figura 2.11.

Tabla 2.17*Caracterización de transductor ultrasónico aplicable al diseño*

Tipo	Conjunto de transductores tipo placa sumergible de ultrasonido
País de origen	China
Frecuencia [kHz]	28
Potencia ultrasónica [W]	300
Dimensiones [mm]	300*180*100
Material	Acero inoxidable
Peso [kg]	20
Número de transductores internos	12
Uso	Limpiador ultrasónico
Montaje	Sobre los lados o base del tanque de inmersión
Longitud del cable [m]	5

Figura 2.10

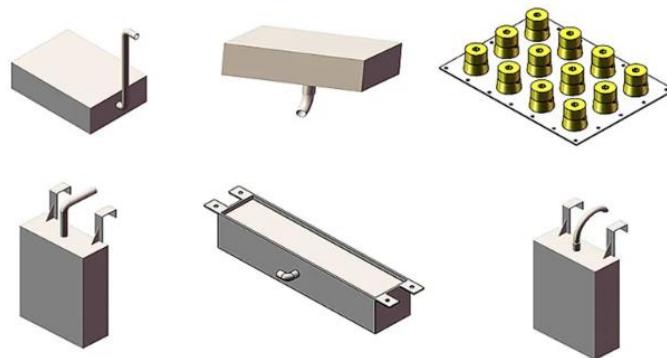
Transductor de inmersión ultrasónica de alta potencia tipo placa



Nota: El modelo ilustrado es de la marca Guangdong Easy Clean de China

Figura 2.11

Componentes del transductor tipo placa



Nota: La ilustración pertenece a la marca Guangdong Easy Clean

Herramienta de izaje: Se planteó usar un tecele hidráulico para el levantamiento y maniobra del tubo obstruido, porque no compromete la ergonomía del operador permitiéndole ejercer una menor fuerza para desplazar verticalmente, sumergir y extraer la tubería después de cada inmersión dentro del tanque. Cabe señalar que se acopló una cadena de acero galvanizado de ¼” con grilletes de agarre al tecele para formar una sola estructura que sujete la tubería. Ver Tabla 2.18.

Tabla 2.18

Caracterización de la herramienta de izaje

Tecele hidráulico de 2 Toneladas	Grilletes de agarre de 10 mm	Cadena de acero galvanizada de 1/4"
		

Generador de ultrasonido: es el responsable de proporcionar la frecuencia de las ondas ultrasónicas adecuadas para garantizar la limpieza efectiva de las tuberías. Ver Figura 2.12.

En la actualidad se trabajan frecuencias desde los 25 kHz hasta 120 kHz, para el diseño del equipo de recuperación de tuberías se trabaja con 25 kHz, porque es la frecuencia más potente que retira las obstrucciones contaminantes más fuertes y resistentes como el hormigón fraguado.

Como las ondas sonoras se contraen y expanden quiere decir que se van a transmitir 25 000 vibraciones por segundo al medio líquido contenido en el tanque. Las especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 2.19.

De acuerdo con (Ricardo, 2023), los generadores de ondas de ultrasonido deben la generación de ondas y la detección de éstas, a la transformación de la corriente alterna en ultrasonido e inversamente.

Figura 2.12*Generador ultrasónico de alta potencia***Tabla 2.19***Caracterización del generador ultrasónico aplicable al diseño*

Modelo	Generador de poder ultrasónico de control digital
País de origen	China
Rango de corriente [A]	0-10
Rango de frecuencia [kHz]	20-160
Rango de potencia ultrasónica [W]	0-300
Pantalla	LCD
Aplicación	Limpieza ultrasónica
Peso [kg]	7
Alimentación	Eléctrica
Dimensiones [mm]	415*315*145
Voltaje [V]	220

Detergente químico limpiador: Las industrias especializadas en equipos de ultrasonido para limpieza industrial expenden estos productos químicos que buscan favorecer el proceso de cavitación dentro del tanque y que su vez sean suaves con la superficie de la tubería. La vida útil de esta solución limpiadora puede ser controlada de acuerdo con su nivel de concentración dentro del agua, cabe acotar que si se busca un proceso más eficaz se puede usar agua desmineralizada. De acuerdo con la siguiente información proporcionada por la empresa ULTRATECNO (Figura

2.13) se seleccionó el detergente de Categoría PDU-45A que es idóneo para aplicar sobre el material de las tuberías, acero, y que son potenciadores de cavitación cuando la remoción es difícil, tal como las partículas de hormigón fraguado. Se recomienda trabajar con agua que se encuentre a temperatura de 70°C a 90°C y con un porcentaje de 0.5-1.5% de concentración del detergente en el agua.

Figura 2.13

Catálogo de detergentes ultrasónicos

	PRODUCTO	MATERIAL	TIPO DE PRODUCTO	CONCENT. en agua (%)	TEMP. de limpieza
OTROS	PDU-201	Aluminio o aleaciones no férricas	Limpieza piezas de motor	0,5-2%	70° - 80°
	PDU-202	Aluminio o aleaciones no férricas	Limpieza piezas de motor	0,5-2%	70° - 80°
	PASIVANTE	Acero, Fundición	Protección temporal contra la oxidación	2-5%	
	HIDROFUGANTE	Acero, Fundición	Repelente al agua y larga protección contra oxidación	100%	
	PDU-45A	Acero, Acero Inoxidable, Fundición	Potenciador de la cavitación ultrasónica para uso conjunto con PDU-45 en aplicaciones difíciles	0,5-1,5%	70° - 90°
	ANTIINCRUSTANTE				40° - 80°
	CARBÓN ACTIVO		Filtro de agua de aclarado		

Nota. Datos tomados de la empresa ULTRATECNO (2024).

La Empresa especialista en productos limpiadores industriales (Ecolkem) suministra en su lista de productos un detergente desengrasante alcalino concentrado que tiene la capacidad de limpiar superficies metálicas ferrosas durante un proceso de inmersión, aspersion o aplicación manual. La formulación de este agente limpiador químico favorece las desincrustaciones de polvo, carboncillo y demás contaminantes de la misma naturaleza sobre las superficies a ser limpiadas, se detalla sus demás características remarcables a continuación (Tabla 2.20).

Tabla 2.20*Atributos del agente limpiador aplicable al equipo ultrasónico*

Nombre del detergente industrial	Desengrasante Industrial MET-104
Naturaleza	Alcalino concentrado
Apariencia	Líquida color ámbar
Densidad a 25°C	1.17 gr/ml
Solubilidad	Completa
Aplicación y Control	Para limpieza por inmersión se llena el tanque con sus dos terceras partes de capacidad con agua, agregar el detergente según se requiera y disolver completamente mediante agitación
Seguridad	Usar guantes de neopreno para manejo del producto. Producto irritante al contacto directo con la piel. Evitar inhalación de vapores del producto.
Manejo	El producto se reserva en un contenedor de 20 litros mínimo. Operación compatible en tanques de inmersión de materiales PVC, CPVC, HDPE y PTFE.

2.2.5. Ecuaciones para diseño 2 del equipo y su metodología de cálculo

Dentro del diseño de los componentes del equipo se requiere el dimensionamiento del tanque de inmersión, parámetros de operación del líquido limpiador (mezcla de agua con detergente industrial) y determinación de parámetros de funcionamiento del sistema ultrasónico, por lo que fue primordial proponer ecuaciones que despejen las variables del equipo y describan el proceso de cavitación responsable de limpiar el objeto sumergido.

Para iniciar la metodología de cálculo se registró como punto de partida los parámetros de diseño señalados por el cliente para el funcionamiento del equipo, luego para hallar las dimensiones del tanque se empleó un análisis dinámico de diseño aplicando las ecuaciones de George W. Housner que analizan al tanque rectangular conteniendo un líquido como un modelo mecánico equivalente conformado por dos partes, la región impulsiva y convectiva del líquido. A

la región ubicada en la parte inferior del tanque se la consideró como una masa impulsiva que se mueve de manera rígida con el tanque, mientras que la región superior correspondió a la masa convectiva que figura estar soportada por resortes a las paredes del tanque y su operación simuló el oleaje del líquido limpiador provocado por la turbulencia de las burbujas en acción de la frecuencia de ultrasonido. De la misma manera, la filosofía de diseño aplicando el Código de Estructuras de Concreto con Ingeniería Ambiental ACI 350.3-06 expuesta por (Rendón, 2018) es aplicable en el diseño del tanque de inmersión, porque en el código se estudia las fuerzas hidrodinámicas de un líquido contenido en un tanque rectangular durante un sismo; lo que análogamente puede representar la cavitación provocada por la frecuencia ultrasónica que será suministrada al líquido limpiador dentro del tanque. Tanto las ondas sísmicas como las ondas sonoras requieren de un medio sólido, líquido o gaseoso para propagarse y transportar la energía de un sitio a otro sin desplazar materia con ellas.

Parámetros del cliente:

Longitud del espacio disponible del cliente para el trabajo: 4 m

Masa del hormigón fraguado en la longitud del tubo: 45 kg

Diámetro interior del tubo: 125 mm

Diámetro exterior del tubo: 133 mm

Longitud del tubo: 3 m

Número de tubos por recuperar: 11 tubos

Tiempo máximo de operación: 24 horas

a) Ecuaciones propuestas para tubo obstruido y el tanque de inmersión:

- Volumen del tubo hueco:

$$volumen_{tubo\ hueco} (m^3) = \pi * longitud_{tubo} * (R^2 - r^2) * 1.0x10^{-9} \quad (2.16)$$

- Masa tubo hueco:

Densidad del acero negro o básico: 7850 kg/m^3

$$masa_{tubo\ hueco} (kg) = volumen_{tubo\ hueco} * \rho_{acero\ básico} \quad (2.17)$$

- Masa tubo obstruido:

Densidad del hormigón endurecido: $2500\ kg/m^3$

$$masa_{tubo\ obstruido} (kg) = masa_{tubo\ hueco} + masa_{hormigón} \quad (2.18)$$

- Volumen total disponible del tanque:

$$Volumen_{disponible} (m^3) = altura\ x\ ancho\ x\ longitud\ del\ tanque\ * 1.0 \times 10^{-9} \quad (2.19)$$

- Volumen disponible para líquido limpiador:

$$Volumen_{líquido} (l) = V_{disponible} - V_{transductor} - V_{tubo\ obstruido} \quad (2.20)$$

- Volumen del detergente: se consideró al 1.5 % de concentración en agua como se señaló en la ficha técnica.

$$Volumen_{detergente} (l) = 0.015 * (Volumen_{líquido}) \quad (2.21)$$

- Masa del agua

$$masa_{agua} (kg) = (Volumen_{líquido} - Volumen_{detergente}) * \rho_{agua} \quad (2.22)$$

- Masa necesaria del detergente:

$$masa_{detergente} (kg) = Volumen_{detergente} * \rho_{detergente} \quad (2.23)$$

- Masa total de la solución limpiadora:

$$masa_{solución} (kg) = masa_{agua} + masa_{detergente} \quad (2.24)$$

- Densidad de la solución:

Densidad del agua: $997\ kg/m^3$

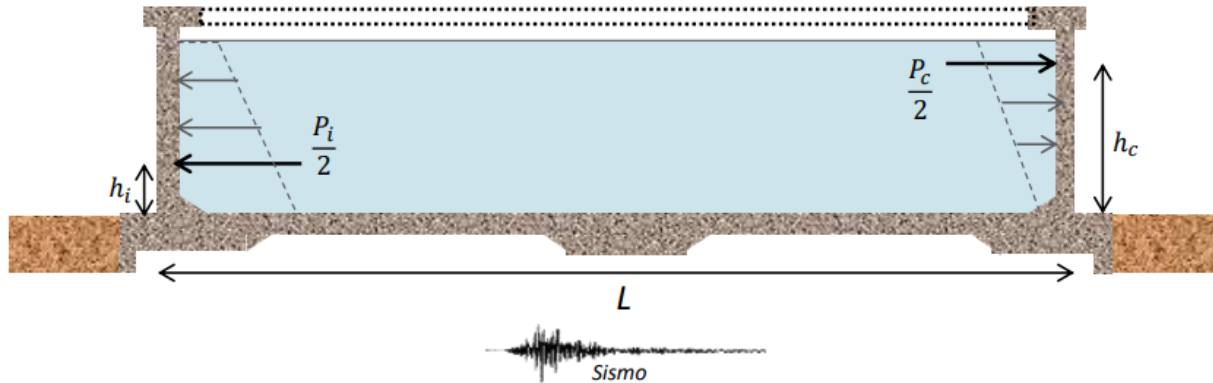
Densidad del detergente: $1170\ kg/m^3$

$$\rho_{solución} (kg/m^3) = \frac{masa\ solución\ limpiadora}{Volumen_{líquido}} \quad (2.25)$$

b) Ecuaciones propuestas para el comportamiento del líquido limpiador:

Figura 2.14

Representación de las Fuerzas impulsiva y convectiva para tanques rectangulares



Nota: La ilustración fue recuperado de SIKA Colombia, en donde la onda sísmica caracteriza el suministro de la onda ultrasónica.

