

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**ESTUDIO PREDICTIVO DE LA CORROSIÓN EN LAS INSTALACIONES Y
EQUIPOS DE PERFORACIÓN DE LAGEO S.A DE C.V**

PRESENTADO POR:
ERNESTO ALEXANDER DUBÓN GUEVARA
JULIO CÉSAR ZECEÑA LANDAVERDE

PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 2022.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

INGA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRIOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título:

**ESTUDIO PREDICTIVO DE LA CORROSIÓN EN LAS INSTALACIONES Y
EQUIPOS DE PERFORACIÓN DE LAGEO S.A DE C.V**

Presentado por:

**ERNESTO ALEXANDER DUBÓN GUEVARA
JULIO CÉSAR ZECEÑA LANDAVERDE**

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente Asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

San Salvador, Enero 2022.

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente Asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

DEDICATORIA

De manera especial le dedico este trabajo de aplicación culminado a:

Primeramente a Dios, ya que sin su excelente iluminación en mi camino, no hubiera podido terminar mis estudios universitarios con las mismas energías y sabiduría que él me dio. Me dio la salud, la vida y la tranquilidad para no sentirme aún más presionado en su momento. Fue mi guía espiritual por todo este camino.

A mis padres, quienes fueron siempre una vital ayuda para mí, por seguir creyendo en mi cuando yo no lo hice, a mi padre Ernesto Armando Dubón, que en paz descansa, por ser la persona que tenía como ejemplo de superación en el ámbito profesional y es la persona en la que yo me quisiera convertir. A mi madre, Doris Guevara, que de igual forma por su sacrificio junto con su esposo, Ismael Palma, y mi hermano Emilio Dubón, me hicieron salir adelante cuando me mudé de ciudad para continuar la carrera, me apoyaron siempre que pudieron, tanto en lo mental y económico. Gracias a ellos, todo lo que me han enseñado me ha ayudado para ser la persona quien soy ahora.

A mi tía Ana Dubón, que en paz descansa, ya que es otra persona fundamental en mi vida y que sin su apoyo a mi mamá, no se hubiera logrado este objetivo de culminar mi carrera universitaria, siempre le estaré agradecido a ella que velara porque no nos faltase nada. Y a mi tío Emilio Medrano y su esposa, que me ayudaron en el proceso de cambio de ciudad cuando necesité un lugar para quedarme, siempre se mostraron interesados en ayudarme y les estaré agradecido por esa hospitalidad en su hogar.

A mi compañero de trabajo de aplicación, Julio César Zeceña, que es una persona admirable, humilde, muy inteligente y que le deseo el mejor de los éxitos en su vida laboral, nos conocimos en los últimos años de carrera pero desde ahí sentí que me caíste muy bien, espero y te deseo lo mejor en tu vida y que nos sigamos viendo en el futuro.

Ernesto Dubón

DEDICATORIA

Este logro lo comparto y se lo dedico especialmente a:

A Dios, por darme Inteligencia y fortaleza, por guiarme y ayudarme, por estar presente en cada momento, por poner cerca de mí a todas las personas que me ayudaron y apoyaron en el momento que necesité.

A mis Padres, Luis Antonio Zeceña Portillo y Petrona de Jesús Landaverde de Zeceña, a quienes agradezco por el apoyo incondicional, por incentivar me buenos principios y valores y sobre todo por el esfuerzo que realizaron para darme la oportunidad de prepararme profesionalmente.

A mis 13 hermanos que siempre me brindaron su apoyo y me ayudaron en muchas formas cada uno.

A mi compañero y amigo Ernesto Alexander Dubón Guevara por su esfuerzo y dedicación, con quien compartí buenos momentos en el transcurso de esta última etapa de nuestra carrera. ¡Es una persona admirable, responsable e inteligente!, le deseo lo mejor.

A cada uno de mis compañeros y amigos, con quienes compartí los malos y los buenos momentos.

A cada uno de los docentes de la Universidad de El Salvador por haber sido fundamental en mi preparación académica, entre ellos, El Ing. Héctor Guerra quien ha sido nuestro asesor en este trabajo de aplicación y nos ha transmitido sus conocimientos.

Me es muy grato decirles por su ayuda y apoyo ¡MUCHAS GRACIAS! ¡SI SE PUDO!

Julio César Zeceña Landaverde

AGRADECIMIENTOS

Agradecidos principalmente con DIOS, por permitirnos concluir satisfactoriamente esta etapa profesional, por iluminarnos con sabiduría e inteligencia y por ayudarnos a superar cada obstáculo a lo largo de todo nuestro proceso de formación universitaria.

A nuestros padres, por ser pilares fundamentales durante toda esta formación académica, por todo el apoyo, por todas las fortalezas y los consejos que nos han brindado y sobre todo por darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente por medio de sus esfuerzos.

A Ingeniero Héctor Manuel Guerra, quien se desempeñó en el curso de especialización de Introducción al Control de la Corrosión Industrial (ICCI), del cual aprendimos mucho, y nos ayudó en diferentes circunstancias para poder realizar las visitas técnicas para las respectivas mediciones, gracias por su tiempo y por orientarnos en este año 2021.

A Ing. Saúl Padilla (gerente de perforación de LaGeo) y al Ing. Jaime Arévalo (coordinador de operaciones de campo de LaGeo) por darnos la oportunidad de poder realizar este trabajo de aplicación dentro de las instalaciones y equipos de perforación del pozo TR-1A, por todo el apoyo y la atención que se nos ha brindado.

A Ing. Saúl Ramos (coordinador de cementación, aire y fluidos de LaGeo) por su orientación y apoyo, por facilitarnos la información requerida, por transmitirnos sus conocimientos y experiencias, por su motivación y tiempo que nos brindó en cada consulta durante el desarrollo de nuestro trabajo.

A todo el personal de perforación del pozo TR-1A y de cementación, por la ayuda que nos brindaron durante las visitas de campo y por la amabilidad de su atención.

Finalmente, agradecemos a los docentes de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Universidad de El Salvador, por haber formado parte de nuestra formación académica, por su tiempo, dedicación y por transmitirnos todos sus conocimientos.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio predictivo utilizando el método de ultrasonido industrial, el cual es uno de los ensayos no destructivos de inspección más versátiles y más utilizado en la industria. La inspección por ultrasonido es un método no destructivo en el cual un haz o un conjunto de ondas ultrasónicas de alta frecuencia son introducidos en los materiales para la detección de fallas en la superficie y subsuperficie por lo que no implican un daño perceptible al material, ni alteran de forma permanente sus propiedades o dimensiones.

La investigación se realizó debido a que la corrosión en las industrias es un tema muy importante a considerar, hoy en día los costos de prevención/mantenimiento de la corrosión son altos y si no se realizan pueden ser aún más costosos cuando las piezas metálicas dejen de funcionar. Éste estudio se realizó en las instalaciones y equipos de perforación de LaGeo, Berlín, Usulután, El Salvador y se utilizó como instrumento de medición el Elcometer 204, que sirve para medir espesores en aceros con bajo contenido de carbono mediante ondas ultrasónicas. En LaGeo, las instalaciones y los equipos de perforación están expuestos a ambientes bastantes agresivos, por ello con este estudio se pretende determinar la vida útil estimada y clasificar su ambiente.

La metodología desarrollada se basó principalmente en la identificación del equipo con mayor grado de corrosión, luego se prepararon las superficies a analizar en diferentes secciones del material para tener una mayor muestra de análisis y una mayor confiabilidad en los resultados. Posterior a ello, se calibra el equipo con sonda cero, esto se puede realizar cada vez que se hace cambio de un material a otro material y sobre todo si se observa inestabilidad en las barras de medición del equipo. Una vez calibrado el equipo se procede a la medición de espesores, aquí se hará una comparación entre el valor de fábrica del equipo y el valor real medido con el Elcometer 204, para esto se deberá agregar una pequeña cantidad de acoplante. Por último, se estimará la vida útil del equipo y se hará una clasificación del ambiente en base a la norma ISO 12944-2 titulada como “Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.

Clasificación de ambientes”, para esto se necesitará de la pérdida de espesor en un año de exposición.

Los resultados más significativos de vida útil estimada para los tanques de sedimentación y succión de bombas son; 11.74 años y 18 años 6 meses. Para los 3 tanques de almacenamiento de agua son 13.88 años, 8.23 años y 9.65 años, respectivamente. En cuanto a la corrosividad de estos equipos su ambiente está categorizado como “C5 Muy Alta”, por lo que están en un ambiente altamente corrosivo, con mucha humedad, oxígeno y demás agentes corrosivos.

Para el mástil y el malacate la vida útil estima es 36 años 6 meses y 54.95 años respectivamente. La corrosividad en estos está categorizada como “C5 Muy Alta” y “C3 Media”, esto es debido a la cargas y vibraciones que soportan, además, de los agentes corrosivos en el lugar.

Estos resultados pueden ser una fuente valiosa de información para los encargados del área de perforación de LaGeo ya que tomando de base este estudio predictivo pueden hacer planificaciones anticipadas en cuanto al control de la corrosión en sus equipos y así poder tomar las mejores decisiones en mejoras de la protección de los mismos. Asimismo, los resultados de esta investigación son una valiosa contribución a los conocimientos tanto de los estudiantes como de los lectores, ya que en esta investigación se muestran las bases y metodología para realizar un estudio predictivo de la corrosión en distintas industrias. De igual manera es un gran aporte para los encargados de perforación de LaGeo ya que existe un documento en el cual se detalla un estimado en números reales de que tanto tiempo pueden durar sus equipos en su ambiente, no solo es una información sin fundamentos que algún técnico podría dar sin ningún tipo de metodología que especifique con pruebas el número años que podría durar un equipo. Es por ello la importante contribución que tiene este estudio predictivo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

1.1. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1.1. Datos generales del lugar de estudio:	4
1.1.1.1. Escenario geológico.....	4
1.1.1.2. Generalidades del pozo reinector TR-1A.....	5
1.1.2. Generalidades del tema.....	6
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.3. OBJETIVOS.....	9
1.3.1. Objetivo general:	9
1.3.2. Objetivos específicos:.....	9
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	10
1.5. ALCANCES.....	11
1.6. LIMITANTES	12
1.7. ANTECEDENTES DEL MÉTODO	13

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN ACEROS METÁLICOS.....	15
2.1.1. Clasificación.....	15
2.1.2. Generalidad de los ultrasonidos.....	16
2.1.3. Ensayo no destructivo por método de ultrasonido	17
2.2. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS	19
2.3. PROPIEDADES DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS.....	21
2.3.1. Impedancia acústica.....	22
2.3.1.1. Relación de la Impedancia.....	23

2.4.	MÉTODOS BÁSICOS DE INSPECCIÓN	25
2.4.1.	Método de transmisión	25
2.4.2.	Método eco-pulsado	26
2.5.	MEDICIÓN DE ESPESORES CON ULTRASONIDO	26
2.6.	EQUIPO BÁSICO	27
2.6.1.	Transductores ultrasónicos	27
2.6.2.	Acoplantes	28
2.7.	CORROSIÓN EN PERFORACIÓN	29
2.8.	CLASIFICACIÓN DE LOS AMBIENTES	29
2.8.1.	Ambientes corrosivos según NACE	29
2.8.1.1.	Ambiente químico / marino	30
2.8.1.2.	Ambiente químico con alta humedad	30
2.8.1.3.	Ambiente marino con alta humedad	30
2.8.1.4.	Ambiente químico con baja humedad	30
2.8.1.5.	Ambiente rural	30
2.8.2.	Ambientes corrosivos según ISO 12944-2 “Clasificación de los Medios Ambientes”	30
2.8.2.1.	Categorías de corrosividad atmosférica	31
2.8.2.2.	Clasificación del medio según inmersión	33
2.8.3.	Factores que afectan la tasa de corrosión en equipos de perforación	33
2.8.3.1.	Temperatura	33
2.8.3.2.	Presión	34
2.8.3.3.	pH	34
2.8.3.4.	Salas disueltas	34
2.8.4.	Agentes corrosivos en equipo de perforación y tipo de ataque	35
2.8.4.1.	Oxígeno (O ₂)	35
2.8.4.2.	Anhídrido carbónico (CO ₂)	35
2.8.4.3.	Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	35

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.	ENFOQUE METODOLÓGICO	36
------	----------------------------	----

3.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	37
3.2.1.	Método.....	37
3.2.2.	Instrumento.....	38
3.2.3.	Mediciones y Muestras.....	38
3.3.	IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS.....	40
3.4.	ESTADO Y PREPARACIÓN DE SUPERFICIES.....	40
3.5.	CALIBRACIÓN CON SONDA CERO.....	41
3.6.	MEDICIÓN DE ESPESORES.....	42
3.6.1.	Medición de tuberías.....	44
3.6.2.	Medición de superficies calientes.....	44
3.6.3.	Medición con pintura y revestimientos.....	45
3.7.	CLASIFICACIÓN DE AMBIENTES Y VIDA ESTIMADA DEL EQUIPO	45