- Peso específico de solución limpiadora:

$$\gamma_{\text{solución}} \text{ (N/m}^3\text{)} = (\rho_{\text{solución limpiadora}}) * g \quad (2.26)$$

Gravedad: 9.81 m/s^2

- Peso solución limpiadora:

$$\text{Peso}_{\text{solución limpiadora}} \text{ (N)} = \text{masa}_{\text{solución}} * g \quad (2.27)$$

- Peso total soporta la base estructural de acero:

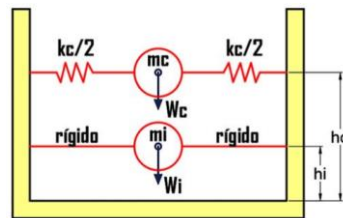
Masa estructura del tanque de inmersión: 17,12 kg

$$\text{Peso}_{\text{base}} \text{ (N)} = (m_{\text{tanque}} + m_{\text{transductor}} + m_{\text{tubo obst.}}) * g + \text{Peso}_{\text{solución limpiadora}} \quad (2.28)$$

Ecuaciones de George W. Housner para análisis dinámico:

Figura 2.15

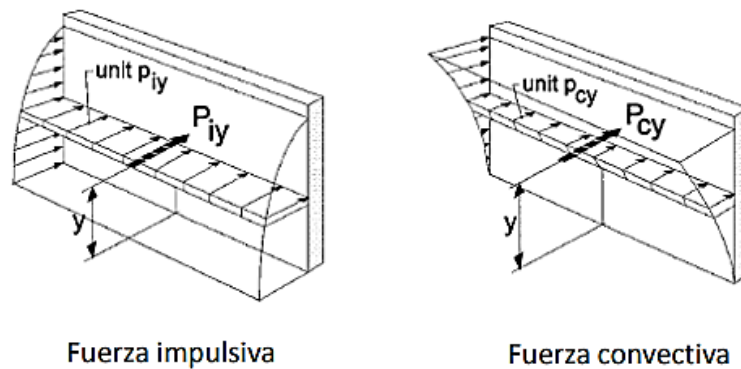
Modelo dinámico equivalente Masa-Resorte



Nota: El modelo dinámico de George W. Housner (1963)

Figura 2.16

Fuerza impulsiva y fuerza convectiva de un líquido



Nota. La figura muestra las fuerzas según análisis dinámico de diseño para contenedores de agua en la Filosofía de Diseño de Sika Colombia.

Peso de la componente impulsiva: El líquido limpiador de la región inferior del tanque está en un movimiento rígido junto a la estructura del tanque, la masa de esta sección del líquido recibe el nombre de masa impulsiva que es la responsable de inducir una presión hidrodinámica impulsiva en las paredes del tanque como en su base.

Altura máxima de la solución: 320 mm

$$P_{comp.impulsiva} (N) = P_{sol. limpiadora} * \left[\frac{\tanh\left(0.866 * \frac{longitud_{tanque}}{altura_{solución}}\right)}{0.866 * \frac{longitud_{tanque}}{altura_{solución}}} \right] \quad (2.29)$$

Peso de la componente convectiva: El líquido limpiador está oscilante durante la cavitación dentro equipo de limpieza, su masa se denomina masa convectiva y se ubica en la región superior del tanque en donde se percibe el chapoteo u oleaje. La aceleración del líquido limpiador en esta sección es mayor a la aceleración del tanque, por lo que esta masa convectiva ejerce una presión hidrodinámica sobre la pared y base del tanque de inmersión.

$$P_{com.convectiva} (N) = P_{sol. limpiadora} * \left[\left(0.264 * \frac{long-tanque}{altura_{solución}}\right) * \tanh\left(3.16 \frac{altura_{solución}}{long-tanque}\right) \right] \quad (2.30)$$

- Altura correspondiente al peso de la componente impulsiva:

$$Como \frac{longitud_{tanque}}{altura_{solución}} \geq 1.33 \rightarrow h_i(m) = 0.375 * altura_{solución} \quad (2.31)$$

Altura correspondiente al peso de la componente convectiva:

$$h_c(m) = altura_{solución} * \left[1 - \frac{\cosh\left(3.16 * \frac{altura_{solución}}{long-tanque}\right) - 1}{3.16 * \left(\frac{altura_{solución}}{long-tanque}\right) * \sinh\left(3.16 * \frac{altura_{solución}}{long-tanque}\right)} \right] \quad (2.32)$$

c) Ecuaciones propuestas para el sistema ultrasónico:

Frecuencia f: se emplea una frecuencia de onda ultrasónica de 25 kHz dada su aplicación en limpieza industrial de alta potencia.

Longitud de la onda:

$$\lambda_{receptor} = \frac{velocidad\ de\ la\ onda}{f} \quad (2.33)$$

Ecuación del Efecto Doppler: determina la frecuencia final que recibe la tubería obstruida con hormigón al sumergirla en el tanque, frecuencia que fue emitida desde la fuente generadora de ultrasonido. Existen tres situaciones aplicables para la recepción de frecuencia ultrasónica al tubo dentro del tanque debido a los movimientos que se puedan ejercer por el operador para agilizar el proceso de limpieza, se detalla a continuación:

Caso 1: Cuando la fuente de la frecuencia emisora se aproxima al objeto en estudio independientemente de la ubicación izquierda o derecha.

$$f_o = f * \left(\frac{v_s}{v_s - v_f} \right) \quad (2.34)$$

f: frecuencia emitida por el generador de ultrasonido

v_s: velocidad del sonido corresponde a $340 \frac{m}{s}$

v_o: velocidad del receptor en reposo

v_f: velocidad de la fuente con signo negativo porque la dirección de emisión está dada desde la fuente hacia el objeto receptor.

Caso 2: Cuando la fuente de la frecuencia emisora se aleja del objeto en estudio:

$$f_o = f * \left(\frac{v_s}{v_s + v_f} \right) \quad (2.35)$$

Caso 3: Cuando la fuente de la frecuencia emisora y el objeto en estudio se acercan simultáneamente:

$$f_o = f * \left(\frac{v_s + v_o}{v_s - v_f} \right) \quad (2.36)$$

Para los tres casos, la frecuencia recibida promedio resultó del mismo valor ya que el tubo no tiene movimiento dentro del tanque dado su posicionamiento en los apoyos y en el caso de moverse, su valor es despreciable y no repercute en la captación de las ondas ultrasónicas.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1. Resultados del diseño 1 del equipo mecánico

3.1.1. Resultados de simulación

Autodesk Inventor emplea una metodología de análisis por elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés) para evaluar el comportamiento estructural de los modelos 3D.

- **Definición del Modelo:** Se importa o crea el modelo 3D en Inventor.
- **Aplicación de Condiciones de Borde:** Se definen las condiciones de frontera, cargas y restricciones.
- **Generación de Malla:** Inventor genera automáticamente una malla sobre el modelo.
- **Solución del Problema:** El software resuelve el sistema de ecuaciones que describe el comportamiento del modelo bajo las condiciones especificadas.
- **Post-Procesamiento:** Los resultados del análisis (esfuerzos, deformaciones, etc.) se visualizan y se interpretan utilizando las herramientas de visualización de Inventor.

El programa tiene una gama de colores utilizada en los resultados de simulación, esta sigue una codificación específica para representar diferentes magnitudes de las variables analizadas:

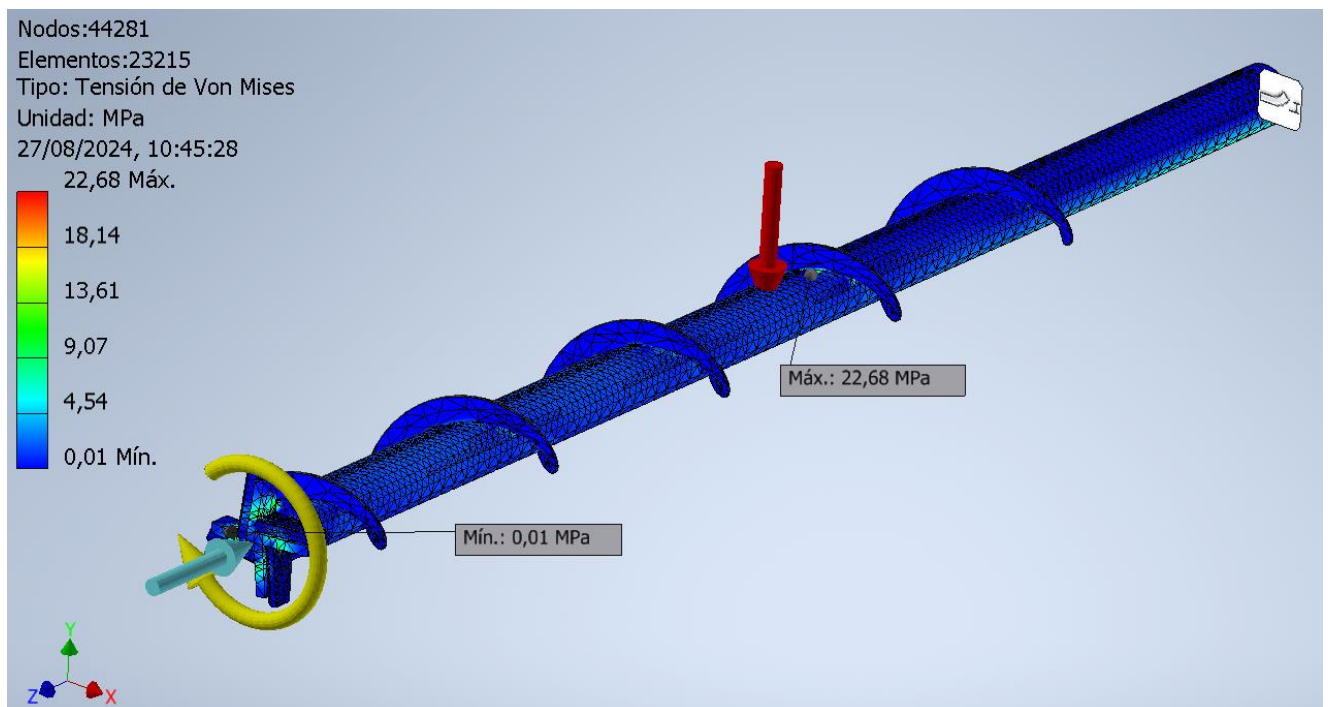
- **Colores rojos:** Indican las áreas de máxima deformación o esfuerzo, lo cual es crítico para la integridad estructural.
- **Colores azules:** Representan las áreas de menor deformación o esfuerzo, donde el diseño es más robusto.
- **Colores verdes y amarillos:** Muestran rangos intermedios de deformación o esfuerzo, proporcionando una visión general de las zonas que requieren optimización.

3.1.2. Esfuerzo de Von Mises del equipo

El esfuerzo de Von Mises es una medida importante para evaluar la resistencia del material bajo condiciones de carga complejas. Los resultados del análisis muestran que el esfuerzo de Von Mises en la broca alcanza un valor máximo de [valor específico] MPa. Esta carga máxima se localiza en [ubicación específica, por ejemplo, "la base de los dientes de corte"]. Los valores de esfuerzo de Von Mises se distribuyen de manera no uniforme, indicando zonas de concentración de esfuerzos que deben ser reforzadas para mejorar la durabilidad del diseño. La distribución de estos esfuerzos se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3.1

Esfuerzo de Von Mises de equipo



3.1.3. Deformación

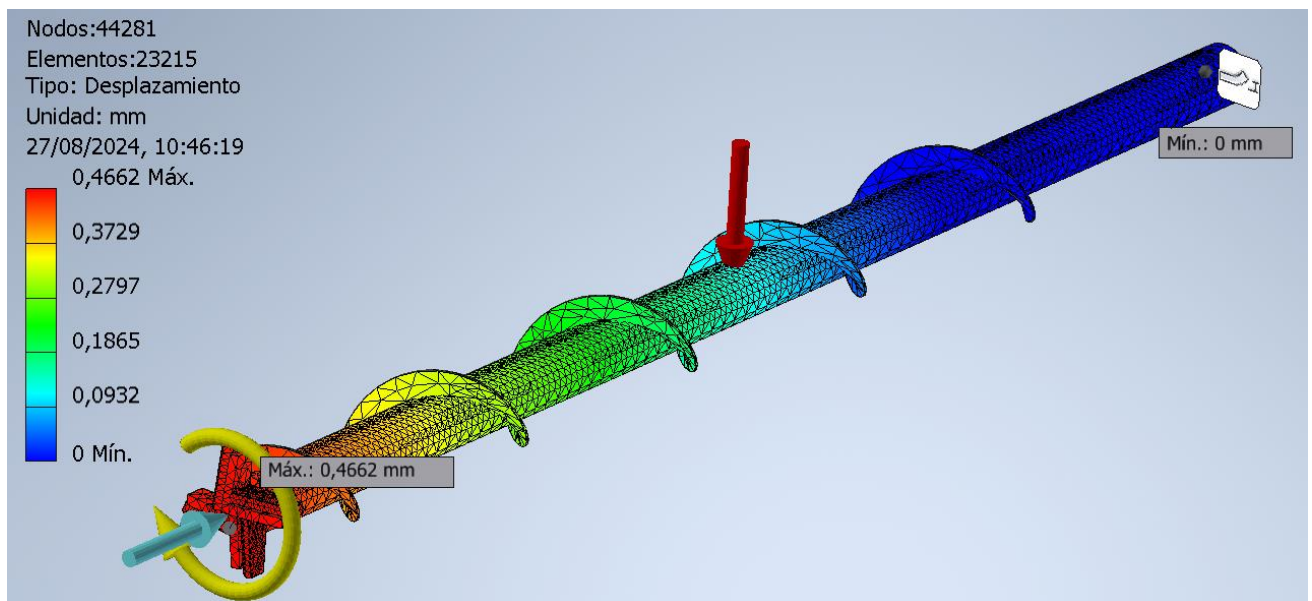
La evaluación de la deformación de la broca fue realizada utilizando el software Autodesk Inventor. Los resultados muestran que la broca experimenta una deformación máxima de [valor específico] mm bajo las condiciones de operación simuladas.

Esta deformación se produce principalmente en la punta de la broca y en las zonas de mayor concentración de fuerzas debido a la interacción con el hormigón fraguado.

La distribución de la deformación a lo largo de la broca se ilustra en la Figura 3.2, donde se observan áreas críticas que requieren una atención especial en el diseño para evitar fallos estructurales durante el uso.

Figura 3.2

Esfuerzo de Deformación de equipo



3.1.4. Factor de Seguridad

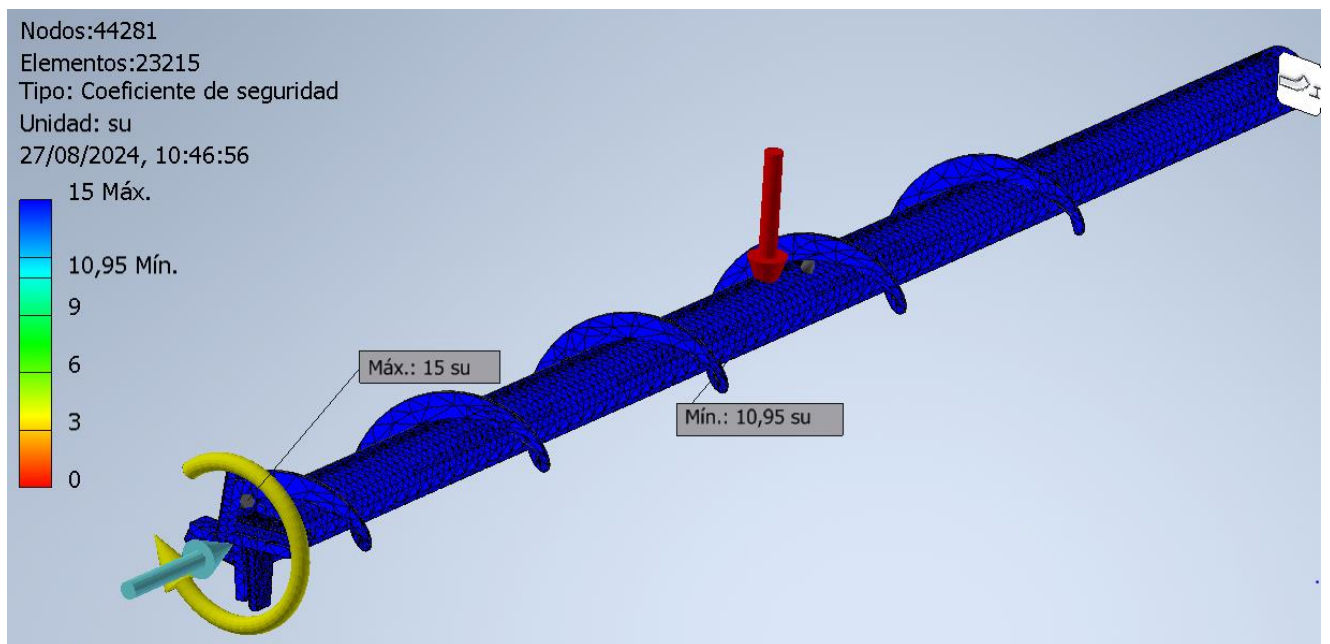
El factor de seguridad es un criterio esencial para asegurar que la broca pueda soportar las cargas de operación sin fallar. Se calculó un factor de seguridad promedio de [valor específico] basado en los esfuerzos de Von Mises y las propiedades del material de la broca.

El análisis indica que el factor de seguridad es adecuado en la mayoría de las áreas, aunque se observa una reducción en ciertas zonas críticas, como [ubicación específica].

Las áreas con factores de seguridad inferiores a [valor específico] están identificadas en la Figura 3.3, lo que sugiere la necesidad de realizar ajustes en el diseño para aumentar la seguridad y la fiabilidad de la broca.

Figura 3.3

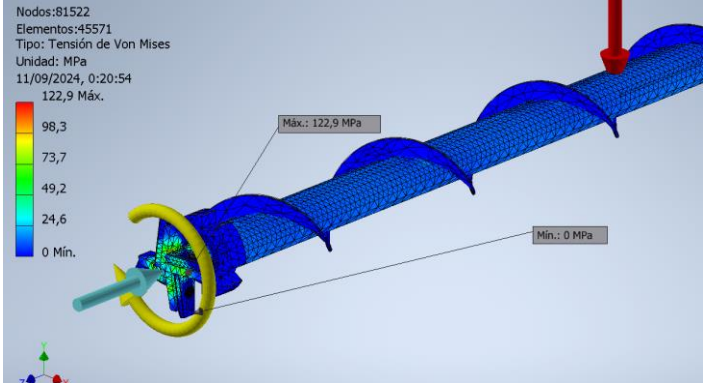
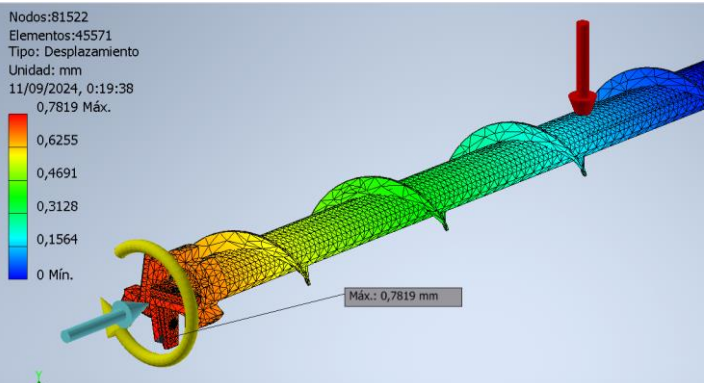
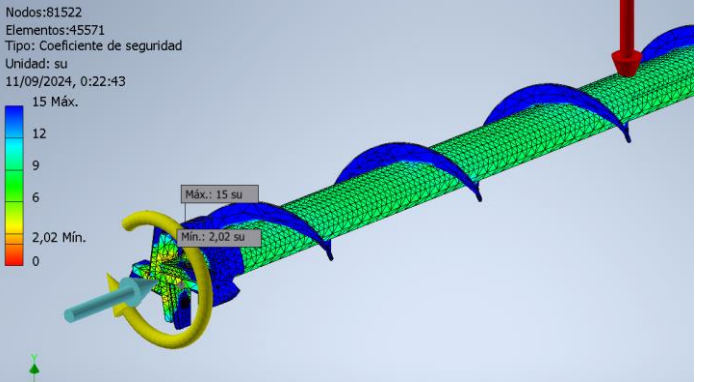
Esfuerzo de Factor de Seguridad del equipo



A continuación, en la tabla 3.1, se muestra el resumen de los resultados más relevantes y los límites mecánicos del equipo. Este último fue sometido a una carga de compresión de 60,000 N y a un momento de 274 N·mm.

Tabla 3.1

Resultados del programa de simulación

TIPO ESFUERZO	DE	IMAGEN SIMULADOR	VALOR
Tensión Máxima de Von Mises		 <p>Nodos:81522 Elementos:45571 Tipo: Tensión de Von Mises Unidad: MPa 11/09/2024, 0:20:54 122,9 Máx. 98,3 73,7 49,2 24,6 0 Min. Máx.: 122,9 MPa Min.: 0 MPa</p>	122.90 MPa
Desplazamiento Máximo		 <p>Nodos:81522 Elementos:45571 Tipo: Desplazamiento Unidad: mm 11/09/2024, 0:19:38 0,7819 Máx. 0,6255 0,4691 0,3128 0,1564 0 Min. Máx.: 0,7819 mm</p>	0.78 mm
Mínimo Factor de seguridad		 <p>Nodos:81522 Elementos:45571 Tipo: Coeficiente de seguridad Unidad: su 11/09/2024, 0:22:43 15 Máx. 12 9 6 2,02 Mín. 0 Máx.: 15 su Min.: 2,02 su</p>	2.02

En la siguiente tabla (Tabla 3.2) se observan los resultados obtenidos de los cálculos teóricos.