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1.	RESULTADOS.....	47
4.1.1.	Tanque de sedimentación.....	47
4.1.2.	Tanque de succión de bombas.....	50
4.1.3.	Tanque de almacenamiento de agua N° 1.....	52
4.1.4.	Tanque de almacenamiento de agua N° 2.....	54
4.1.5.	Tanque de almacenamiento de agua N° 3.....	56
4.1.6.	Mástil.....	58
4.1.7.	Malacate.....	63
4.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	64
4.2.1.	Tanque de sedimentación.....	65
4.2.2.	Tanque de succión de bombas.....	656
4.2.3.	Tanque de almacenamiento de agua N° 1.....	67
4.2.4.	Tanque de almacenamiento de agua N° 2.....	68
4.2.5.	Tanque de almacenamiento de agua N° 3.....	69
4.2.6.	Mástil.....	70
4.2.7.	Malacate.....	72

CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
ANEXOS	81
Anexo 2.1. Toxicidad del sulfuro de hidrógeno para el ser humano	81
Anexo 3.1. Dimensiones y memoria de cálculo.....	82
Anexo 3.2. Especificaciones del mástil y malacate según fabricante	95
Anexo 4.1. Espesores mínimos de mástil y malacate	96
Anexo 4.2. Esfuerzos permitidos para los materiales en acuerdo con API 650, para tanques de almacenamiento atmosféricos.	97
Anexo 4.3. Memoria de cálculo para clasificación de ambiente y estimación de vida útil del equipo.....	98
Anexo 4.4. Equipos analizados	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1.1 Ubicación del Campo Geotérmico de Berlín	4
Figura 1.2 Mapa de distribución de temperaturas del Campo Geotérmico de Berlín	5
Figura 1.3 Pozo reinyector TR-1A LaGeo, Berlín	6
Figura 2.1. Intervalo de frecuencias de ondas de sonido.....	17
Figura 2.2. Inspección típica por ultrasonido	18
Figura 2.3. Reflexión.....	18
Figura 2.4. Propagación del sonido	19
Figura 2.5. Dirección de propagación de ondas ultrasónicas longitudinales	21
Figura 2.6. Dirección de propagación de ondas ultrasónicas transversales	22
Figura 2.7. Atenuación	23
Figura 2.8. Acopamiento	24
Figura 2.9. Divergencia del haz	24
Figura 2.10. Dispersión de la onda	24
Figura 2.11. Absorción	25
Figura 2.12. Equipo básico	27
Figura 2.13. Transductor	28
Figura 3.1. Calibración con sonda cero	42
Figura 3.2. Modo de lectura en tuberías	44
Figura 4.1. Resultados y muestras para tanque de sedimentación	65
Figura 4.2. Resultados y muestras para tanque de succión de bombas	66
Figura 4.3. Resultados y muestras para tanque de almacenamiento de agua N° 1	67
Figura 4.4. Resultados y muestras para tanque de almacenamiento de agua N° 2	68
Figura 4.5. Resultados y muestras para tanque de almacenamiento de agua N° 3	69
Figura 4.6. a) Resultados de Mástil-sección I, b) Resultados mástil-sección II.....	70
Figura 4.7. Muestras tomadas para Mástil.....	71
Figura 4.8. Resultados y muestras para malacate.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 2.1. Impedancia, velocidad y densidad	22
Tabla 2.2. Categorías de corrosividad atmosférica según norma ISO 12944-2:2017. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Clasificación de ambientes.....	32
Tabla 2.3. Categorías de agua y suelo	33
Tabla 4.1. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de sedimentación	48
Tabla 4.2. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de succión de bombas.	50
Tabla 4.3. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 1.....	52
Tabla 4.4. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 2.....	54
Tabla 4.5. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 3.....	56
Tabla 4.6. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para mástil	58
Tabla 4.7. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para malacate.....	63

LISTA DE SIGLAS Y SÍMBOLOS

ISO:	International Organization for Standardization.
NACE:	National Association of Corrosion Engineers
API:	American Institute of Petroleum
ASME:	American Society of Mechanical Engineers
ANSI:	American National Standards Institute
AISC:	American Institute of Steel Construction
PIB:	Producto Interno Bruto
ICCI:	Introducción al Control de la Corrosión Industrial
ED:	Ensayo Destructivo
END:	Ensayos No Destructivos
NDT:	No Destructive Testing
PND:	Pruebas No Destructivas
UT:	Ultrasonic Testing
UNE:	Una Norma Española.
EN:	Norma Europea.
ASTM:	American Society for Testing and Materials
TRB:	Reinyección Total Berlín
Hz:	Hertz
MHz:	MegaHertz
f:	Frecuencia
λ:	Longitud de onda

V:	Velocidad
m/s:	Metros por segundo
%:	Por ciento
ρ:	Densidad
Z:	Impedancia
gr:	Gramos
cm²:	Centímetros cuadrados
s:	Segundos
≤:	Menor o igual
>:	Mayor a
CO₂:	Dióxido de carbono
H₂S:	Sulfuro de Hidrógeno
O₂:	Oxígeno molecular
°F:	Grado Fahrenheit
°C:	Grado Celsius
mg:	Miligramos
mm:	Milímetros
in:	Pulgadas
ipy:	Pulgadas al año
in/año:	Pulgadas al año
msnm:	Metros sobre el nivel del mar.
μs:	Microsegundos
μm:	Micrómetros

INTRODUCCIÓN

La calidad y la seguridad industrial han sido factores de interés que han influido en el conocimiento y el desarrollo de métodos de ensayos de inspección que han beneficiado actualmente a todas las industrias. Por esto se ha ido aumentando la necesidad de aplicar nuevas técnicas de prevención y corrección para el manejo y control de la corrosión en los diferentes materiales metálicos en sus ambientes respectivos. Estos métodos de inspección pueden ser ensayos destructivos (ED) y ensayos no destructivos (END) y actualmente han dejado de ser técnicas primitivas utilizadas en pocas industrias y se han convertido en una disciplina y un componente esencial de todo mecanismo industrial. Los ensayos no destructivos son una parte muy importante del control de calidad y representan un complemento de otros métodos establecidos en tareas de mantenimiento y control. Debido a su capacidad de detección y fiabilidad son de vital importancia en los desafíos y necesidades de la industria como en la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión, detección de fugas, en la comprobación de espesores en tuberías, desgaste en recipientes o tanques de almacenamiento, entre muchas otras.

Este trabajo se desarrollará por el método de ultrasonido y se usará como instrumento de medida el “Elcometer 204” y se caracteriza por transmitir ondas ultrasónicas de alta frecuencia y se aplica para determinar el espesor y la uniformidad de un elemento, para detectar defectos como poros y fisuras internas.

El objetivo de la investigación es realizar un estudio predictivo de la corrosión en las instalaciones y equipos de perforación de LaGeo, ubicada en Berlín, Usulután.

Está estructurado en cuatro capítulos, en el capítulo I, están presentes los marcos referenciales, teoría que sustenta las generalidades de descripción del proyecto como el contexto de la investigación, la problemática que genera corrosión, generalidades del tema, alcances, limitantes, etc. El capítulo II, contiene la base teórica para alcanzar los objetivos, el cual incluye definición de ensayos destructivos, características de las ondas, propiedades, equipo básico, categorías de ambientes, etc. En el capítulo III se muestra la metodología la cual explica el enfoque metodológico, el diseño experimental y la aplicación del método utilizado para alcanzar los objetivos como la identificación de los equipos, preparación de

las superficies, calibración, etc. El capítulo IV presenta los resultados y análisis de resultados, en los cuales se especifica la categoría del ambiente y vida útil estimada para cada equipo. Luego se presentan las conclusiones y recomendaciones en base a dichos resultados. Y por último se muestran los anexos que contienen memorias de cálculos e información adicional.

El motivo de esta investigación es ayudar tanto a los lectores como al personal de perforación de LaGeo a que puedan tener una base teórica para desarrollar un estudio predictivo de la corrosión con cálculos de vida útil estimada para diferentes equipos y la clasificación de sus ambientes y así poder ayudar a planificar de manera anticipada modificaciones parciales o completas en base a este documento.

CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

En este capítulo I se detallan todas las generalidades de descripción de la investigación, es decir se muestra el escenario donde se ha llevado a cabo el estudio como las condiciones del ambiente, la ubicación, se presentan algunas generalidades del tema como el método que se utilizó, el tipo de inspección, el instrumento utilizado, etc. De igual forma se menciona cual es la problemática con este tema de la corrosión, el por qué se decidió realizar esta investigación, los alcances que pretendemos obtener, los objetivos, las limitantes que tuvimos, y algunos antecedentes del método utilizado.

1.1. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

En El Salvador, las empresas como LaGeo debido a las operaciones realizadas ya tienen sus instalaciones y equipos de perforación establecidos en ambientes de trabajo que resultan ser muy corrosivos, ya que son ambientes muy húmedos, con altas concentraciones de iones cloruro, sólidos disueltos, etc. De igual forma, equipos como los tanques de almacenamientos de agua, el mástil, el malacate, entre otros se someten a cambios de escenarios o ambientes debido a la movilidad de estos a otros pozos, como lo fue para nuestro caso, en donde primeramente los equipos se encontraban en el pozo TR-1A y luego se trasladaron para el pozo TR-17 conocido también como las crucitas. Asimismo, debido a las operaciones realizadas temas como las vibraciones, cargas, efecto del viento son factores que también contribuyen y aceleran las pérdidas constantes del material con el tiempo y hacen perder su eficiencia. Por esta razón, la corrosión industrial es el fenómeno que más afecta a las instalaciones y equipos de perforación de LaGeo ya que estos están expuestos a diferentes tipos de ambientes corrosivos. Debido a que los objetos tubulares y demás equipos son principalmente de hierro y la mayoría de los fluidos tiene una base de agua, es inevitable la corrosión, pudiendo solo minimizar sus efectos a largo plazo.

No obstante, es muy común que las empresas no gasten muchos recursos en cuanto al control de la corrosión en sus estructuras y equipos, son pocas las empresas que si le dan la importancia que se debe a este problema, por tanto para mitigar este fenómeno dentro de

El campo presenta un típico sistema geotérmico de tipo hidrotermal compuesto por una fuente de calor capaz de calentar a los fluidos contenidos en las rocas, un reservorio donde se pueden almacenar esos fluidos calientes, una capa sello capaz de aislar el reservorio de la superficie y una zona de recarga. Así, esquemáticamente presenta una zona productora central (Zona B) con temperatura alta (entre 280 y 300° C) y permeabilidad buena, un área más fría al Noreste (Zona A de inyección) de temperaturas menores (entre 220 y 250° C) y permeabilidad más baja, y una zona Sur bajo exploración que es la posible expansión del campo (Zonas C, D) con temperaturas posibles de 255° C (Figura 1.2). (Castro Fuentes, 2007).