Tabla 3.2

Resultados de los cálculos teóricos

Descripción	Valor	Unidad	Número de ecuación
<i>Área de corte</i>	0.0098	m^2	2.1
<i>Resistencia de corte</i>	0.5	<i>MPa</i>	2.2
<i>Fuerza de corte</i>	4900	N	2.3
<i>Torque</i>	274.4	<i>Nm</i>	2.4
<i>Potencia del motor</i>	12.5	<i>Hp</i>	2.5
<i>Área de sección transversal</i>	0.00283	m^2	2.6
<i>Momento de Inercia</i>	3.09×10^{-7}	m^4	2.7
<i>Tensiones debido al torque</i>	1.467	<i>MPa</i>	2.8
<i>Esfuerzo de Von Mises</i>	18.03	<i>MPa</i>	2.9
<i>Velocidad de corte</i>	24	mm/min	3.0
<i>Tiempo de Limpieza</i>	62.5	<i>min</i>	3.1
<i>Flujo masico</i>	1.00	<i>MPa</i>	3.2
<i>Flujo volumétrico</i>	0.18	<i>MPa</i>	3.3
<i>Paso de hélice del sin-fin</i>	0.35	<i>m</i>	3.4
<i>Factor de seguridad</i>	4.7	N/A	3.5

3.1.5. Análisis de resultados

Tabla 3.3

Resultados de los esfuerzos teóricos y modelados

Descripción	Esfuerzo de Von Mises	Unidad	Número de ecuación
Cálculo teórico	18.03	<i>MPa</i>	3.0
Modelado 3D	20.22	<i>MPa</i>	-

Para determinar si el análisis es correcto se realiza una comparación entre el resultado obtenido mediante las ecuaciones y los resultados de la simulación.

El **error absoluto** se calcula como la diferencia entre el resultado obtenido en la simulación y el resultado teórico:

$$Error\ absoluto = |Resltado\ simulacion - Resultado\ teorico|$$

$$Error\ absoluto = 2.19\ MPa$$

Para el error relativo se utiliza la siguiente formula:

$$Error\ Relativo = \frac{2.19\ MPa}{18.03\ MPa} \times 100\%$$

$$Error\ Relativo = 12.15\ \%$$

Dando como resultado un error relativo del 12.15 % lo que indica que en la simulación el resultado obtenido fue un 12.15 % mayor que el resultado teórico.

Esto puede deberse a que el cálculo teórico se simplifico al análisis de un tubo, sin considerar una distancia dada por el porta-cuchillas, esto por manejabilidad de los cálculos.

La simulación considera mayor detalle, ya sea los datos de entrada de las propiedades del material y las geometrías de la pieza.

Debido a que la diferencia no es muy significativa y se comprende debido a lo ya mencionado, se llega a la conclusión de que el análisis realizado es correcto

3.1.6. Evaluación Estructural

El diseño del equipo fue sometido a un análisis de tensiones utilizando el criterio de Von Mises para evaluar la integridad estructural. Los resultados muestran que la tensión de Von Mises en todos los componentes del diseño se mantiene por debajo del límite elástico de los materiales seleccionados. Esto indica que el equipo operará dentro de los límites de elasticidad de los materiales, asegurando que no se produzcan deformaciones plásticas durante su funcionamiento.

- **Tensión de Von Mises:** La máxima tensión calculada fue significativamente menor que el límite elástico de los materiales.
- **Integridad Estructural:** No se observó ninguna indicación de deformación plástica en el diseño, lo que confirma la estabilidad y resistencia del equipo bajo condiciones normales de operación.

3.1.6.1. Selección del Motor. El motor seleccionado para el equipo de perforación tiene una potencia nominal de 12.5 hp. La elección del motor se realizó considerando los requisitos específicos de torque y RPM necesarios para la perforación efectiva.

Criterios de Selección:

- **Torque Requerido:** El motor proporciona el torque necesario para realizar perforaciones según las especificaciones del diseño.
- **RPM:** La velocidad del motor es adecuada para las RPM requeridas por el proceso de perforación, garantizando eficiencia y rendimiento óptimo.

3.2. Resultados del diseño 2 del equipo empleando tecnología ultrasónica

3.2.1. Diseño mecánico de los componentes del diseño 2 del equipo

El diseño del equipo de recuperación de tuberías con hormigón fraguado en base a un sistema de ultrasonido por inmersión satisfizo cuatro de seis requerimientos iniciales señalados por parte del cliente tales como la mantenibilidad, vida útil, factibilidad y operatividad, porque tanto los componentes diseñados como los que demandan ser importados pueden ser adquiridos en el mercado en el caso de necesitarse ser remplazos, del mismo modo la disposición de un generador ultrasónico propio, un transductor de placa y el detergente industrial que no es perecible son elementos del sistema ultrasónico que a pesar de que el costo de adquisición sea representativo, es capaz de ser competitivo en relación a futuros costos de mantenimiento de otros equipos netamente mecánicos porque son instrumentos que se pueden conservar y permanecer prestos cuando el cliente lo demande; únicamente se debe preparar el sistema manualmente que con la intervención de un solo operador es suficiente.

Es menester mencionar que después del análisis inicial comparativo de las tres alternativas presentadas, la matriz de decisión determinó que la alternativa con ultrasonido de inmersión fue ideal por la obtención del puntaje más alto en los criterios de seguridad durante la operación, portabilidad al ser fácil de instalar y correcta gestión ambiental por el ahorro de agua como la reutilización de los escombros residuales de hormigón posterior de un enjuague final.

Los componentes del equipo de recuperación comprenderían en un tanque de inmersión de fibra de vidrio de 4 mm de espesor con tapa con su respectivo sistema de drenaje compuesto por una válvula de bola de $\frac{3}{4}$ " y su adaptador de $\frac{3}{4}$ ", tres pares de ruedas garruchas de 4" de diámetro (un par fijo y dos pares móviles) que soporten el peso total del líquido limpiador, del transductor de placa, la tubería y el mismo tanque de inmersión, por otro lado está el sistema de ultrasonido para limpieza de alta potencia descrito en el párrafo anterior y la incorporación de una herramienta

de izaje compuesta por tecele hidráulico, una cadena de eslabón $\frac{1}{4}$ " y tres grilletes de agarre que permitan sujetar y sumergir el tubo de acero obstruido al líquido. Ver Figura 3.4.

Mediante el software de diseño Autodesk Inventor Professional 2023, se llevó a cabo la representación del equipo con sus componentes y en el Apéndice A del Diseño 2 se detallan el plano correspondiente.

Figura 3.4

Diseño inicial del equipo de recuperación de tubería con sus componentes

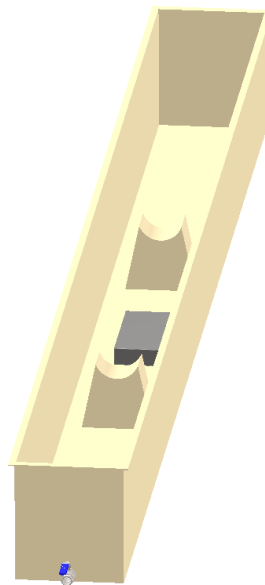


Figura 3.5

Rediseño del tanque de inmersión con fibra de vidrio

**Figura 3.6**

Tanque de fibra de vidrio con sus elementos interiores



Nota: apoyos internos para colocar la tubería obstruida, sistema de drenaje en la cara frontal y el transductor tipo placa

Figura 3.7

Base estructural de acero con garruchas para colocar el tanque de inmersión



Figura 3.8

Vista inferior del equipo con su base estructural de acero

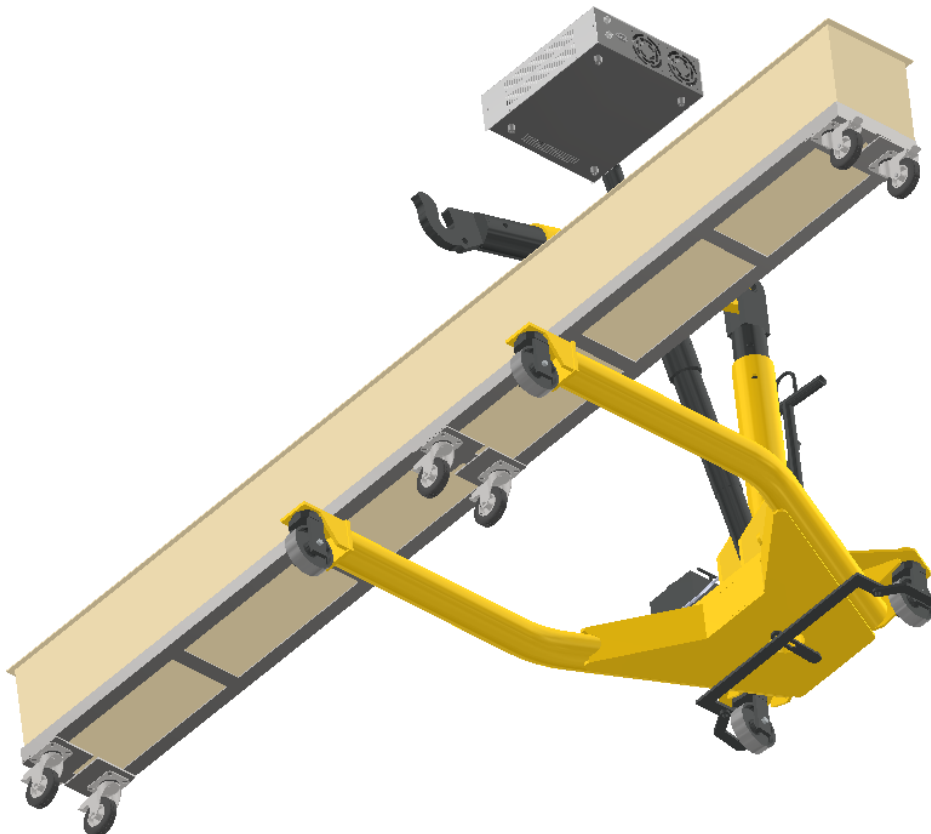


Figura 3.9

Diseño del equipo de recuperación con tecnología ultrasónica



En el diseño presentado (Figura 3.9) se consideró un tubo obstruido para sumergir dentro del tanque de inmersión, esto para conseguir un proceso de limpieza ultrasónica eficiente a lo largo de la estructura de la tubería, es importante que el tanque contenga los litros de líquido limpiador suficientes para cubrir por completo el tubo y así haya disponibilidad del efecto de burbujeo por cavitación homogéneamente sin rebozar los 350 mm de la altura del tanque.

La herramienta de izaje implementada eleva, sumerge y ubica la tubería sobre los dos apoyos internos de fibra de vidrio que incluye el tanque en su interior, el tubo se fija estable durante el proceso de limpieza mientras el transductor que previamente se colocó en el fondo central del tanque emite la frecuencia de ultrasonido.

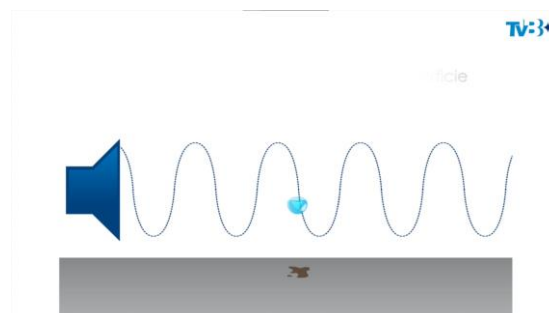
La limpieza ultrasónica de alta potencia iniciaría con el ajuste de la frecuencia de suministro de 25 kHz en el generador de ultrasonido, esta frecuencia emisora viajará por la sonda ultrasónica que se conecta al transductor de placa, en donde la frecuencia será distribuida uniformemente al propagarse en forma de ondas ultrasónicas hacia el líquido limpiador y por consiguiente al objeto inmerso.

El medio líquido que no es otra cosa que una mezcla de agua tibia más el detergente industrial permitirá la propagación uniforme de la frecuencia de onda para ser recibida sobre toda la superficie del tubo obstruido, así mismo las burbujas de cavitación actuarán como choques directos sobre el hormigón expuesto en las caras de entrada y salida del tubo removiendo las primeras partículas de hormigón. Sin embargo, es indispensable sumergir todo el tiempo necesario hasta conseguir que se desintegre las partículas de la capa de hormigón adyacente al revestimiento interior de la tubería. Si bien es cierto, el detergente industrial es un químico removedor de impurezas que no atraviesa el material de la tubería por más tiempo de inmersión al que sea sometida, no obstante, se recomienda revisión constante durante el proceso de limpieza por parte del operador siempre utilizando un par de guantes de neopreno y el Equipo de Protección Personal correspondiente.

En el canal de la red social Youtube, (Christeyns TV, 2015) ilustra de forma concisa el proceso de cavitación (Figura 3.10) dentro del tanque de inmersión durante limpieza ultrasónica con aplicación microbiológica para un equipo de la marca Betelgeux.

Figura 3.10

Vista previa ilustrativa del video de Cavitación Ultrasónica



3.2.2. *Análisis de costos del diseño 2*

El costo de construcción del tanque de inmersión con su sistema de drenaje se consideró una inversión en el mercado nacional, como, la adquisición de tecele hidráulico con la cadena y los grilletes correspondientes, pero, los componentes del sistema ultrasónico tanto el generador de ultrasonido, transductor tipo placa y el detergente limpiador requerirán adquiridos mediante importación considerando los costos adicionales por esta gestión. Se sugirió considerar a México, España, China y Alemania como los principales países vendedores de equipos de limpieza ultrasónica dado su desarrollo exponencial en la actualidad, en cuanto a equipos de limpieza industrial con tecnología de inmersión ultrasónica.

El diseño del equipo propuesto es una alternativa asequible al ser contrastado con la adquisición de un equipo completo importado, porque se determinó que el costo por el diseño del equipo redujo el precio de compra en un 38 % con respecto a una de las opciones más completas de limpiadores ultrasónicos de alta potencia disponibles en el mercado por el valor total de \$3827,00; la línea de dispositivos en cuestión es de origen chino de la empresa (Guangdong Easy Clean Ultrasonic Tech Co., Ltd.). Esta empresa oferta la máquina a través de la plataforma de ventas (Alibaba) por el costo de \$3300 correspondiente al equipo y un adicional de \$527,00 por el costo del envío dando como resultado la inversión total, sin embargo, la propuesta del equipo se diseñó por el costo total de \$2348,23 considerando la fabricación de la base estructural y el tanque de inmersión con su respectiva tapa en el taller de fibra de vidrio “Fibracal” y taller de soldadura “Espinoza”, establecimientos en la ciudad de Guayaquil, de acuerdo con la cotizaciones realizadas en el presente año (Apéndice B, Tabla D4).

Para mayor contextualización del análisis de costos se desarrolló el Apéndice B en donde constan las Tablas de desglose (Tabla D1- Tabla D3) detallando costos de los componentes del diseño, mano de obra y el costo total del diseño.

3.2.3. Ecuaciones metodológicas aplicadas

A partir de las ecuaciones propuestas en el capítulo de la metodología del diseño se resolvió cada criterio que parametrizaron el dimensionamiento del tanque de inmersión, el comportamiento del líquido limpiador y la interacción que este tiene con el objeto a ser sumergido al suministrarse la frecuencia de ultrasonido desde el generador de ondas ultrasónicas, por consiguiente en la Tabla 3.4 se resumen las ecuaciones, valor numérico obtenido en el desarrollo de cada ecuación, unidades correspondientes y el número de ecuación que corresponde en el capítulo 2.

Tabla 3.4

Resultados de las ecuaciones metodológicas del diseño

Descripción	Valor	Unidad	Número de ecuación
Volumen tubo hueco	0,0049	m^3	2.16
Masa tubo hueco	38,18	kg	2.17
Masa tubo obstruido	83,18	kg	2.18
Volumen disponible del tanque	0.345	m^3	2.19
Volumen solución limpiadora	331.6	l	2.20
Volumen del detergente	4,97	l	2.21
Masa del agua	325,62	kg	2.22
Masa del detergente	5,82	kg	2.23
Masa total solución limpiadora	331,44	kg	2.24
Densidad de la solución limpiadora	999,52	kg/m^3	2.25
Peso específico de la solución	9805,29	N/m^3	2.26
Peso de la solución limpiadora	3251,43	N	2.27

Peso total que soporta la base estructural para el tanque	4431,57	<i>N</i>	2.28
Peso componente impulsiva de la solución	333,74	<i>N</i>	2.29
Peso componente convectiva de la solución	2643,32	<i>N</i>	2.30
Altura componente impulsiva	0,12	<i>m</i>	2.31
Altura componente convectiva	0,16	<i>m</i>	2.32
Longitud de onda	14	<i>mm</i>	2.33
Frecuencia recibida por el tubo	24,50	<i>kHz</i>	2.34

3.2.4. Plan de limpieza post operacional y reutilización de escombros del diseño 2

3.2.4.1. Tratamiento post operacional para las tuberías recuperadas.

Una vez que se ha ejecutado la limpieza de las tuberías con hormigón fraguado empleando la tecnología de ultrasonido, se busca retirar el hormigón residual y prolongar la vida útil del material de la tubería brindándole un oportuno proceso de enjuague. A continuación, se detallan algunos métodos empleados para las tuberías:

Piqueteo: Es un método que funciona en conjunto con la propulsión con un raspador móvil a través de la tubería, el hormigón retirado en el interior sería empujado por este raspador que puede propulsarse por un líquido como el mismo líquido limpiador resultante del tanque de inmersión ultrasónico. Es indispensable que durante este proceso de limpieza se pueda predecir un tiempo, de manera que el operador cuente con una estimación de la cantidad de velocidad que debe aplicar para controlar el raspador en su trayecto hasta el final de la tubería.

El raspador realiza tareas de limpieza de tubería, inspección y mantenimiento, por lo que pueden variar su tamaño y forma dependiendo del material del que se elabore y su objetivo de uso,

por ejemplo, para limpiar tuberías con sustancias corrosivas, líquidos, separación de líquidos con escombros o para detectar defectos en la estructura interna de la tubería.

Los parámetros de tipo de material y de forma son más importantes que la masa y la longitud en el diseño de los raspadores, por lo que es un método de limpieza rentable para tuberías de diámetros superiores, que es económico, sin embargo, podría requerir mucho tiempo y si no se ejecuta correctamente puede provocar daños a la tubería recuperada.

Hidro lavado: El método hidrojet puede eliminar material residual y desechos sólidos incluso hormigón, donde el agua a una elevada presión elimina los escombros y los retira totalmente de la tubería, la misma que puede tomar tamaños variados. La limpieza se hace con máquinas hidro limpiadoras eléctricas de agua, con 15 CV de potencia. Las buenas características de caudal y presión hacen que estos equipos sean ideales para llevar a cabo el lavado y desinfección, según (Bahón Silverio, 2019).

Chorro de arena: El chorro de arena es empleado en la limpieza de las tuberías mediante arena o diferentes tipos de abrasivos que se puede sustituir con arena sílice, bicarbonato de sodio, escoria de cobre, granalla de acero, etcétera. Es esencial contar con aire comprimido que permita realizar este procedimiento, de manera que la propulsión de partículas de abrasión viaje a velocidades altas a través de la boquilla y limpie el concreto residual de la tubería.

El proceso de chorro de arena se lleva a cabo a una presión fija de la boquilla de 5 bares y un ángulo de presión de 90°, y a distancias variables de la boquilla a la superficie a 15, 25 y 30 cm, y duraciones de chorreado de 25, 45 y 120 s. (Muslimin, 2020)

Se considera un método rentable y eficiente porque puede alcanzar una limpieza de las zonas con difícil acceso o depósitos de hormigón de remover que no fueron retirados después de la limpieza ultrasónica. Por otro lado, abusar de este método de limpieza puede provocar daños en la tubería, ser costoso y requerir operadores especializados.

Soplado de vapor

La operación de soplado consiste en inyectar aire o vapor a presión dentro de la línea, lo que permite el transporte y remoción de suciedad, limalla y viruta que puede permanecer en el interior de la tubería, dejando el sistema libre para una operación de limpieza más profunda.

Es necesario realizar un lavado posterior al soplado de las tuberías con el producto que va a circular por ellas o un producto afín, para obtener un recubrimiento de la pared interior del tubo y evitar una posterior oxidación. (Muñoz & Martínez, 2013)

Este método de limpieza para la tubería permite eliminar hasta las impurezas más pequeñas que no se perciben hasta que se presenta problemas en las operaciones regulares. La industria de gas y petróleo como la generadora de energía emplea normalmente este método descrito, ya que extiende la vida útil de las tuberías a medio plazo.

Por otro lado, el tiempo de operación de este método es mayor que el de servicio de remoción de residuos por otros métodos, así mismo requiere que los operadores tengan dominio y experticia y considerar el factor económico por cada operación debido al alto consumo de energía.

3.2.4.2.Reutilización de escombros resultantes de la limpieza ultrasónica.

Según (Cemex Ventures, 2023), el hormigón es la segunda sustancia más empleada en la actualidad y uno de los residuos más representativos de la industria de la construcción en conjunto con los residuos de demolición y excavación, por lo que surge la necesidad del correcto manejo de estos resultantes para reducir el impacto de la huella de carbono. Esta preocupación por el manejo responsable de residuos de hormigón generado en la búsqueda de su aprovechamiento tiene sustancial relación con los residuos de hormigón fraguado obtenidos después del manejo del equipo de recuperación mediante limpieza ultrasónica de alta potencia, porque se planteó la reutilización de los escombros residuales en nuevos proyectos de renovación o construcción.

De acuerdo con la resistencia del material obstruyente en las tuberías, se planteó dirigir el hormigón a proyectos de viviendas sociales para que se pueda reutilizar como parte de rellenos en la planicie de suelos que presenten desniveles para la completa estabilización de cimientos, así también en la construcción de muros de contención mediante en la fabricación de bloques de hormigón, emplearlo en construcción de plataformas, pavimentación en áreas de estacionamiento. En cuanto a obras civiles, se puede emplear el hormigón reciclado en conformar las bases de la construcción de carreras, puentes y mantenimiento de aceras.

Cuando el hormigón reciclado se somete a un proceso de trituración, posterior a la eliminación de contaminantes del detergente químico mediante enjuagues previos; se contribuye a una economía circular en donde se puede aprovechar este material en rellenos sanitarios, zanjas para servicios públicos, lechos de tuberías, emplearse en pavimentación permeable y formar parte de la preparación de hormigón premezclado.

Las ventajas del hormigón reciclado será la reducción de residuo vertedero, disponer de un hormigón más ligero reciclado, la reducción de la necesidad de uso de recursos naturales finitos y la disminución del costo de producción del hormigón premezclado.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Diseño 1 del equipo empleando un sistema mecánico

4.1.1. Conclusiones

Tras aplicar las fases necesarias de la propuesta utilizando el software Autodesk Inventor y validar los resultados mediante ecuaciones teóricas, se obtienen las siguientes conclusiones primordiales:

- El equipo modelado puede remover el hormigón sin dañar las tuberías, y la estructura soporta las cargas a las que está sometida durante el trabajo.
- Además, tanto las tuberías como el hormigón removido pueden ser reutilizados, lo que reduce el impacto ambiental y los costos de reposición
- El análisis mecánico determinó que el eje soporta un torque 10 veces superior al necesario para remover el hormigón en el interior de las tuberías.
- El área de corte cubre el 90% del diámetro de las tuberías, lo que elimina la necesidad de un tratamiento de limpieza posterior.
- El motor ha sido calibrado con la ayuda de un variador de frecuencia para proporcionar el torque necesario, asegurando un funcionamiento efectivo sin sobrecargar el equipo.

4.1.2. Recomendaciones

- **Monitoreo Continuo:** Aunque los resultados son positivos, se recomienda realizar monitoreos periódicos durante el funcionamiento para asegurar que las condiciones operativas se mantengan dentro de los parámetros seguros.
- **Mantenimiento Preventivo:** Implementar un programa de mantenimiento preventivo para el motor y los componentes estructurales para prolongar la vida útil del equipo y evitar fallas imprevistas.