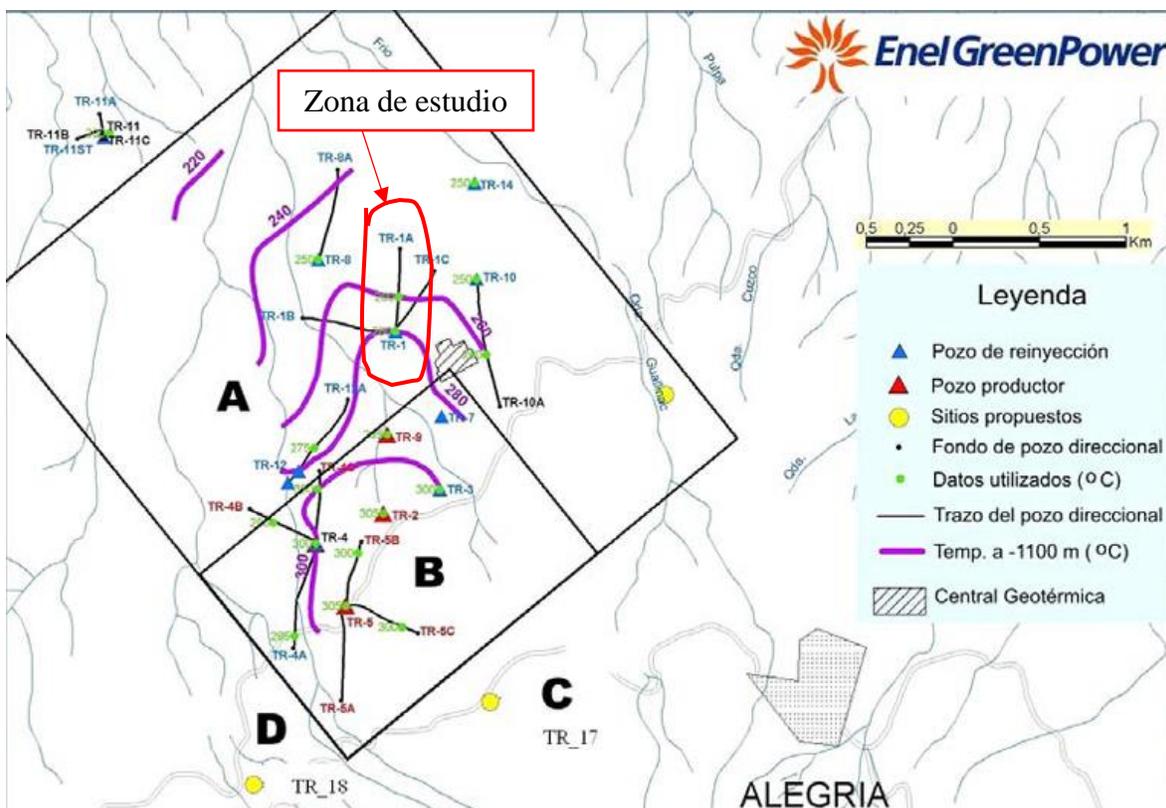


Figura 1.2 Mapa de distribución de temperaturas del Campo Geotérmico de Berlín (Castro Fuentes, 2007)

1.1.1.2. Generalidades del pozo reinyector TR-1A

En los pozos reinyectores de la Central Geotérmica Berlín, así como el mostrado en la Figura 1.3 (Pozo TR-1A) se llevan a cabo limpiezas con el objetivo de retirar las incrustaciones

internas de las tuberías, las cuales se hacen con intervención mecánica, limpieza con aire y estimulación química, es decir, estas limpiezas incluyen la inyección de aire con agua espumada para extraer los sólidos desde el fondo del pozo, y una estimulación química para mejorar su permeabilidad y tener una máxima absorción del agua geotérmica. Si bien este es un proceso fundamental en la perforación, estos generan un ambiente bastante húmedo y con altas concentraciones de sales disueltas, los cuales contribuyen a acelerar el problema de la corrosión. Es por esto último que es importante tener en cuenta los métodos de control contra la corrosión.



Figura 1.3 Pozo reinyector TR-1A LaGeo, Berlín

1.1.2. Generalidades del tema

Este trabajo de aplicación consiste en un estudio predictivo de la corrosión en los equipos de perforación e instalaciones de LaGeo y se desarrolló utilizando el método de Ultrasonido Industrial y usando como instrumento de medida de espesores el Elcometer 204 que es específico para aceros con bajos contenidos de carbono. Las mediciones se realizaron por el

método de ultrasonido industrial que consiste en la transmisión de una onda de alta frecuencia que permite localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes tipos de geometrías y materiales. El método de ultrasonido industrial, es un ensayo no destructivo volumétrico, es decir es una prueba que proporciona información acerca de la sanidad interna de los materiales inspeccionados y velan por evaluar discontinuidades, mediciones dimensionales, clasificación de materiales, grietas, fisuras, fugas, etc.; dentro del volumen del material.

El equipo de ultrasonido industrial utilizado Elcometer 204 funciona mediante el método de inspección de pulso-eco o eco-pulso, donde el pulso de alta frecuencia transmitido al material a través del transductor es reflejado a la superficie del material analizado en forma de eco. Es decir, para este método de inspección únicamente se necesita un transductor que tenga la función de emisor y receptor a la vez.

El método de ultrasonido industrial, así como los demás métodos no destructivos son ampliamente utilizados ya que no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material analizado, es decir, su daño es imperceptible. Es por esta misma razón que se decidió utilizar el método de ultrasonido industrial para llevar a cabo esta investigación.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En LaGeo los equipos e instalaciones están sujetos a la corrosión principalmente por ser metálicos y estar expuesto a ambientes bastantes agresivos como ambientes muy húmedos, con altas concentración de sales, etc. El impacto económico es uno de los problemas más importantes a considerar ya que causa pérdidas de miles de dólares en mantenimiento, protección a corto plazo (recubrimientos, etc.) y en ocasiones la sustitución parcial o total de los componentes metálicos. Asimismo, estas pérdidas pueden estar referidas a contaminación del producto debido al desprendimiento de óxidos, a pérdidas de producción debido a fugas, accidentes laborales, paros no planificados, etc. Incluso en la Industria global, este problema supone un coste estimado de 2.5 billones de dólares, lo que equivale al 3.4% del PIB mundial, aproximadamente. Sin embargo, lo que agrava más la situación es que no hay un área que trate los problemas relacionados con la corrosión, es poco el personal capacitado en temas de control contra la corrosión. Siendo esta la importancia de este trabajo de aplicación, ya que se pretende que el personal encargado de los equipos de perforación de LaGeo tenga una proyección estimada acerca de la duración de sus equipos y una clasificación de sus ambientes, que les servirá para hacer modificaciones en las estructuras, ya sea cambios de piezas metálicas, cambio de equipos o recubrimientos de los mismos y así planear los costos de mantenimiento o sustitución con mayor tiempo de anticipación.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general:

Realizar un estudio predictivo de la corrosión en las instalaciones y equipos de perforación de LaGeo S.A de C.V.

1.3.2. Objetivos específicos:

- a) Establecer posibles causas que se podrían dar en un futuro a corto, mediano y largo plazo si hay falta de mantenimiento en las instalaciones y equipos de perforación.
- b) Determinar el ambiente corrosivo involucrado que cause el fenómeno de la corrosión en las instalaciones y equipos de perforación.
- c) Recomendar técnicas de mantenimiento preventivo en los equipos de perforación e instalaciones.
- d) Concientizar sobre las consecuencias y las pérdidas de los recursos que podrían incurrir si hay falta de un control de la corrosión en los equipos de perforación e instalaciones.
- e) Establecer mediante estudio predictivo la vida útil de los equipos de perforación e instalaciones.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo es importante debido a que es un tema que necesita especial atención de parte de todas las empresas y que necesitan considerar ya que este tipo de estudio puede ayudar a evitar causas no pensadas. Este trabajo al igual es importante para el personal de perforación de LaGeo debido a que la empresa no cuenta con un área respectiva en temas de corrosión y este trabajo ayudará a que estos tengan una estimación acerca de la duración de sus equipos y de la categoría de sus ambientes, y les servirá para hacer modificaciones en las estructuras y tomar medidas anticipadas contra la corrosión. De igual forma, esta investigación es importante ya que contribuye con las bases metodológicas y teóricas para realizar un estudio predictivo a equipos industriales. La razón del porqué de esta investigación es incentivar a las empresas que la corrosión es un gran problema que se ha dejado de lado y hacer ver la importancia que esta debe tener y concientizar sobre las pérdidas económicas en las que se pueden incurrir ya sean debido a paros no planificados, contaminación del producto por óxidos, etc. Y del mismo modo hacer ver lo imprescindible que es tener un personal con los conocimientos necesarios en temas contra la corrosión, los cuales sepan realizar estudios, análisis, diagnósticos y técnicas de mantenimiento predictivo sobre la corrosión en las estructuras metálicas de sus instalaciones y equipos.

1.5. ALCANCES

- a) Proporcionar un análisis sobre las posibles consecuencias debido a la corrosión a corto, mediano y largo plazo en los equipos de perforación e instalaciones.

- b) Conocer los tipos de ambientes causantes de la corrosión en los equipos de perforación e instalaciones.

- c) Proponer mantenimiento preventivo de la corrosión en los equipos de perforación e instalaciones.

- d) Reducir las consecuencias arraigadas a la corrosión y mejorar la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento.

- e) Estimar el tiempo de vida útil de los equipos de perforación e instalaciones.

1.6. LIMITANTES

- a) La principal limitante que se tiene es que los materiales deben de ser metales de acero con bajo contenido de carbono. Y no todos los equipos de perforación son en estas condiciones.

- b) Otra limitante que se puede tener es no contar con los factores de diseño para determinar de manera más exacta la pérdida de espesor al año, por lo que se tendrá que hacer la consideración que la pérdida de material es lineal en el tiempo.

- c) Debido a todas las operaciones que se realizan en LaGeo se puede tener el inconveniente que a la hora de realizar las mediciones a algunos de los equipos de perforación estos se encuentren en operación por lo que tendremos que realizar las mediciones con el debido cuidado respectivo y de manera rápida.

- d) El tiempo y la ubicación de la empresa (LaGeo) limita la cantidad de equipos a analizar y pruebas a realizar, por lo que se tendrá que planificar un diseño experimental para así poder tomar la mayor cantidad de medidas y muestras posibles y de tal forma esta condición no afecte los resultados de la misma.

1.7. ANTECEDENTES DEL MÉTODO

Los ensayos no destructivos se han practicado por muchas décadas. Se tiene registro desde 1868 cuando se comenzó a trabajar con campos magnéticos. Uno de los métodos más utilizados fue la detección de grietas superficiales en ruedas y ejes de ferrocarril. Las piezas eran sumergidas en aceite, y después se limpiaban y se esparcían con un polvo. Cuando una grieta estaba presente, el aceite que se había filtrado en la discontinuidad mojaba el polvo que se había esparcido, indicando que el componente estaba dañado.

El campo de la inspección ultrasónica es uno de los métodos más ampliamente usados, sobre todo en el sector del metal-mecánico para medir los espesores, detección de discontinuidades tanto internas como superficiales. La propagación de ondas sonoras a través del aire y otros materiales se estudió en el siglo XIX, pero la introducción de instrumentos ultrasónicos requirió los avances en electrónica de principios del siglo XX, incluyendo el desarrollo del tubo de rayos catódicos (Tlaxcala Martínez, 2018).

La idea de usar ondas ultrasónicas para investigar la estructura interna de los materiales se investigó por primera vez en la década de 1920. En 1924, El Dr. Sokolov desarrolló las primeras técnicas de inspección empleando ondas ultrasónicas. Los experimentos iniciales se basaron en la medición de la pérdida de la intensidad de la energía acústica al viajar en un material. Para tal procedimiento se requería del empleo de un emisor y un receptor de la onda ultrasónica y la primera patente específica en el área de pruebas no destructivas ultrasónicas data de 1931 (Tlaxcala Martínez, 2018).

Se patentó el primer instrumento de prueba ultrasónico comercial llamado Reflectoscopio por el profesor Floyd Firestone de la Universidad de Michigan en 1940; el desarrollo del sonar durante la Segunda Guerra Mundial hizo avanzar aún más el campo. En la década de 1950, los instrumentos comerciales se volvieron ampliamente disponibles (Tlaxcala Martínez, 2018).

Estos primeros instrumentos fueron desarrollados principalmente para la detección de fallas ultrasónicas, aunque también podían usarse para la medición de espesores. En la década de 1960, comenzaron a aparecer los primeros instrumentos más pequeños y más portátiles

diseñados para calibrar, incluidos los instrumentos con pantallas digitales de espesor en lugar de pantallas de osciloscopio (Tlaxcala Martínez, 2018).

Los instrumentos relativamente compactos, a batería, optimizados para una amplia variedad de aplicaciones de prueba se hicieron comunes en la década de 1970, y los instrumentos se hicieron cada vez más pequeños y más potentes. El Modelo 5221 presentado por Panametrics de Olympus en 1973 fue el primer medidor ultrasónico comercial que incorporó mediciones multimodo preestablecidas para cubrir una amplia gama de materiales y espesores, así como la calibración de la velocidad de conmutación (Tlaxcala Martínez, 2018).

Las pantallas de forma de onda como ayuda del operador y el registro de datos interno se introdujeron en la década de 1980, y en la década de 1990 el procesamiento de señal digital reemplazó a la circuitería analógica y mejoró la estabilidad y repetitividad (Tlaxcala Martínez, 2018).

Más recientemente, los avances en la tecnología de microprocesadores han llevado a nuevos niveles de rendimiento en los instrumentos en miniatura sofisticados y fáciles de usar de hoy en día.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Para poder llevar a cabo el estudio predictivo descrito anteriormente y poder lograr los objetivos planteados será necesario tener en cuenta la siguiente base teórica la cual describe fundamentos importantes del estudio, de la problemática, del equipo y del método utilizado, esto se detalla a continuación:

2.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN ACEROS METÁLICOS

Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT no destructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo (Jerez Virginia, 2012).

Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada (Grupo Nova Àgora, 2019).

En general los ensayos no destructivos proveen datos menos exactos acerca del estado de la variable a medir que los ensayos destructivos. Sin embargo, suelen ser más baratos para el propietario de la pieza a examinar, ya que no implican la destrucción de esta. En ocasiones los ensayos no destructivos buscan únicamente verificar la homogeneidad y continuidad del material analizado, por lo que se complementan con los datos provenientes de los ensayos destructivos (Jerez Virginia, 2012).