4.2. Diseño 2 del equipo empleando tecnología ultrasónica

4.2.1. Conclusiones

Después de aplicar las fases indispensables para detallar la propuesta del diseño 1 de un equipo de recuperación de tuberías con hormigón empleando tecnología ultrasónica se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se discriminó tres alternativas para el diseño del equipo de recuperación de tuberías, lo que concluyó que el uso de la tecnología de ultrasonido es un método de limpieza industrial en el que sí es posible diseñar un equipo limpiador de menor costo en relación con los altos costos de los modelos disponibles en el mercado.
- Se concluye que el proceso de limpieza en el diseño del equipo de recuperación de tuberías con tecnología de ultrasonido es ideal cuando se trabaja con una frecuencia baja, porque así se remueve grandes cantidades de suciedad de la pieza sumergida, tal como se pretende desprender partículas de hormigón del tubo.
- El diseño que emplea ondas ultrasónicas es una propuesta que se puede amortizar a largo plazo consiguiendo un ahorro en mano de obra, seguridad para el operador y promover el uso de tecnología ecológica preservando recursos.
- Se simuló el equipo de recuperación de tubos empleando un software de diseño que mostró el aspecto de los componentes del equipo y la interacción entre ellos en la dinámica del funcionamiento, de esta manera se sugiere al cliente la futura adquisición de elementos nacionales e importados que sean de su interés.
- Se concluyó que el tiempo del sumergimiento de la tubería obstruida con hormigón fue de 3 horas dentro del tanque de inmersión y que el hormigón resultante está en la capacidad de ser destinado en obras sociales para el beneficio de la comunidad.

4.2.2. *Recomendaciones*

Para esta sección se detallan aspectos que surgieron de las conclusiones obtenidas del diseño 2 del equipo de recuperación de tuberías, así mismo se abordan sugerencias que contempla el estudio de la limpieza de cavitación ultrasónica:

- Se recomienda mantener continuidad en el estudio de la cavitación limpiadora de objetos con similitud de condiciones de las tuberías de acero para bombas hormigoneras, ya que se puede innovar equipos con costos más accesibles a la clientela.
- Un aspecto limitante para la implementación de un equipo por limpieza de ondas de ultrasonido es el precio que puede llegar a tener los elementos del sistema en cuestión, por lo que se recomienda fomentar nuevas propuestas apoyadas desde otras disciplinas académicas como la electricidad, la programación y ciencia de los materiales.
- Ejecutar una perforación longitudinalmente sobre el hormigón de la tubería antes de ser sumergida al tanque para garantizar el alcance de las ondas ultrasónicas dentro del tubo y agilizar el proceso de cavitación en menos tiempo de operación.
- Se recomienda añadir adicionalmente dos o tres transductores tipo placa en el interior distribuidos a lo largo del tanque de inmersión para generar un medio limpiador con mayor cavitación, considerando que el costo del equipo se incrementará significativamente.

4.3. Conclusión y Recomendación General

4.3.1. Conclusión General

En conclusión, el diseño basado en tecnología ultrasónica (Diseño 2) se ha demostrado como la opción más eficiente para la limpieza de tuberías con hormigón fraguado. Este sistema no solo mejora significativamente la eficacia del proceso de limpieza, sino que también reduce los riesgos y la fatiga de los operadores. Además, al comparar los costos operativos y de mantenimiento, el diseño ultrasónico resulta ser la alternativa más económica. Por lo tanto, el sistema de tecnología ultrasónica se presenta como la opción más viable y óptima para el cliente, ofreciendo una solución efectiva y económica para la limpieza de tuberías en bombas hormigoneras.

4.3.2. Recomendación General

- **Optimizar el Proceso de Cavitación:** Para mejorar la efectividad del sistema, se aconseja realizar una perforación longitudinal en el hormigón de la tubería antes de sumergirla en el tanque. Esto garantizará un mejor alcance de las ondas ultrasónicas dentro del tubo y acelerará el proceso de cavitación, reduciendo el tiempo de operación.
- **Ajustar el Diseño del Sistema:** Se sugiere considerar la adición de dos o tres transductores tipo placa distribuidos a lo largo del tanque de inmersión para incrementar la cavitación del medio limpiador. Aunque esto podría elevar el costo del equipo, el incremento en la eficacia de la limpieza podría justificar la inversión adicional.

Referencias Bibliográficas

- ACI304, C. (2017). *Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete*.
- ACI-318, C. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*. American Concrete Institute.
- Alberto, I. M. (1955). *Concreto, Teoría elemental del concreto reforzado*. Editorial Herrero; Quinta Edición.
- Alibaba. (2024). *Ultrasonic Cleaning Machine*. Obtenido de https://www.alibaba.com/product-detail/38L-2000L-Lifting-System-Industrial-Automotive_1601132760613.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.4e98590adkcYG2&s=p
- Bahón Silverio, R. (Junio de 2019). *Universidad de Valladolid*. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/38107/TFG-O-1634.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: Novena Edición.
- CAIZA PÁEZ, , & M. I. L. T. O. N. . (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ULTRASONIDO PARA LIMPIEZA DE INYECTORES DE GASOLINA (Bachelor's thesis, Quito)*.
- Cemex Ventures. (Junio de 2023). *Hormigón reciclado, una solución ecológica para la construcción*. Obtenido de <https://www.cemexventures.com/es/hormigon-reciclado/>
- Christeyns TV. (29 de Junio de 2015). *Higiene por cavitación - HPC*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=-1iW4fCyh7I>

- Ecolkem. (2024). *Desengrasante Industrial MET-204*. Obtenido de Ecolkem Your Process Partner: <http://www.ecolkem.com/Productos/Fichas/Detergente-Industrial-MET-104>
- Falabella. (2024). *Broca Copa Diamantada concreto hormigón*. Obtenido de <https://www.falabella.com/falabella-cl/product/113065738/Set-3-Broca-Copa-Diamantada-Concreto-Hormigon-40-65-100/113065739>
- GANTTPRO. (27 de Marzo de 2024). *La matriz de decisiones para hacer una selección acertada*. Obtenido de <https://blog.ganttpro.com/es/matriz-de-decision/>
- Gogate, P. R., & Wilhelm, A. M. (2015). *Advanced Cleaning Product Formulations*. CRC Press.
- Grech, P. (2013). *INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA*. Colombia: PEARSON.
- Grupo CDE. (2024). *Reciclaje de hormigón triturado*. Obtenido de <https://www.cdegroupp.com/es/aplicaciones/reciclaje-de-residuos/hormigon-triturado>
- Guangdong Easy Clean Ultrasonic Tech Co., Ltd. (s.f.). *Máquinas de Inmersión Hidroeléctricas*. Obtenido de <https://yijieultrasonic.en.alibaba.com/index.html?spm=a2700.details.0.0.3c05738bDS9jwT&from=detail&productId=1601132760613>
- HILTI. (2024). *CORONA DD 250-CA*. https://www.hilti.com.co/c/CLS_POWER_TOOLS_7125/CLS_DIAMOND_CORING_7125/r9021697.
- Kemet International Ltd. (2024). *La guía definitiva para la limpieza ultrasonido*. Obtenido de <https://www.kemet-international.com/mx/productos/limpieza-de-precision/la-guia-definitiva-para-la-limpieza-ultrasonido>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th Edition. Portland Cement Association.
- Linares, M. (julio de 2014). *Universidad de San Carlos de Guatemala*. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1440_Q.pdf

- Made in China. (2023). *Transductor de inmersión de vibración ultrasónica de alta potencia para partes industriales ultrasónico Limpieza*. Obtenido de https://es.made-in-china.com/co_clangsonic/product_Strong-Power-Ultrasonic-Vibrating-Immersible-Transducer-for-Industrial-Parts-Ultrasonic-Cleaning_ysrruuoogg.html
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2012). *Concreto: Microestructura, Propiedades y Materiales*. Limusa.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
- Morteza H., S., Saeed, C., & Mir, M. E. (19 de Julio de 2019). *ScienceDirect*. Obtenido de <https://pdf.sciencedirectassets.com/272413/1-s2.0-S0888327019X00114/1-s2.0-S0888327019304376/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEB8aCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIG8luvXbHvU%2B0XyQA4y0NVwZuCQB1olhNGpIc%2Bj8UFp6AiEAwcRkJHJK5H8omPI9FxRU5%2FO1V5aEFxjOJiTYkk>
- Muñoz, A., & Martínez, E. (2013). *Academia*. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40764237/medicion_de_tuberia-libre.pdf?1450139204=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMedicion_de_tuberia.pdf&Expires=1718337824&Signature=VBVAZioxQghZ8OEgiE-b5BwlRf1EdZz4e12~a05O5QEOgHj4L9~AE0R8M9jATXU
- Muslimin, M. (21 de Octubre de 2020). *Journal of Engineering Research*. Obtenido de <https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/10091>
- Neville, A. (2012). *Properties of concrete Fifth Edition*. Edinburgh: Pearson Education Limited.
- Neville, A. M. (1996). *Properties of Concrete*. Pearson Education.
- Nistal, Á., Retana, M., & María, R. (2012). El hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia. *Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*, 13.

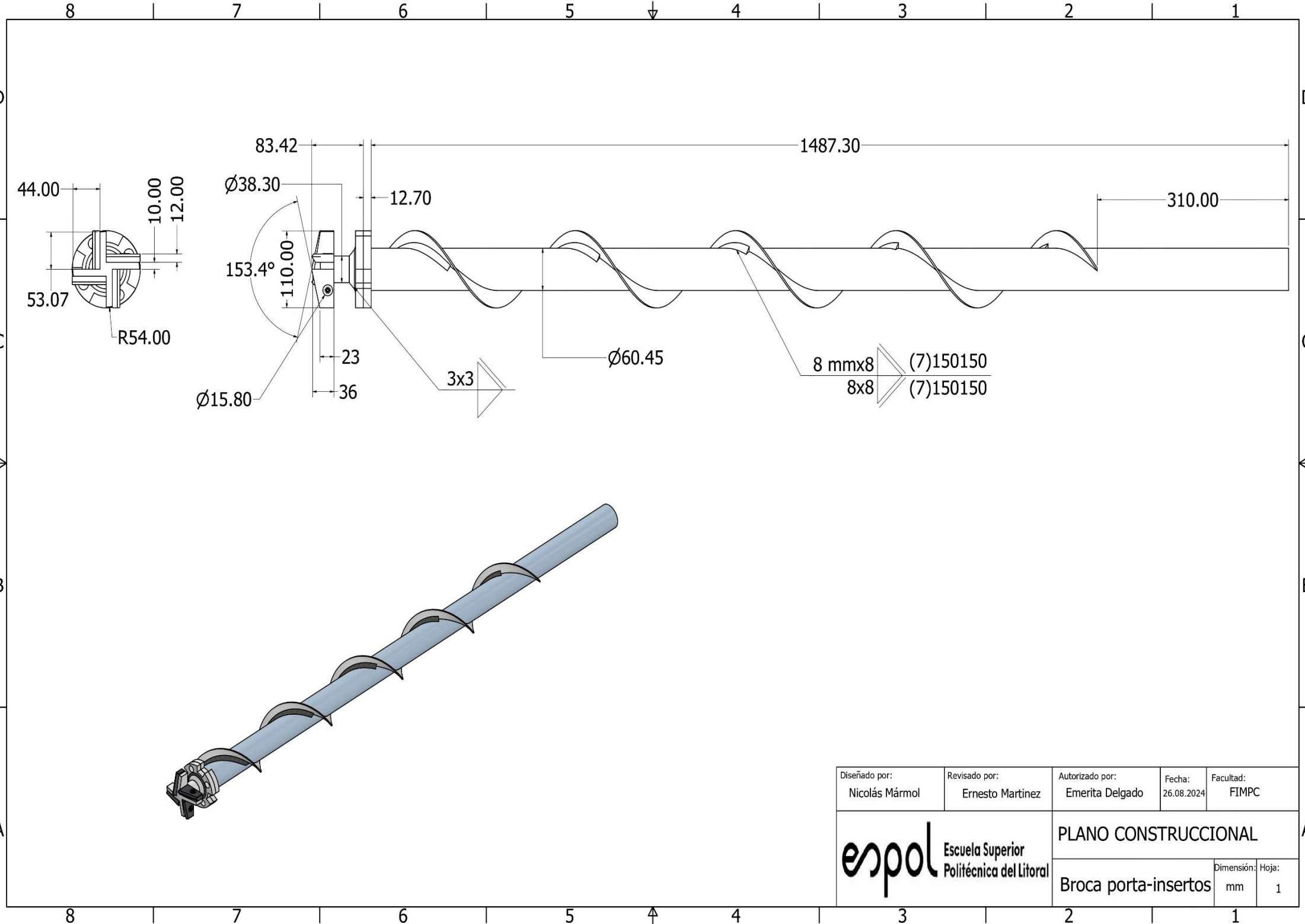
- Nuñez Heredia, J. J., & Villamar Martínez, E. C. (2017). Diseño e implementación de un prototipo de limpieza por medio de ultrasonido (Bachelor's thesis).
- Orihuela, J., & Sánchez, N. (30 de Diciembre de 2016). *Diseño Estructural de tanques rectangulares y sus aplicaciones*. Obtenido de Revista Ingenium de la Universidad Continental: <https://journals.continental.edu.pe/index.php/ingenium/article/view/440>
- Pontigo, R., & Amezola, R. (27 de Octubre de 2006). *CENAM*. Obtenido de IMPLANTACIÓN DE TÉCNICAS DE ULTRASONIDO POR INMERSIÓN: <https://www.cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Octubre%2026/Bloque%20C/C2-Vibraci%20y%20Ultrasonido/C2-3.pdf>
- PressureJet. (2018). *HIGH PRESSURE HYDRO JETTING*. Obtenido de https://pressurejet.com/Images/Library/pdf/Hydro_Jetting_Machine_Catalogue.PDF
- Rendón, J. (Julio de 2018). *¿Por qué se presentan fallas y reclamos en piscinas y tanques?* Obtenido de Silka Colombia: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/7f5cad1-204b-3e46-b116-16a13b68e26d/PRESENTACION%20PISCINAS%20Y%20TANQUES.pdf>
- Ricardo, R. (12 de Abril de 2023). *Estudiando*. Obtenido de <https://estudiando.com/ondas-ultrasonicas-propiedades-usos-y-ejemplos-que-es-una-onda-ultrasonica/>
- Romea, C. (2014). *El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario*. OmniaScience Monographs.
- Site and Field Internacional. (2024). *Site and Field Internacional*. Obtenido de <https://siteandfield.com/blog/que-es-el-hormigon-tipos-usos-en-la-construccion/>
- TETRA Technologies, Inc. (1 de Octubre de 2019). *TETRA AdvanceClean Scraper Tool*. Obtenido de <https://onetetra.com/download/advanceclean-scraper-tool/?wpdmdl=3151&refresh=667b43dc15a541719354332>