2.1.1. Clasificación

Según Tlaxcala, la clasificación de las pruebas no destructivas se basa en la posición donde se ubican las discontinuidades que pueden ser detectadas, por lo que se clasifican en:

- a. Pruebas no destructivas superficiales

- b. Pruebas no destructivas volumétricas
- c. Pruebas no destructivas de hermeticidad

Pruebas no destructivas superficiales: Estas pruebas proporcionan información acerca de la sanidad superficial de los materiales inspeccionados. Los métodos de P.N.D. superficiales son:

- i. VT - Inspección Visual
- ii. PT - Líquidos Penetrantes
- iii. MT - Partículas Magnéticas
- iv. ET – Electromagnetismo

Pruebas no destructivas volumétricas: Estas pruebas proporcionan información acerca de la sanidad interna de los materiales inspeccionados. Los métodos de P.N.D. volumétricos son:

- i. RT - Radiografía Industrial
- ii. UT - Ultrasonido Industrial
- iii. AET - Emisión Acústica

Pruebas no destructivas de hermeticidad: Proporcionan información del grado que pueden ser contenidos los fluidos en recipientes, sin que escapen a la atmósfera o queden fuera de control. Los métodos de P.N.D. de hermeticidad son:

- i. Pruebas de fuga
- ii. Pruebas de cambio de presión (neumática o hidrostática)
- iii. Pruebas de burbuja
- iv. Pruebas por espectrómetro de masas
- v. Pruebas de fuga con rastreadores de halógeno

2.1.2. GENERALIDAD DE LOS ULTRASONIDOS

De acuerdo a la Figura 2.1 los ultrasonidos “Son ondas de mismo tipo que los sonidos audibles, diferenciándose únicamente en la frecuencia de operación y forma de propagación. Los ultrasonidos operan con frecuencias por encima de la zona audible del espectro acústico” (Tlaxcala Martínez, 2018).

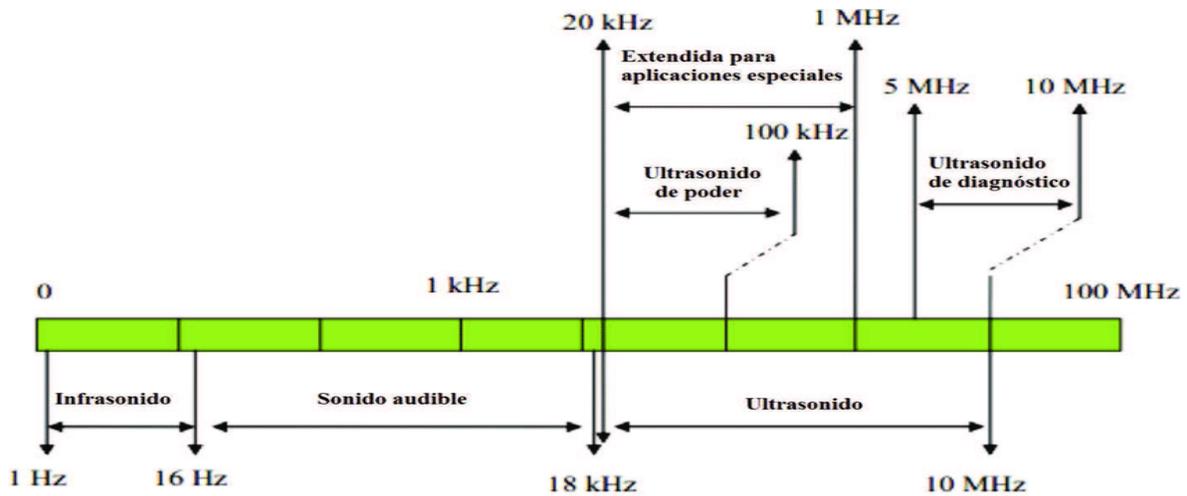


Figura 2.1. Intervalo de frecuencias de ondas de sonido (Cheng et al., 2015)

2.1.3. ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR MÉTODO DE ULTRASONIDO

Es una de las técnicas de inspección no destructiva más versátiles, ya que permite localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes tipos de geometrías y materiales. Este método se basa en la medición de la propagación del sonido en el medio que constituye la pieza a analizar y tiene aplicación en todo tipo de materiales utilizando “La energía del sonido de alta frecuencia para detectar discontinuidades internas en los materiales y hacer mediciones de espesor del material. También puede ser utilizada para la evaluación de discontinuidades, mediciones dimensionales, clasificación de materiales y más” (Tlaxcala Martínez, 2018).

Como puede observarse de la Figura 2.2 la inspección por ultrasonido es un método no destructivo en el cual un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia son introducidos en los materiales para la detección de fallas en la superficie y subsuperficie. En sólidos, las ondas acústicas pueden propagarse en cuatro formas principales de acuerdo con la forma en que oscilan las partículas: ondas longitudinales, ondas transversales, ondas superficiales y, en materiales delgados como ondas laminares. Las ondas de sonido viajan a través del material disminuyéndose paulatinamente y son reflejadas a la interface. El haz reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas y discontinuidades. (Mosquera Ávila, 2015)

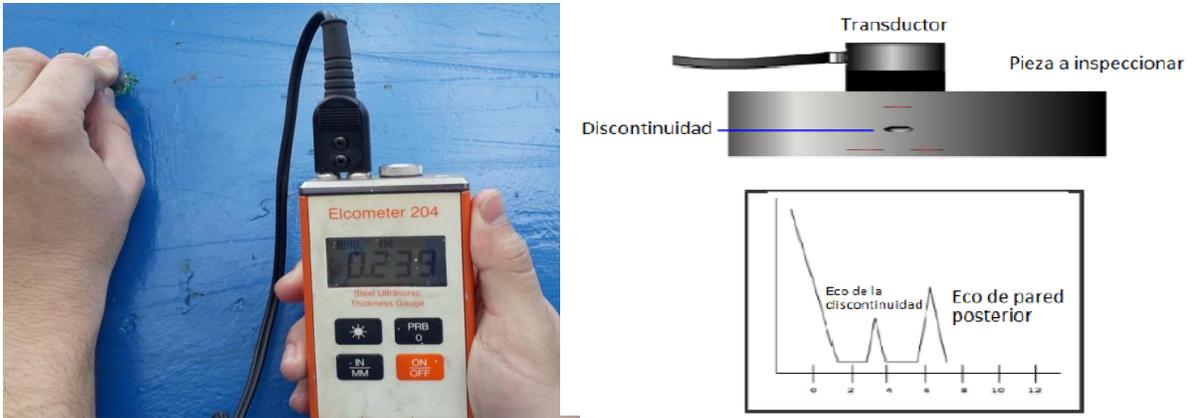


Figura 2.2. Inspección típica por ultrasonido (Mosquera Ávila, 2015)

Reflexión: Una onda ultrasónica es “Reflejada” cuando encuentra un cambio en el material, ya sea el borde de dos materiales que no sean similares o dos medios diferentes. Las ondas ultrasónicas se reflejan tanto de la discontinuidad y la superficie posterior del objeto de prueba en forma de ecos. El eco de la discontinuidad se recibe antes de la reflexión en la superficie posterior (Tlaxcala Martínez, 2018).

En la Figura 2.3 se muestra una situación en la que el tiempo requerido para que el haz de sonido viaje a través del objeto de prueba hasta la discontinuidad es dos tercios del tiempo requerido para que el haz de sonido pueda llegar a la superficie posterior y retornar. Esta diferencia de tiempo indica que la discontinuidad se encuentra a dos tercios de la distancia a la superficie posterior (Tlaxcala Martínez, 2018).

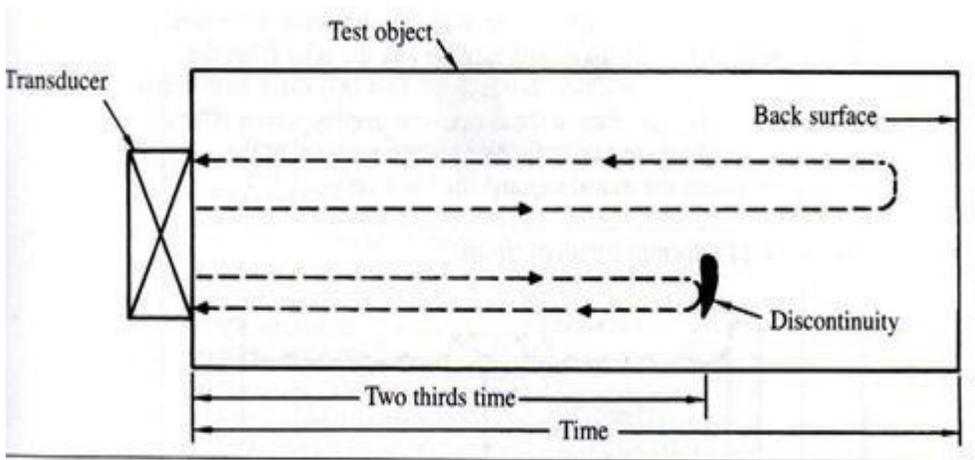


Figura 2.3. Reflexión (Tlaxcala Martínez, 2018)

El grado de reflexión depende grandemente del estado físico de los materiales que forman la interface. Por ejemplo: las ondas de sonido son reflejadas casi totalmente en las interfaces gas/metal. Por otro lado, existe una reflectividad parcial en las interfaces metal/sólido. Grietas, laminaciones, poros, socavados y otras fallas o discontinuidades que producen interfaces reflectivas serán detectadas fácilmente (Tlaxcala Martínez, 2018).

2.2. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS

Las ondas ultrasónicas se propagan en cierta medida en cualquier material elástico. Cuando las partículas atómicas o moleculares de un material elástico son desplazadas de sus posiciones de equilibrio por cualquier fuerza aplicada, esfuerzos internos actúan para restaurar o reacomodar a sus posiciones originales.

Según en la Figura 2.4 las fuerzas interatómicas que existen entre las partículas adyacentes del material, un desplazamiento en un punto induce un desplazamiento en los puntos vecinos y así sucesivamente, originando entonces una propagación de ondas de esfuerzo-deformación. El desplazamiento real del material que se produce en las ondas ultrasónicas es extremadamente pequeño (Proyecto Papime).

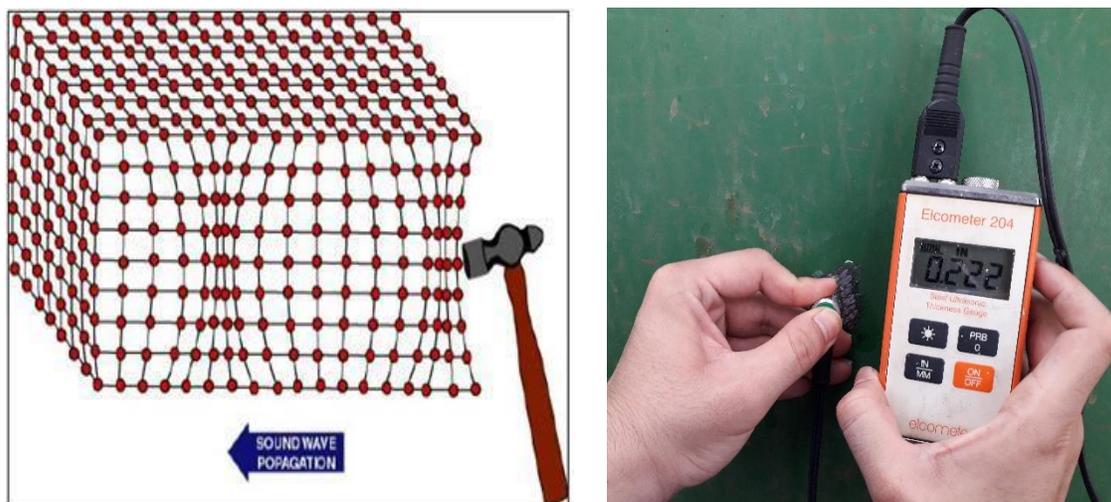


Figura 2.4. Propagación del sonido (Tlaxcala Martínez, 2018)

La propagación del ultrasonido está caracterizada por vibraciones periódicas de los átomos representada por un movimiento ondulatorio. La amplitud, modo de vibración y velocidad de las ondas se diferencian en los sólidos, líquidos y gases debido a las grandes diferencias entre las distancias de sus partículas internas. Estas diferencias influyen las fuerzas de atracción entre partículas y el comportamiento elástico de los materiales (Proyecto Papime).

La relación de velocidad con frecuencia y longitud de onda está dada por (Mosquera Ávila, 2015):

$$V = f \cdot \lambda \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Dónde:

V = es velocidad (en metros por segundo), F = es la frecuencia (en Hertz) y λ = es la longitud de onda (en metros por ciclo).

Velocidad: La velocidad de propagación es la distancia recorrida por la onda dividido por el tiempo empleado para recorrer esa distancia. La velocidad de los ultrasonidos en un material determinado depende de la densidad y elasticidad del medio que a su vez varían con la temperatura. La relación es directa, es decir, a mayor densidad del medio, mayor será la velocidad de transmisión de los ultrasonidos (Proyecto Papime).

Frecuencia: Es el número de oscilaciones (vibración o ciclo) de una partícula por unidad de tiempo (segundo). La frecuencia se mide en Hertz (Hz). Un Hertz es una oscilación (ciclo) por segundo. Como los ultrasonidos son ondas de alta frecuencia, se utiliza como medida básica el MegaHertz (MHz) que es igual a un millón de Hz (Proyecto Papime).

Longitud de onda: Es la distancia que existe entre dos puntos que se encuentran en el mismo estado de vibración (Proyecto Papime).

Amplitud: Es el máximo cambio producido en la presión de la onda, es decir la distancia máxima que alcanza la partícula vibratoria desde su posición inicial de reposo (altura de la curva senoidal) (Proyecto Papime).

Período: Es el tiempo de una oscilación completa, es decir lo que tarda el sonido en recorrer una longitud de onda.

2.3. PROPIEDADES DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS

Las ondas ultrasónicas pueden desplazarse por el medio en forma de ondas longitudinales (las partículas vibran en la dirección de propagación de la onda), transversales (las partículas vibran perpendicularmente) o de superficie (los movimientos de las partículas forman elipses en un plano paralelo a la dirección de propagación y perpendicular a la superficie) (Proyecto Papime).

Ondas longitudinales ultrasónicas: Algunas veces llamadas ondas de compresión son el tipo de ondas ultrasónicas mayormente utilizadas en la inspección de materiales. De acuerdo a la Figura 2.5 se observa que estas ondas viajan a través de los materiales como series alternadas de compresión y succión en las cuales las partículas transmiten las vibraciones de regreso y en la dirección de viaje de las ondas. La velocidad de una onda longitudinal ultrasónica es de 6000 m/s en aceros, 1500 m/s en agua y 330 m/s en aire (Proyecto Papime).

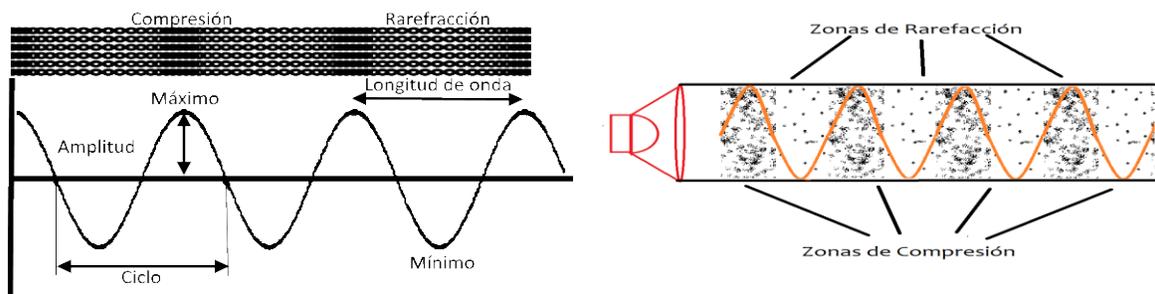


Figura 2.5. Dirección de propagación de ondas ultrasónicas longitudinales (Recuperado de: <https://www.universodelsonido.cl>)

Ondas transversales ultrasónicas: Las ondas transversales son también utilizadas ampliamente en la inspección ultrasónica de los materiales. De acuerdo a la Figura 2.6 podemos visualizar las ondas transversales en términos de vibraciones como una cuerda que se agita rítmicamente, en la que cada partícula en lugar de vibrar paralelamente a la dirección del oleaje como en la onda longitudinal, vibra hacia arriba y hacia abajo en un plano perpendicular a la dirección de propagación. A diferencia de las ondas longitudinales, las ondas transversales no pueden ser soportadas por una colisión elástica de las partículas o moléculas adyacentes (Proyecto Papime).

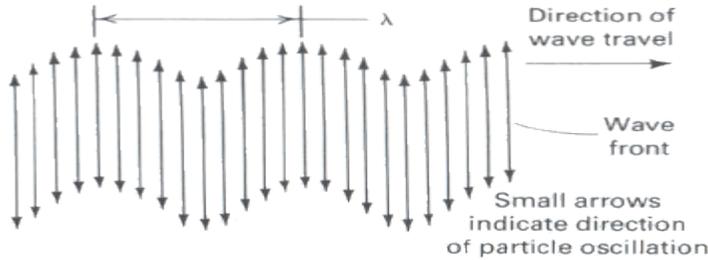


Figura 2.6. Dirección de propagación de ondas ultrasónicas transversales (Proyecto Papime)

Ondas superficiales: Son otro tipo de ondas ultrasónicas utilizadas en la inspección de materiales. Estas ondas viajan a través de la superficie plana o curva de materiales sólidos. Para la propagación de ondas de este tipo, las ondas deben de viajar a través de una interface limitada. Por un lado por las fuerzas elásticas de un sólido y por el otro lado fuerzas prácticamente insignificantes producidas por moléculas de gas. Las ondas superficiales están sujetas a sufrir atenuación en un material dado como lo hacen las ondas longitudinales y transversales. Tienen una velocidad aproximada de 90% de la velocidad de las ondas transversales en el mismo material. (Proyecto Papime).

2.3.1. IMPEDANCIA ACÚSTICA

La impedancia acústica es la resistencia que opone un material a la propagación del sonido y está definida como el producto de su densidad ρ y la velocidad acústica V . Es decir, $Z = \rho v$

Según la Tabla 2.1 el aire tiene una impedancia muy baja a las ondas ultrasónicas porque tiene baja la densidad y la velocidad. La impedancia del agua es mayor que la impedancia del aire, además de los sólidos, tales como el aluminio y el acero tienen impedancias más altas.

Tabla 2.1. Impedancia, velocidad y densidad (Tlaxcala Martínez, 2018)

Material	Impedancia (gr/cm ² -seg))	Velocidad (cm/seg)	Densidad (gr/cm ³)
Aire	0.000033×10^6	0.33×10^5	0.001
Agua	0.149×10^6	1.49×10^5	1.00
Aluminio	1.72×10^6	6.35×10^5	2.71
Acero	4.56×10^6	5.85×10^5	7.8

Según Tlaxcala la impedancia acústica es importante en:

- i. La determinación de la transmisión y la reflexión acústica en el límite de dos materiales que tiene diversas impedancias acústicas.
- ii. El diseño de transductores ultrasónicos.
- iii. La determinación de la absorción del sonido en un medio.

2.3.1.1. Relación de la Impedancia

Cuando un transductor se utiliza para transmitir una onda ultrasónica en un material, sólo una parte de la energía de la onda se transmite y el resto se refleja en la superficie del material. También, una cierta cantidad de energía ultrasónica se refleja en la interfaz entre dos materiales diferentes cuando el haz de sonido pasa de un material a otro. La relación de impedancia acústica entre dos materiales es simplemente la impedancia acústica de un material dividido por la impedancia acústica del otro material. Cuando un haz ultrasónico está pasando del material A al material B, la relación de impedancia es, la impedancia del segundo material dividido por la impedancia del primer material. Cuanto mayor sea la relación, mayor será reflejada la energía original (Tlaxcala Martínez, 2018).

De la Figura 2.7 a la Figura 2.11 se presentan algunos factores que muestran como la pérdida de energía de la onda ultrasónica al propagarse a través de un medio va disminuyendo o atenuándose.

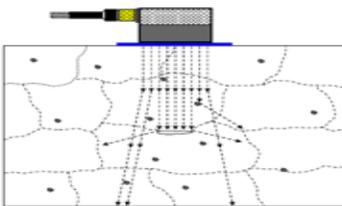


Figura 2.7. Atenuación (Marín J., 2018)

Se debe principalmente a:

Acoplamiento: Se debe generar un buen acoplamiento entre el transductor y la superficie a ensayar, el exceso o la falta de acoplante puede generar pérdida de energía.

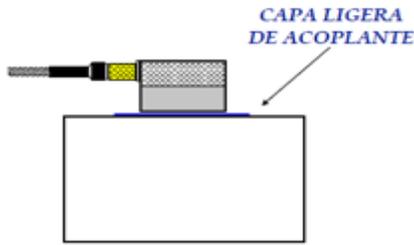


Figura 2.8. Acopamiento (Marín J., 2018)

Divergencia del haz ultrasónico: En materiales isotrópicos, homogéneos y de grano fino la intensidad de energía de la onda ultrasónica es afectada por la forma de su haz. La energía de un haz divergente está distribuida en un área mayor.

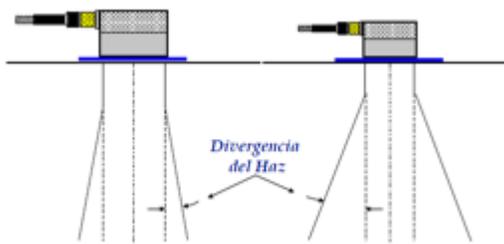


Figura 2.9. Divergencia del haz (Marín J., 2018)

Dispersión del medio: Cuando una onda ultrasónica pasa a través de materiales de ingeniería que contienen elementos distribuidos al azar, como porosidad e inclusiones inherentes y bordes de grano, la onda es reflejada parcialmente por ellos por lo que se dice que la energía es dispersada en diferentes direcciones.

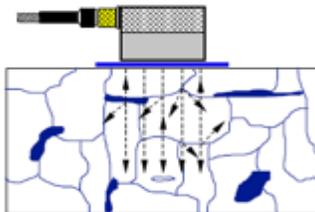


Figura 2.10. Dispersión de la onda (Marín J., 2018)

Absorción del medio: Las ondas ultrasónicas son absorbidas debido a mecanismos de pérdida de energía tales como fricciones internas, en algunos materiales principalmente. Cuando la onda ultrasónica se propaga a través de los materiales, parte de su energía mecánica se transforma en calor y no puede ser recuperada.

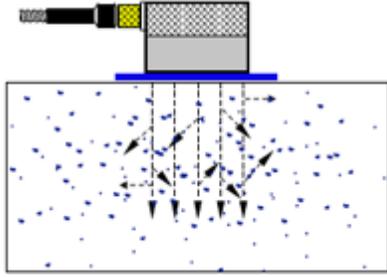


Figura 2.11. Absorción (Marín J., 2018)

2.4. MÉTODOS BÁSICOS DE INSPECCIÓN

Los dos métodos más importantes para la inspección por ultrasonido son el método de transmisión y el método eco-pulsado. La principal diferencia entre estos dos métodos es que el método de transmisión involucra solo la medición de la atenuación de la señal, mientras que el método eco-pulsado puede ser utilizado para medir el tiempo de tránsito y la atenuación o disminución de la señal (Proyecto Papime).

2.4.1. MÉTODO DE TRANSMISIÓN

El método de transmisión el cual incluye tanto reflexión como transmisión involucra solo la medición de la atenuación o disminución de señal. Este método también se utiliza para la detección de fallas. En el método eco-pulsado, es necesario que una falla interna reflecte al menos una parte de la energía sonora sobre un transductor de recepción (Proyecto Papime).

Los ecos de las fallas no son necesarios para su detección. El hecho que la amplitud de la reflexión de una pieza de trabajo es menor que la de una pieza idéntica libre de fallas implica que la pieza tiene una o más fallas. La técnica para detectar la presencia de fallas por la atenuación de sonido es utilizada en los métodos de transmisión, así como en los métodos eco-pulsados (Proyecto Papime).

En este tipo de método la transmisión es realizada por haz directo o reflectivo, las fallas son detectadas comparando la intensidad del ultrasonido transmitido a través de la pieza contra la intensidad transmitida a través de una referencia estándar fabricada del mismo material.

Las pruebas de transmisión requieren de dos unidades de búsqueda, una para transmitir las ondas ultrasónicas y otra para recibirlas (Tlaxcala Martínez, 2018).

Un buen acoplamiento es crítico para los métodos de transmisión debido a las variaciones de sonido durante la transmisión.

2.4.2. MÉTODO ECO-PULSADO

Es el más utilizado en inspecciones ultrasónicas, involucra la detección de ecos producidos cuando un pulso ultrasónico es reflejado por una discontinuidad o una interface en una pieza de trabajo. Este método es utilizado para detectar la localización de la falla y para medir espesores (Proyecto Papime).