- VEVOR Tough Tools, Half Price. (2024). *VEVOR Diamond Core Drilling Machine*. Obtenido de https://www.vevor.com/diamond-core-drilling-machine-c_11001/vevor-wet-dry-diamond-core-drill-machine-concrete-core-drill-rig-2500w-750rpm-p_010669518954?utm_skip=google_one_tap_status_1
- Videla, C. &. (2000). *Análisis del impacto de los parámetros de dosificación en la retracción hidráulica de hormigones*. *Revista ingeniería de construcción*, 15(2), 102-112.
- Wang, Y., Xie, Y., & Wang, H. (2018). *Ultrasonic cleaning: mechanism and application*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 225-243.
- Zariefeh, U. (21 de Enero de 2013). *Repositorio Institucional de la Universidad Central de Venezuela*. Obtenido de <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/2447/1/Trabajo%20Especial%20de%20Grado.pdf>

Apéndices

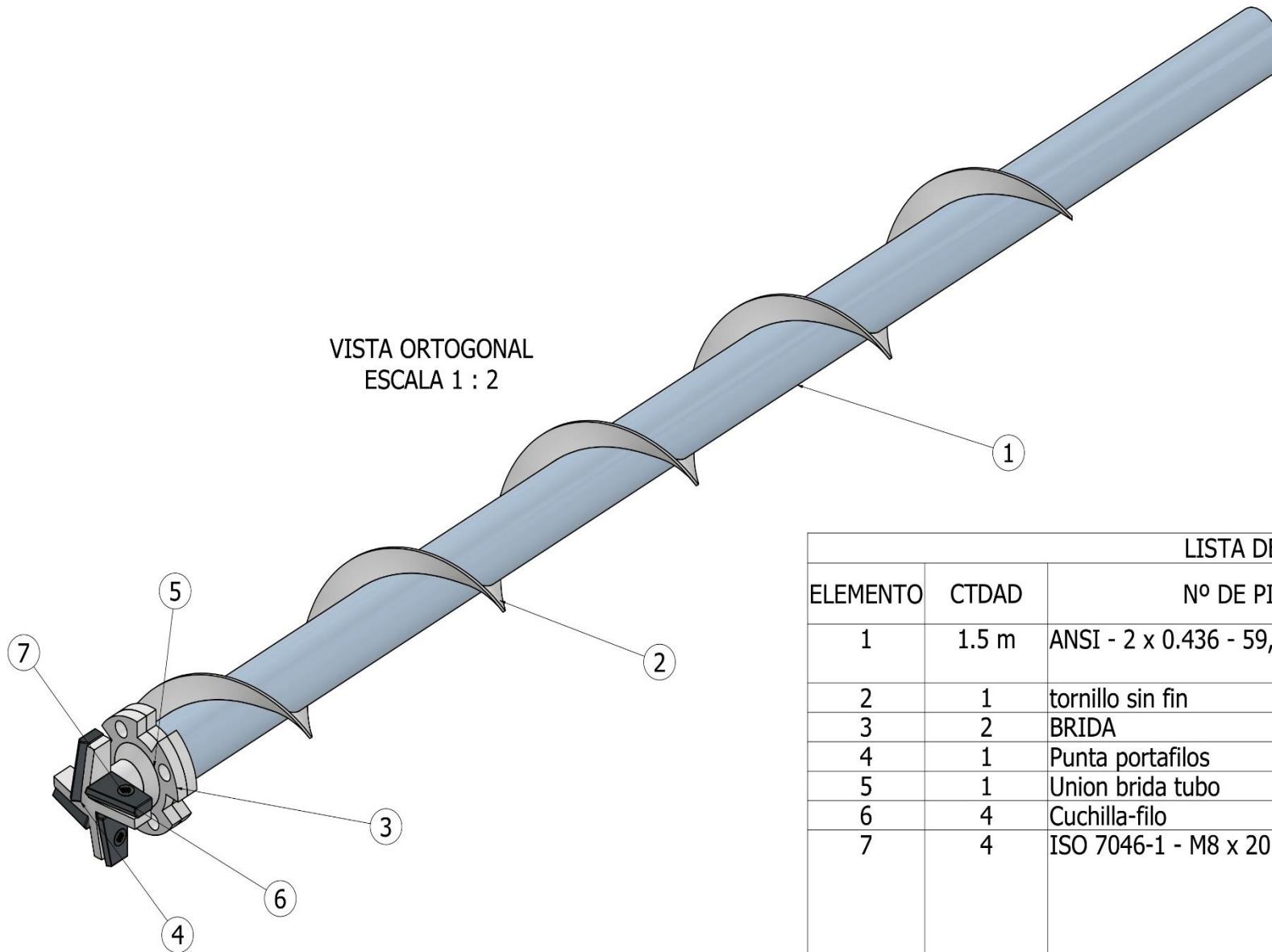
Apéndice A del Diseño 1

Planos mecánicos de la solución mecánica



Diseñado por: Nicolás Mármol	Revisado por: Ernesto Martínez	Autorizado por: Emerita Delgado	Fecha: 26.08.2024	Facultad: FIMPC
		PLANO CONSTRUCCIONAL		
		Broca porta-insertos	Dimensión: mm	Hoja: 1

VISTA ORTOGONAL
ESCALA 1 : 2



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1.5 m	ANSI - 2 x 0.436 - 59,055	Tubería 2" cedula 80. Acero ASTM A36
2	1	tornillo sin fin	
3	2	BRIDA	ANSI/ASME B16.5
4	1	Punta portafilos	Acero ASTM A36
5	1	Union brida tubo	Soldado con 7018
6	4	Cuchilla-filo	Carburo de Tungsteno
7	4	ISO 7046-1 - M8 x 20 - 4.8 - Z	Tornillos de cabeza plana avellanada (cabeza común) con hueco cruciforme tipo Z

Diseñado por: Nicolás Mármol	Revisado por: Ernesto Martinez	Autorizado por: Emerita Delgado	Fecha: 26.08.2024	Facultad: FIMPC
---------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	----------------------	--------------------

	PARTES DEL EQUIPO	
	Broca porta-insertos	Dimensión: Hoja: mm 1

Tubo de 2 pulgadas cedula 80



TUBO 2" X 6M CÉDULA 80 DE ACERO NEGRO ASTM A106 SIN COSTURA

\$73.45

-

- 1 + [Añadir al carrito](#)

[Comprar x WhatsApp](#)

SKU: TUB-2"-CÉDULA 80-A106-ECO

Categorías: [TUBERÍA](#), [TUBO ACERO NEGRO A106 CÉDULA 80](#)

Motor de 12.5 Hp



[Productos](#) ▾ [Servicios](#) ▾ [Alquiler](#) ▾ [Proyectos](#) ▾ [Catálogos](#) [Contacto](#) [Identificarse](#)



Productos / MOTOR 12.5 HP 132M 2P 3F 220/440 IP 55 IE2 WEG

MOTOR 12.5 HP 132M 2P 3F 220/440 IP 55 IE2 WEG

\$ 708.11

Motor trifásico 12.5HP
3600 rpm
IE2



1

[AGREGAR AL CARRITO](#)

En existencias

[AGREGUE PARA COMPARAR](#) [AGREGAR A MI LISTA](#)



Poleas reductoras



Almacén Principal: KM 7.5 VIA DAULE C.C. ARANJUEZ LOTE 1, LOCAL A-9
PBX: 005934-2650282 / 2651543 / 2261247 CEL- 0999593397

Sucursal: KM. 2.5 J.T. MARENGO C.C. SEPROPISA LOCALES 10 - 11

PBX: 005934-2923008 / 2923101 CEL. 0998152650

e-mail: ventas@transtencia.com - tvera@transtencia.com - administracion@transtencia.com

R.U.C. 0992732075001



Señor:			Ciudad:		COTIZACION		
HOLCIM			GUAYAQUIL		24/1/5265		
Atención:			Vendedor:				
ING. NICOLAS MARMOL			ING. LUIS MORENO - CELL: 0987738891				
Día	Mes	Año	Fecha de Entrega		Validez de la Oferta	Condiciones de Pago	
13	9	2024	INMEDIATO		5 DIAS	CONTADO	
UNIDAD	CANT.	DESCRIPCION			VR. UNIT.	DCTO.	VR. TOTAL
UND	1	POLEA SPB 150 X 2 CANALES + BUJE 1610 CHALLENGE AGUJERO MAX PERMISIBLE: 38mm			124,82	30%	87,37
UND	1	POLEA SPB 450 X 2 CANALES + BUJE 3020 CHALLENGE			513,67	30%	359,57
SUBTOTAL						638,49	
DSCTO.						191,55	
SUBTOTAL						446,94	
IVA						-	
TOTAL						446,94	

Apéndice C del Diseño 1

CALCULOS TEORICOS

Para brocas de grandes diámetros se recomienda bajas revoluciones debido al sobrecalentamiento y desgaste al que se somete el material.

- Por esto, se recomienda un rango de revoluciones de 300 a 600 RPM.
- La fuerza a compresión (f_c) obtenida en el laboratorio de forma práctica es de 5 MPa.
- La fuerza cortante es mucho menor que la fuerza a compresión del hormigón, por lo que se considera que es el 10% de la fuerza de compresión.
- El diámetro de la tubería es de 127 mm o 5" y el espesor de la tubería es de 6 mm, lo que deja un diámetro interno de 115 mm.