La profundidad de la falla está determinada por el "tiempo de vuelo" entre el pulso inicial y el eco producido por la falla. La profundidad de la falla también se puede determinar por el tiempo relativo de tránsito entre el eco producido por una falla y el eco de la superficie de respaldo (Proyecto Papime).

Las dimensiones de las fallas se estiman comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una interface con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido o por una pieza de respaldo que no contenga fallas (Proyecto Papime).

2.5. MEDICIÓN DE ESPESORES CON ULTRASONIDO

La medición ultrasónica se utiliza para determinar el espesor real de tuberías, placas, piezas de fundición, etc. y compararlo con el espesor original para determinar si dicho material, aún está en condiciones de trabajar en forma eficiente y segura. Se hace mediante la técnica pulso-eco de contacto directo utilizando transductores de diferentes frecuencias según corresponda (Tlaxcala Martínez, 2018).

El principio de la medición de espesores por ultrasonido es el mismo que el de las ondas ópticas. La sonda envía impulsos al objeto a medir, se propagan allí y se reflejan en la superficie límite. La determinación del espesor del objeto es el resultado de la medición

exacta del tiempo que necesita la onda de ultrasonido en atravesar el objeto a medir (Tlaxcala Martínez, 2018).

Se emplea principalmente en tuberías, tanques y equipos que están sujetos a corrosión y/o erosión, es decir a la pérdida de material que va disminuyendo el espesor de la pared y que puede llegar a condiciones críticas.

La inspección consiste en tomar un muestreo de puntos de medición en diferentes zonas y niveles accesibles de los equipos a inspeccionar (Tlaxcala Martínez, 2018).

2.6. EQUIPO BÁSICO

En la Figura 2.12 se especifica el equipo básico utilizado (Elcometer 204) en la inspección por ultrasonido industrial:



- I. Un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas (emisor y receptor)
- II. Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo.
- III. Sonda cero
- IV. Un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte en pantalla.

Figura 2.12. Equipo básico (Elcometer, 2009)

A continuación se presentan algunas definiciones de este equipo:

2.6.1. TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS

Un transductor es un dispositivo que puede convertir una forma de energía en otra, en el caso de un transductor de ultrasonido convierte energía eléctrica en mecánica en forma de onda y viceversa, es por esta razón que la mayoría de los transductores de ultrasonido pueden utilizarse para la aplicación de pulso eco (Tlaxcala Martínez, 2018).

El transductor transmite y recibe la energía ultrasónica o las ondas sonoras que utiliza el medidor para determinar el grosor del material que se mide. La Figura 2.13 muestra los dos semicírculos de la cara de desgaste y la barrera que los separa. Uno de los semicírculos transmite el sonido ultrasónico al material que se está midiendo y el otro semicírculo recibe los ecos de sonido de regreso al transductor (Elcometer, 2009).



Figura 2.13. Transductor (Elcometer, 2009)

2.6.2. ACOPLANTES

Un acoplador se aplica entre la cara del transductor y la superficie de prueba para asegurar la transmisión eficiente del sonido desde el transductor a la superficie de prueba. El medio de acoplamiento es el que llena los espacios entre las irregularidades de la superficie de ensayo y la cara del transductor, lo que excluye todo el aire en la interface (Tlaxcala Martínez, 2018).

Los materiales usados como acoplantes son: Aceites con varios grados de viscosidad, glicerina, pastas especiales, goma de celulosa, agua, grasa y en algunas aplicaciones especializadas se ha llegado a utilizar láminas de elastómeros (Rojas, 2016).

Según Rojas, las características principales de los acoplantes deberán ser:

- i. Humectabilidad: Ayuda al acoplante a “mojar” la superficie del transductor y de la pieza de prueba.
- ii. Viscosidad: Permite al acoplante mantenerse sobre la superficie y evita que se escurra.
- iii. Costo: La facilidad de adquisición.
- iv. Remoción: Residuos fácil de eliminar.
- v. No corrosivos: Evitar agrietamiento por corrosión, por la presencia de contaminantes sin provocar daños a la pieza de prueba.
- vi. Toxicidad: Evitar que el personal técnico sufra de intoxicación por el manejo.

- vii. Atenuación: Evitar que existan pérdidas de la energía de la onda ultrasónica en el acoplante.

2.7. CORROSIÓN EN PERFORACIÓN

Según Baker Hughes la corrosión es la destrucción de un metal debido a una reacción química o electroquímica con su ambiente. La corrosión es un problema grave y costoso en la industria de la perforación. Debido a que los objetos tubulares son principalmente de hierro y la mayoría de los fluidos tiene una base de agua, es inevitable la corrosión. Sin embargo, deben cumplirse cuatro condiciones antes de que haya corrosión.

- a. Debe existir un ánodo y un cátodo.
- b. El ánodo y el cátodo deben estar inmersos en un medio electrolítico.
- c. Debe existir una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo.
- d. Debe haber un acoplamiento para completar el circuito eléctrico.

2.8. CLASIFICACIÓN DE LOS AMBIENTES

La clasificación de ambientes puede hacerse según la NACE que es la Asociación Americana de Ingenieros de la Corrosión, por sus siglas en inglés y según la norma ISO 12994-2 titulada como “Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Clasificación de ambientes”. En este apartado se desarrollan cada una de ellas.

2.8.1. Ambientes corrosivos según NACE

La influencia del ambiente es un factor que aumenta la velocidad de la corrosión, estos son:

- i. Químico/Marino
- ii. Químico con alta humedad
- iii. Marino con alta humedad
- iv. Químico con baja humedad
- v. Rural con baja humedad

vi. Rural

2.8.1.1. Ambiente químico / marino

- a. Un ambiente muy severo que causa una oxidación rápida.
- b. Las sales aerotransportadas y los agentes químicos contaminantes estimulan la corrosión.
- c. La humedad y el agua de mar, proporcionan un electrolito más eficaz.

2.8.1.2. Ambiente químico con alta humedad

- a. Altamente Corrosivo debido a los gases, químicos y a la alta humedad, todo lo que pueda estimular la corrosión.

2.8.1.3. Ambiente marino con alta humedad

- a. Un electrolito activo a través de la presencia de humedad y partículas de sal.
- b. Zona de salpique es atacada por corrosión particularmente alta.

2.8.1.4. Ambiente químico con baja humedad

- a. Un ambiente menos corrosivo que el de alta humedad
- b. Todos los gases como los químicos presentes, pueden estimular la corrosión.

2.8.1.5. Ambiente rural

- a. Puede ser el ambiente menos corrosivo de todos, debido a que el aire limpio no proporciona contaminantes en el aire y no hay humedad presente para servir como electrolito.

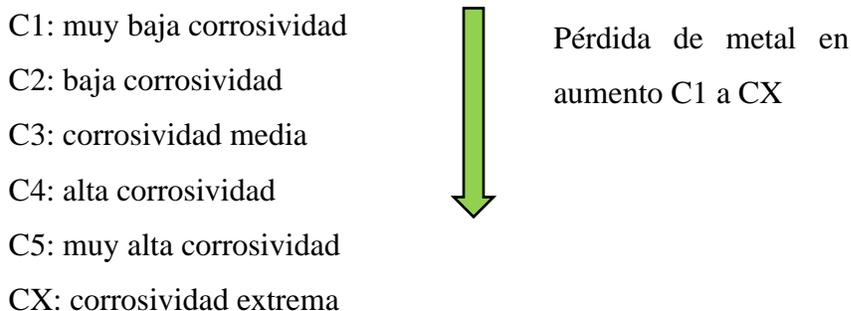
2.8.2. Ambientes corrosivos según ISO 12944-2 “Clasificación de los Medios Ambientes”

Nota: ISO (Organización Internacional de Estandarización, por sus siglas en inglés)

El criterio para poder hacer la clasificación según la norma ISO 12944-2 es la velocidad de corrosión y pérdida de metal.

2.8.2.1. Categorías de corrosividad atmosférica

Según la ISO 12944-2 y la ISO 9223, los entornos atmosféricos se clasifican en seis categorías de corrosividad atmosférica:



NOTA: El CX cubre diferentes entornos extremos. Un entorno extremo específico es el entorno marino cubierto por la norma ISO 12944-9. Otros entornos extremos no están cubiertos en las otras partes de la norma ISO 12944.

Para determinar las categorías de corrosividad, se recomienda encarecidamente tomar las muestras estándar de norma ISO 9223. La Tabla 2.2 define las categorías de corrosividad en términos de pérdida de masa o espesor de tales muestras estándar hechas de acero bajo en carbono y/o zinc después del primer año de exposición (UNE-EN ISO 12944-2, 2017).

Si no es posible exponer especímenes estándar en el entorno real de interés, la categoría de corrosividad puede estimarse simplemente considerando los ejemplos de ambientes típicos dados en la Tabla 2.2. Los ejemplos listados son informativos y ocasionalmente pueden ser engañosos. Sólo la medición real de la pérdida de masa o espesor dará la clasificación correcta (UNE-EN ISO 12944-2, 2017).

NOTA: Las categorías de corrosividad también se pueden estimarse considerando el efecto combinado de los siguientes factores ambientales: tiempo anual de humedad, concentración media anual de dióxido de azufre y depósito medio anual de cloruro.

Tabla 2.2. Categorías de corrosividad atmosférica según norma ISO 12944-2:2017. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Clasificación de ambientes.

Categoría Corrosividad	Pérdida de Masa por unidad de superficie/perdida de espesor (tras el primer año de exposición)		Ejemplos de entornos típicos (solo informativo)	
	Acero bajo en carbono		Exterior	Interior
	Pérdida de masa g/m ²	Perdida de espesor, μm		
C1 Muy baja	≤10	≤1.3	-	Edificios climatizados con atmósfera limpia, por ejemplo, oficinas, tiendas, escuelas, hoteles
C2 Baja	>10 a 200	>1.3 a 25	Atmosferas con bajo nivel de polución: mayormente zonas rurales	Edificios sin calefacción donde la condensación puede ocurrir, por ejemplo, depósitos, pasillos deportivos
C3 Media	>200 a 400	>25 a 50	Atmosferas urbanas e industriales, moderadamente poluidas con dióxido de azufre; áreas costeras con baja salinidad	Salas de producción con mucha humedad y algo de contaminación del aire, por ejemplo, plantas de transformación de alimentos, etc.
C4 Alta	>400 a 650	>50 a 80	Áreas industriales y costeras con moderada salinidad	Plantas químicas, piscinas, barcos costeros y astilleros
C5 Muy alta	>650 a 1500	>80 a 200	Áreas industriales con alta humedad y atmosfera agresiva y áreas costeras con alta salinidad	Edificios o áreas con condensación casi permanente y con alta polución
CX Extrema	>1500 a 5500	>200 a 700	Áreas marinas con alta salinidad y áreas industriales con humedad extrema y atmósfera agresiva y atmósferas subtropicales y tropicales	Áreas industriales con humedad extrema y atmósfera agresiva

NOTA: Los valores de pérdida usados para las categorías de corrosividad son idénticos a los dados en ISO 9223.

2.8.2.2. Clasificación del medio según inmersión

Estructuras sumergidas en agua y suelo

Para las estructuras sumergidas en agua o enterradas en el suelo, la corrosión es normalmente local en la naturaleza y las categorías de corrosividad son difíciles de definir. Sin embargo, se pueden describir diversos entornos. En la Tabla 2.3, se dan cuatro ambientes diferentes junto con sus designaciones (UNE-EN ISO 12944-2, 2017).

Tabla 2.3. Categorías de agua y suelo (UNE-EN ISO 12944-2, 2017)

Categoría	Ambiente	Ejemplos de entornos y estructuras
Im1	Agua dulce	Instalaciones fluviales, centrales hidroeléctricas
Im2	Agua de mar o salobre	Estructuras sumergidas sin protección catódica (por ejemplo, áreas portuarias con estructuras como compuertas, esclusas o embarcaderos)
Im3	suelos (subterráneos)	Tanques enterrados, pilotes de acero, tuberías de acero
Im4	Agua de mar o salobre	Estructuras sumergidas con protección catódica (por ejemplo, estructuras en alta mar)

NOTA: Para la categoría de corrosividad Im1 e Im3, se puede utilizar protección catódica con un sistema de pintura probado en consecuencia.

2.8.3. Factores que afectan la tasa de corrosión en equipos de perforación

Según Baker Hughes diversos factores pueden afectar la tasa a la cual avanza la corrosión. La mayoría de dichos factores están interrelacionados y tienen un efecto sinérgico sobre la tasa de corrosión. Las relaciones básicas son las siguientes.

2.8.3.1. Temperatura

Existen dos efectos diferentes:

- a) A medida que la temperatura aumenta, la tasa de corrosión aumenta. Si todos los otros factores permanecen constantes, la tasa de corrosión se duplica por cada aumento de 55°F (31°C) de temperatura.
- b) El aumento de temperatura disminuye la solubilidad de los gases corrosivos (O₂, CO₂, H₂S), disminuyendo así la corrosividad del fluido. Observe que “solubilidad” significa aquí la solubilidad del gas a presiones superficiales y no hace referencia a las reacciones químicas de gases como CO₂ y H₂S con el fluido (Baker Hughes, Agosto de 1998)

2.8.3.2. Presión

El aumento de presión aumenta la solubilidad de la mayoría de los gases corrosivos. El aire atrapado o retenido se disuelve rápidamente en el fluido, a medida que la presión se incrementa cuando se bombea fluido hoyo abajo. Esto afecta drásticamente el contenido de oxígeno del fluido, aumentando la corrosividad.

2.8.3.3. pH

Generalmente, la tasa de corrosión disminuye a medida que el pH aumenta. A temperaturas ambiente, a medida que el pH aumenta, las tasas de corrosión disminuyen rápidamente. Así mismo, las tasas son mucho más lentas en fluidos alcalinos que en fluidos ácidos. Poca reducción en la tasa de corrosión es posible cuando el pH llega a ser mayor de 10,5.

2.8.3.4. Sales disueltas

El efecto de la concentración de sal presenta dos facetas:

- a) A medida que la concentración de sal aumenta, la conductividad se incrementa y por consiguiente la tasa de corrosión también aumenta.
- b) Sin embargo, el aumento de la concentración de sal reduce la solubilidad del oxígeno y disminuye la tasa de corrosión. El efecto general es un ligero incremento en la tasa de corrosión debido a la conductividad, hasta que la concentración de sal alcanza aproximadamente 18.000 mg/L (Cl⁻). Al exceder este valor, a medida que la concentración de sal aumenta, la solubilidad del oxígeno y la tasa de corrosión disminuyen.

2.8.4. Agentes corrosivos en equipo de perforación y tipo de ataque

2.8.4.1. Oxígeno (O₂)

Fuente - La atmósfera.

Tipo de ataque - picadura, localizada (picaduras profundas) o generalizada (picaduras superficiales distribuidas de forma regular).

2.8.4.2. Anhídrido carbónico (CO₂)

Fuente - Formaciones y degradación bacteriana de los aditivos del fluido.

Tipo de ataque - Picadura severa (aparición de superficie carcomida).

2.8.4.3. Sulfuro de hidrógeno (H₂S)



!!!ADVERTENCIA!!!

El sulfuro de hidrógeno (H₂S) es altamente venenoso y corrosivo. Pequeñas concentraciones en el aire pueden ser fatales en tan solo unos minutos (véase Anexo 2.1). Cuando se espera encontrar H₂S, familiarícese con las medidas de protección con anterioridad (Baker Hughes, Agosto de 1998)

Fuente - Las formaciones son la fuente principal. La degradación bacteriana y térmica de los aditivos del fluido también contribuye en menor proporción

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Tomando como base los fundamentos teóricos descritos en el capítulo anterior, en este capítulo III se describe el enfoque metodológico que se utilizó para esta investigación que es el enfoque cualitativo y cuantitativo, también se presenta el diseño experimental donde se explica el método y el instrumento utilizado, el número de muestras, etc. Para la selección del lugar y de los equipos, para el diseño del experimento y el uso de los instrumentos de medición se recibió la asesoría e instrucciones de Molina Padilla, S. (2021), Arévalo Martínez, J. (2021), Ramos, S. (2021) y Guerra Pérez, H. (2021), quienes estuvieron al tanto del desarrollo del mismo. De igual forma en este capítulo se detallan los pasos a seguir para poder llevar a cabo este estudio y poder dar cumplimiento a los objetivos.

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

En este trabajo se realizó un estudio predictivo de la corrosión en los equipos de perforación e instalaciones de LaGeo debido a que hay muchas empresas que han dejado de lado este fenómeno y que no le han dado la importancia que debería tener y se realizó con la finalidad que estos resultados les sean útiles al personal de perforación de LaGeo tanto en el presente como en el futuro, para que conozcan los efectos negativos que resultan de la corrosión y para incentivarlos a tener un mayor control del mismo.

El presente trabajo de aplicación se ha desarrollado conforme a un enfoque cualitativo y cuantitativo ya que se basó tanto en la inspección visual de los equipos, en una buena preparación de las superficies, en indicadores teóricos del buen uso del instrumento medidor de espesores (Elcometer 204) como lo es la calibración, el uso del transductor, etc. también se basó en conceptos teóricos como que son los ensayos destructivos, no destructivos, propagación de ondas, etc. Al igual, tiene un enfoque cuantitativo ya que se vincula también con valores puntuales determinados de pérdidas de espesor en base a cierta cantidad de años expuestos, se determinan la velocidad de corrosión de los equipos (pérdida de espesor en un año) tanto en $\mu\text{m}/\text{año}$ como en ipy (pulgadas al año). De igual forma, tiene un enfoque cuantitativo ya que también se basa en la selección de las categorías de los ambientes en base a esa pérdida de espesor anual y en la determinación de los años de vida útil de los equipos para estos sigan en condiciones óptimas de funcionamiento.

No obstante, para poder llevar a cabo este trabajo aplicativo se necesitaron conocer ciertas variables especificas a analizar cómo es la perdida de espesor anual del equipo, los años de exposición que estos han estado sometidos en sus respectivos ambientes, el espesor de fábrica que tienen estos cuando fueron adquiridos y el espesor de fallo del mismo. Con todas estas variables, es posible determinar cuantitativamente el tiempo de vida útil restante del equipo y clasificar su ambiente corrosivo según norma ISO 12944-2 titulada como: "Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pinturas protectores". Del mismo modo, para que esta metodología sea bien aplicada es necesario tener en cuenta en primer lugar que todo el acero a analizar sea de bajo contenido en carbono y en segundo lugar considerar que la perdida de espesor de material del equipo es lineal en cada uno de los años de exposición en su ambiente.

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación se detalla el método que se utilizó para este estudio, el instrumento, el número de mediciones y las muestras.

3.2.1. Método

El método que se utilizó para la medición de espesores es el método de ultrasonido industrial y es una de las pruebas no destructivas del tipo volumétrico y se basa en la impedancia acústica, manifestada como consecuencia de la velocidad máxima de propagación del sonido en la densidad de un material. Esta onda transmitida es la que se encarga de medir los espesores de los equipos, las dimensiones del material, en determinar si hay fugas, irregularidades, grietas, etc. Este método de ultrasonidos industrial tiene dos métodos de inspección uno de ellos es el método de transmisión y el otro es el método de pulso eco o eco-pulso. El método de inspección que se ocupó para este estudio fue el método de pulso-eco que consiste en la transmisión de un pulso de alta frecuencia al material y en la reflexión de un eco a la superficie del mismo, con la diferencia que la frecuencia del eco es mucho menor a la frecuencia emitida (que para nuestro caso fue de 5.2 MHz), este eco que es reflejado a la superficie es el que determina el espesor del material a analizar.

3.2.2. Instrumento

El instrumento que se utilizó para la realización de estas mediciones de espesor fue el Elcometer 204 el cual está basado en la norma ASTM E 797 y la norma EN 15317. Cabe mencionar que este instrumento es específico para medir espesores por ultrasonido a materiales con bajos contenidos de carbono y mediante el método de pulso-eco. El transductor de este equipo es el que se encarga de transmitir y recibir la energía ultrasónica o las ondas sonoras que utiliza el medidor para determinar el espesor del material que se mide. Para que la medición de los espesores sea la más precisa es necesario que el instrumento se encuentre previamente calibrado, ya que esto puede influir significativamente en los resultados, del mismo modo es necesario que la superficie a analizar se encuentre debidamente preparada, es decir, que no hayan incrustaciones, suciedad, polvo, capas de recubrimiento, grasas, mojado, óxido, etc., en la superficie ya que esto puede influir en la estabilidad de las mediciones en este instrumento o en la falsedad de los mismos.

3.2.3. Mediciones y Muestras

La cantidad de mediciones de espesor que se realizaron dependieron de la geometría del equipo, esto se explica a continuación:

a. Tanque de sedimentación

Para este equipo se realizaron como una muestra representativa 6 mediciones a lo largo del tanque a cada lado (2 caras), 4 mediciones correspondientes al ancho y alto también de cada lado (dos caras) y 6 mediciones a la lámina superior del mismo.

b. Tanque de succión de bombas

Para este equipo se realizaron como una muestra representativa 6 mediciones a lo largo del tanque a cada lado, al igual que el de sedimentación, 4 mediciones correspondientes al ancho y alto y 4 mediciones a la lámina superior del mismo.

Circuito de tanques de almacenamiento de agua

El circuito de tanques de almacenamiento consta de tres tanques los cuales se detallan a continuación:

c. Tanque de almacenamiento de agua N° 1

Debido a que la longitud de este tanque es grande y debido a que las demás dimensiones no son tan diferentes al resto, se tomaron 8 mediciones a lo largo de cada lado como muestra representativa a esas 2 caras, y se tomaron 4 mediciones correspondientes al ancho y alto también de cada lado como muestra representativa a esas 2 caras. Este equipo no tiene lámina superior.

d. Tanque de almacenamiento de agua N° 2

Debido a que la longitud de este tanque es mayor al N° 1 y debido a que las demás dimensiones no son tan diferentes al resto, se tomaron 10 mediciones a lo largo de cada lado como muestra representativa a esas 2 caras, y se tomaron 4 mediciones correspondientes al ancho y alto también de cada lado como muestra representativa a esas 2 caras. Este equipo no tiene lámina superior metálica.

e. Tanque de almacenamiento de agua N° 3

A este tanque debido a que encontraba fue de uso y debido a que era más corto, pero más alto al resto, se le tomaron 8 mediciones a lo largo de cada lado como muestra representativa a esas 2 caras, y se tomaron 4 mediciones correspondientes al ancho y alto también de cada lado como muestra representativa a esas 2 caras. Este equipo no tiene lámina superior.

f. Mástil

Cabe mencionar que el mástil primeramente se encontraba en el pozo TR-1A de la central geotérmica Berlín, pero debido a las operaciones que se estaban realizando este fue trasladado al pozo TR-17 Berlín, cuando se hace este traslado el mástil se desmonta y se descompone en sus secciones que son 4. En este estudio y debido a que todavía estaban en proceso de traslado no se pudo analizar las 4 secciones debido al peligro que esto conllevaba, sin embargo, se tomaron 2 muestras, es decir, 2 secciones como muestra representativa a todo el mástil. A la sección I se le realizaron 5 mediciones a cada columna, pero solo de un lado de la columna (son 4 columnas con 2 lados cada una, o sea tienen forma de L), y solo se tomaron como muestra significativa 2 caras (Norte y Sur), es decir, se realizaron 20 mediciones en total por cara. De igual forma se realizaron 2 mediciones a cada columna cruzada de cada lado analizado, como estas columnas cruzadas son varias se tomó una si y una no analizando

así 5 columnas cruzadas como muestra significativa a cada cara (es decir, 10 mediciones por cara). En total a toda la sección I se le tomaron 40 mediciones. A la sección II, se le hizo una pequeña diferencia en sus mediciones, se tomaron 5 mediciones por cada 2 columnas, pero de los 2 lados, es decir, se analizó la “L” completa, un lado de esta “L” es el Lado I Norte y el otro lado es el Lado II superior, este Lado II superior estaría representado la otra orientación. Al igual que la sección I solo se analizaron 2 caras (Norte y Sur) con la diferencia que estas 2 caras representan las 4 orientaciones (Norte, Sur, Este y Oeste) ya que se analizó la “L” completa, en cambio en la sección I esto no sucede ya que solo se analizó un lado de esa “L” que representaba únicamente el Norte o el Sur. De igual forma para las columnas cruzadas se midió una si y una no, realizando 6 mediciones en total por cada lado de esa columna en forma de “L, es decir, 6 mediciones para Lado I Norte y 6 mediciones para Lado II superior de esta columna cruzada. En total a toda la sección II se le tomaron 44 mediciones.

g. Malacate

Para este equipo la metodología que se utilizó para el número de mediciones fue distinta, ya que aquí solo se tomaron algunas mediciones entre 3, 4, 5 y 8 dependiendo del tamaño de la pieza, si esta era pequeña se tomaron entre 3 a 4 mediciones, si era más grande entre 4 a 5 y así sucesivamente. Y no se analizaron todas las piezas, como muestra se tomaron 4 piezas.