Cálculo de esfuerzos de la broca

Área de corte

Es la sección transversal que está en contacto con el hormigón, se asume como área de corte el área proyectada por las cuchillas al momento de girar, es decir un área circular.

$$A_c = \pi \times r^2 \quad (2.1)$$

$$A_c = \pi \times \left(\frac{0.112}{2}\right)^2 \quad (2.1)$$

$$A_c = 0.0098 \text{ m}^2 \quad (2.1)$$

Resistencia al corte

Como se observó en la Tabla 1 el esfuerzo a compresión es de 5 MPa, se considera que el esfuerzo de corte es el 10% de este valor por lo que:

$$\sigma_c = 0.1 \times \sigma'_{comp} \quad (2.2)$$

Donde:

σ_c = Resistencia de corte [MPa]

σ'_{comp} = Resistencia de compresión [MPa]

$$\sigma_c = 0.5 \text{ MPa} \quad (2.2)$$

Fuerza de corte

$$F = \sigma_c \times A_c \quad (2.3)$$

$$F = 4900 \text{ N} \quad (2.3)$$

Torque

$$T = F \times r \quad (2.4)$$

$$T = 4900 \times 0.056 \quad (2.4)$$

$$T = 274.4 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.4)$$

Potencia del motor

Considerando 300 RPM

$$W = T \times RPM \quad (2.5)$$

$$W = 12.5 \text{ hp} \quad (2.5)$$

Tensión de Von Mises

Por simplificación de cálculos se consideró el tubo como una sola geometría.

Área de sección transversal

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \quad (2.6)$$

D_{ext} = Diámetro exterior [mm]

D_{int} = Diámetro interior [mm]

$$A = \frac{\pi}{4} \times (0.127^2 - 0.112^2) \quad (2.6)$$

$$A = 0.00283 \text{ m}^2 \quad (2.6)$$

Momento de Inercia (J)

$$J = \frac{\pi}{32} \times (D_{ext}^4 - D_{int}^4) \quad (2.7)$$

$$J = 3.09 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \quad (2.7)$$

Tensiones debido al torque (τ)

$$\tau_t = \frac{T}{J \times r} \quad (2.8)$$

r = Radio externo

$$\tau_t = 1.467 \text{ MPa} \quad (2.8)$$

Esfuerzo de Von Mises

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_t^2} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{vm} = 18.03 \text{ MPa} \quad (2.9)$$

Velocidad de corte

$$V_a = N \times a \quad (3.0)$$

V_a = velocidad de avance [mm/min]

N = velocidad de rotación [RPM]

a = avance por revolución [mm/rev]

$$V_a = 300 \times 0.08 \quad (3.0)$$

$$V_a = 24 \text{ mm}/min \quad (3.0)$$

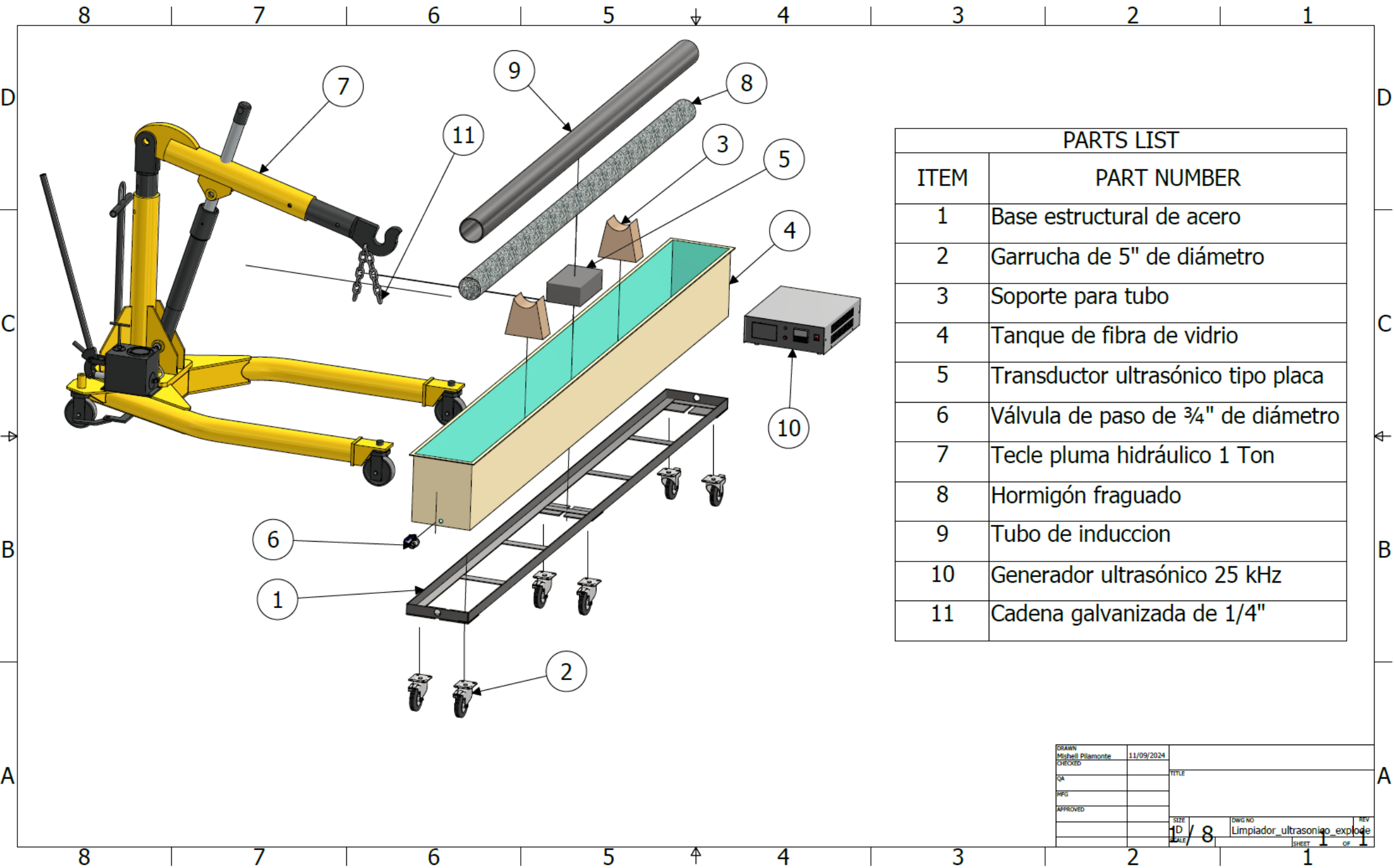
El tiempo de limpieza en un tubo de 3 metros es de:

$$t = \frac{\textit{distancia}}{V_a} \quad (3.1)$$

$$t = 62.5 \textit{ minutos} \quad (3.1)$$

Apéndice A del Diseño 2

Plano mecánico del equipo de recuperación empleando tecnología ultrasónica



PARTS LIST	
ITEM	PART NUMBER
1	Base estructural de acero
2	Garrucha de 5" de diámetro
3	Soporte para tubo
4	Tanque de fibra de vidrio
5	Transductor ultrasónico tipo placa
6	Válvula de paso de 3/4" de diámetro
7	Tecla pluma hidráulico 1 Ton
8	Hormigón fraguado
9	Tubo de induccion
10	Generador ultrasónico 25 kHz
11	Cadena galvanizada de 1/4"

DRAWN	Mishell Pilamonte	11/09/2024	
CHECKED			
QA			TITLE
MFG			
APPROVED			
SIZE	1D	DWG NO	Limpiador_ultrasonico_explode
SCALE	1/8	REV	1 OF 1
		SHEET	1 OF 1

Apéndice B del Diseño 2

Costo para el diseño del equipo de recuperación empleando tecnología ultrasónica

Tabla D.1

Costos de los componentes del diseño 2 de equipo de recuperación de tuberías en el año 2024

Tipo de costo	Descripción	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Precio de envío	Precio total
Componentes del equipo	Tanque de inmersión de fibra de vidrio de 4mm de espesor con tapa	Fibracal	1	\$530.00	NA	\$530.00
	Válvula esférica estándar cromo H-H de ¾" FV	Kiwi S.A.	1	\$6.57	NA	\$6.57
	Adaptador para tanque de ¾"	Kiwi S.A.	1	\$3.29	NA	\$3.29
	Generador de ultrasonido de alta potencia	Easy Clean Alibaba	1	\$300.00	\$34.30	\$334.30
	Transductor de inmersión ultrasónico -Placa	Easy Clean Alibaba	1	\$599,00	\$458.00	\$1057.00
	Tecele hidráulico	Ferretería León	1	\$199.00	NA	\$199.00
	Grillete de agarre de 10 mm	Kiwi S.A.	3	\$0.94	NA	\$2.82
	Cadena de acero galvanizado de ¼' metro	Kiwi S.A.	2	\$4.89	NA	\$9.78
	Detergente químico limpiador PDU-45 ^a	Alibaba	1	\$50.00	NA	\$50.00
					Subtotal	\$1863.85
					I.V.A. (15%)	\$328.91
					TOTAL	\$2192.76

Tabla D.2

Costos de la base estructural para el tanque de inmersión del diseño 2

Tipo de costo	Descripción	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Precio de envío	Precio total
Construcción base estructural del tanque	Platina de acero ASTM A-36 de 2x3/16 pulgadas, por metro	Comisariato del constructor	1.5	\$2.50		\$3.75
	Ángulo de acero de 2x2x3/16 pulgadas, por metro		8	\$3.50		\$28.00
	Placa de acero 15x15x6 mm		6	\$2.00		\$12.00
	Garruchas giratorias con pedal 5"	Kiwi S.A.	2	\$4.68		\$9.36
	Garruchas giratorias sin pedal 5"	Kiwi S.A.	2	\$2.61		\$5.22
	Garruchas fijas de 5"	Kiwi S.A.	2	\$5.32	NA	\$10.64
	Mano de obra para base estructural	Taller de soldadura Espinoza	1	\$86.50		\$86.50
					Subtotal	\$132.15
					I.V.A. (15%)	\$23.32
					TOTAL	\$155.47

Tabla D.3*Costo total del equipo de recuperación de tubos obstruidos del diseño 2*

Tipo de costo	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio de envío	Precio total
Componentes del equipo	Costo de la adquisición del tanque de inmersión, sistema de drenaje, transductor tipo placa, generador ultrasónico y herramienta de izaje	1	\$2192.76	N. A	\$2192.76
Construcción base estructural del tanque	Costo por la elaboración de la base estructural soporte para el tanque de inmersión	1	\$155.47	N. A	\$155.47
				Subtotal	\$1996.00
				I.V.A. (15%)	\$352.23
				TOTAL	\$2348.23

Tabla D.4

Cotización de Taller Fibracal para elaboración de Tanque de fibra de vidrio del diseño 2

Nº. 00001
08 DE AGOSTO DE 2024

COTIZACIÓN

COTIZACIÓN
Srta. Rosa Pilamonte Olmus
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Lucia Porres de Janer
Guayaquil, Ecuador

EMPRESA
Taller de fibra de vidrio "Fibracal"
Responsable: Técnico. Walter Avelino Alcívar
Km. 8.5 Vía Daule, entrando por la Academia
Alm. Illinworgh
Guayaquil, Ecuador

Descripción	Precio
Tanque de fibra de vidrio de 5mm espesor, incluido tapa	\$ 655.00
Tanque de fibra de vidrio de 4mm espesor, incluido tapa	\$ 530.00
Tanque de fibra de vidrio de 5mm espesor, sin tapa	\$ 575.00
Tanque de fibra de vidrio de 4mm espesor, sin tapa	\$ 450.00

*Tiempo de entrega: 5 días laborables

Subtotal	\$ 1878.50
IVA	\$ 331.50
TOTAL	\$ 2210.00

METODO DE PAGO
Efectivo

Ciente

Técnico. Walter Avelino Alcívar
Cel.0993075037