Los principales pasos que se tienen que tener en cuenta para que la medición de espesores sea precisa o fiable y así poder estimar la vida útil del equipo y poder clasificar su ambiente será necesario seguir la siguientes pasos:

3.3. IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS

La primera etapa consiste en realizar un análisis de los equipos más dañados y más corroídos, esto significa conocer los materiales más propensos o susceptibles a la humedad, oxígeno, temperatura, presión, pH, sales disueltas y demás agentes corrosivos como el dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno, etc.

3.4. ESTADO Y PREPARACIÓN DE SUPERFICIES

La forma y la rugosidad de la superficie de prueba son de suma importancia cuando se realizan pruebas de espesor por ultrasonidos. Las superficies rugosas e irregulares pueden

limitar la penetración del ultrasonido a través del material y dar como resultado mediciones inestables y, por lo tanto, poco fiables (Elcometer, 2009).

La superficie que se mide debe estar limpia y libre de partículas pequeñas, óxido o escamas. La presencia de tales obstrucciones evitará que el transductor se asiente correctamente contra la superficie. A menudo, un cepillo de alambre o un raspador será útil para limpiar las superficies. En casos más extremos, se pueden usar lijadoras rotativas o muelas abrasivas, aunque se debe tener cuidado para evitar ranuras en la superficie, que inhibirán el acoplamiento adecuado del transductor (Elcometer, 2009).

Las superficies extremadamente rugosas, como el acabado similar a un guijarro de algunas piezas de hierro fundido, serán las más difíciles de medir. Este tipo de superficies actúan sobre el haz de sonido como el vidrio esmerilado actúa sobre la luz, el haz se difunde y se dispersa en todas direcciones. Además de representar obstáculos para la medición, las superficies rugosas contribuyen a un desgaste excesivo del transductor, especialmente en situaciones en las que el transductor se "frota" a lo largo de la superficie (Elcometer, 2009).

3.5. CALIBRACIÓN CON SONDA CERO

Establecer el punto cero (sonda cero) de su medidor es importante por la misma razón por la que es importante establecer el cero en un micrómetro mecánico. Si el medidor no se 'pone a cero' correctamente, todas las mediciones que realice el medidor tendrán un error de una cantidad fija. Cuando su medidor se pone a cero, este valor de error fijo se mide y se corrige automáticamente en todas las mediciones posteriores (Elcometer, 2009). Para poner a cero el transductor de la Figura 3.1 el manual recomienda lo siguiente:

- i. Encienda el medidor y conecte el transductor.
- ii. Verifique que la superficie de desgaste del transductor esté limpia y libre de residuos.
- iii. En la parte superior de su medidor, sobre la pantalla, está la tapa del compartimento de la batería. Este disco de metal también se usa para poner a cero su medidor. Aplique una sola gota de acoplador ultrasónico a la cara de este disco.

- iv. Presione el transductor contra el disco, asegurándose de que el transductor quede plano contra la superficie del disco. La pantalla debe mostrar algún valor de grosor y el indicador de estabilidad debe tener casi todas sus barras iluminadas.
- v. Mientras el transductor está firmemente acoplado al disco, presione la tecla PRB-0 en el teclado. La pantalla mostrará 'Prb0' mientras calcula su punto cero.
- vi. Retire el transductor del disco de la sonda.

En este punto, su medidor ha calculado con éxito su factor de error interno y compensará este valor en cualquier medición posterior. Aunque el Elcometer 204 recordará la última sonda cero realizada, generalmente es una buena idea realizar una sonda cero siempre que se encienda el medidor. Esto asegurará que el instrumento siempre esté correctamente puesto a cero.



Figura 3.1. Calibración con sonda cero (Elcometer, 2009)

3.6. MEDICIÓN DE ESPESORES

Una vez preparada la superficie y calibrado el transductor con la sonda cero (punto cero), se procede a la medición del espesor del equipo:

Los pasos a seguir para realizar la medición de espesor son los siguientes:

- i. Aplicar acoplante

Para que el medidor funcione correctamente, no debe haber espacios de aire entre el transductor y la superficie del material a medir. Esto se logra utilizando un material llamado acoplante.

Antes de colocar el transductor en la superficie, coloque una pequeña cantidad del acoplante suministrado con el medidor en la superficie del material. Normalmente, una sola gota es suficiente.

ii. Coloque el transductor sobre la superficie del material a medir.

Presione el transductor en el acoplante. Una presión moderada en la parte superior del transductor con el pulgar o el índice es suficiente; solo es necesario mantener el transductor estacionario y la superficie asentada plana contra la superficie del material.

iii. Leer pantalla

Si se muestran seis o siete barras del indicador de estabilidad, la pantalla leerá el grosor correcto del material directamente debajo del transductor.

Si el indicador de estabilidad muestra menos de cinco barras, o los números en la pantalla parecen erráticos, verifique que haya una película adecuada de acoplante debajo del transductor y que el transductor esté asentado plano contra el material.

El medidor realizará cuatro mediciones por segundo cuando el transductor esté en contacto con la superficie del material. La pantalla se actualiza a medida que se toma cada lectura.

iv. Retire el transductor de la superficie.

La pantalla mostrará la última medición realizada.

Nota:

- A. Ocasionalmente, se extraerá una pequeña película de acoplante entre el transductor y la superficie a medida que se retira el transductor. Cuando esto sucede, el medidor puede realizar una medición a través de esta película de acoplamiento, lo que da como

resultado una medición más grande o más pequeña de lo que debería ser. Este fenómeno es obvio cuando se observa un valor de espesor mientras el transductor está en su lugar, y se observa otro valor después de retirar el transductor. Si esto sucede, vuelva a tomar la lectura usando menos acoplante.

- B. El transductor debe usarse correctamente para que el medidor produzca mediciones precisas y confiables

3.6.1. Medición de tuberías

Al medir un trozo de tubería para determinar el grosor de la pared de la tubería, la orientación del transductor es importante (Elcometer, 2009).

En la Figura 3.2 se muestra que si el diámetro de la tubería es mayor de aproximadamente 100 mm (4”), las mediciones deben realizarse con el transductor orientado de manera que el espacio en la superficie de desgaste sea perpendicular (en ángulo recto) al eje largo de la tubería.

No obstante, si el diámetro de la tubería es pequeño (menor 4”), se deben realizar dos mediciones, una con el espacio de la superficie de desgaste perpendicular al eje largo de la tubería, otra con el espacio paralelo al eje largo de la tubería. El menor de los dos valores mostrados debe tomarse como el grosor en ese punto (Elcometer, 2009).

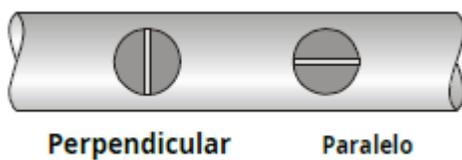


Figura 3.2. Modo de lectura en tuberías (Elcometer, 2009)

3.6.2. Medición de superficies calientes

La velocidad del sonido a través de un material depende de la temperatura del material. A medida que los materiales se calientan, la velocidad del sonido en el material disminuye. En la mayoría de las aplicaciones con temperaturas de superficie inferiores a aproximadamente 100 ° C (~ 200 ° F), no se requieren procedimientos especiales. A temperaturas superiores a

100 ° C (~ 200 ° F), el cambio en la velocidad del sonido del material que se mide comienza a tener un efecto notable sobre la precisión de la medición ultrasónica (Elcometer, 2009).

3.6.3. Medición con pintura y revestimientos

Al medir a través de pinturas y revestimientos, la velocidad del sonido de la pintura/revestimiento puede ser significativamente diferente de la velocidad del sonido del material real que se está midiendo. Un ejemplo de esto sería una tubería de acero dulce con aproximadamente 0.6 mm (0.025 ") de revestimiento en la superficie. La velocidad del sonido de la tubería es 5918 m/s (0.2330 in/μseg), y la velocidad del sonido de la pintura es 2286 m/s (0.0900 in/μseg). Su medidor está calibrado para acero dulce y mide a través de ambos materiales; el espesor real del recubrimiento parecerá ser 2.5 veces más grueso de lo que realmente es, como resultado de las diferencias en la velocidad del sonido (Elcometer, 2009).

3.7. CLASIFICACIÓN DE AMBIENTES Y VIDA ESTIMADA DEL EQUIPO

- i. Medir el espesor real del equipo.

En este apartado es de aplicar los pasos mencionados anteriormente del procedimiento de medición de espesores.

Para esta medición se utilizará como instrumento de medida el “Elcometer 204” el cual es un medidor ultrasónico de espesor de acero y está basado en la normativa ASTM E 797 titulada como: “Práctica estándar para la medición de espesor por el método ultrasónico. Manual de contacto pulso-eco”

- ii. Comparar el espesor real con el espesor de fábrica.

Esto permitirá identificar como ha variado el espesor del equipo tras los años de exposición y será un factor clave para poder hacer una diferencia entre ambos valores.

- iii. Determinar el espesor perdido tras los años de exposición.

Aquí se puede conocer de manera puntual cuanto es el espesor que ha perdido el equipo en todos sus años de exposición en dicho ambiente.

Perdida de espesor en años exp. = Espesor de fábrica – Espesor real (**Ecuación 3. 1**)

iv. Determinar el espesor tras un año de exposición (velocidad de corrosión).

Con la ayuda del espesor perdido tras el número de años expuestos y teniendo en cuenta que el material ha sufrido una degradación lineal cada año, se puede estimar cuanto es el espesor que ha perdido el equipo en un año de exposición. Es decir, la siguiente ecuación también es el equivalente a la velocidad de corrosión (Parra Cacuango, Enero 2013):

$$\text{Pérdida de espesor al año exp.} = \frac{\text{Pérdida de espesor en años exp.}}{\text{años exp.}} \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

Nota: Esta será una consideración que se hará debido a que no se conocen los factores de diseño del equipo. Cabe mencionar que no considerarlos siempre es una buena aproximación.

v. Clasificar el ambiente.

Esta clasificación se hará en base a la normativa ISO 12944-2 titulada como: "Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pinturas protectores".

La pérdida de espesor del equipo tras un año de exposición será clave para su identificación, para esto se ubicará el valor puntual del espesor en el rango correspondiente según norma. Una vez ubicado el espesor se seleccionará la fila y se leerá que tipo de categoría le corresponde a ese rango de espesor y se hará su clasificación.

vi. Cuantificar la vida útil estimada del equipo en base al ambiente en que se encuentra.

Para esto se procederá con la siguiente ecuación (Parra Cacuango, Enero 2013):

$$t_{v.u} = \frac{E_r - E_f}{V_c} \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

Donde:

E_r = Espesor real

E_f = Espesor de falla

V_c = Velocidad de corrosión tras un año de exposición

$t_{v.u}$ = Tiempo de vida útil estimada según el ambiente

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo IV se muestran todas las mediciones de espesor realizadas con el equipo de ultrasonido industrial siguiendo la metodología descrita en el capítulo III. De la Tabla 4.1 a la Tabla 4.7 se presentan de manera puntual y por orientación/cara todos los resultados obtenidos de velocidad de corrosión (pérdida de espesor al año), vida útil estimada y categoría de corrosividad del ambiente de los equipos e instalaciones de perforación de LaGeo. Asimismo, estos resultados presentan el promedio por orientación.

Dentro de los equipos analizados se encuentran: el tanque de sedimentación, el tanque de succión de bombas, el circuito de tanques de almacenamiento de agua (3 tanques), el mástil y el malacate; los cuales se encontraban ubicados en el pozo TR-1A Berlín, Usulután.

De la Figura 4.1 a la 4.8 se presentan los análisis de resultados de estos equipos. Este análisis se ha realizado por orientación o cara y de manera general. Se muestra por orientación con el objetivo de determinar la cara más susceptible a corrosión y más propensa a sufrir grietas o daños. Y se ha hecho de manera general con la finalidad de conocer la gravedad de la corrosión en el mismo, para así poder conocer mejor cuáles son sus causas, para poder incentivar sobre la importancia de los mantenimientos y sobre todo para conocer el tiempo estimado global y la categoría general del ambiente.

Cabe mencionar que estos equipos de perforación son sujetos a movilidad de un pozo a otro pozo y es por ello, que los resultados mostrados en este documento son un promedio general.

4.1. RESULTADOS

A continuación de la Tabla 4.1 a la Tabla 4.7 se detallan los resultados obtenidos correspondientes de manera puntual y promedio por orientación a cada equipo.

4.1.1. Tanque de sedimentación

Tabla 4.1. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de sedimentación

Lugar y Ubicación del lugar					Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1				
Nombre del Equipo					Tanque de sedimentación				
Años de exposición					13 años (desde 2008)				
Quién hace la prueba					Br. Ernesto Dubón				
Fecha					8/10/2021				
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	3/8 Cara superior	0.273	0.102	2,590.80	199.29	C5 Muy Alta	0.00785	0.1699	13.14
2		0.247	0.128	3,251.20	250.09	CX Extrema	0.00985	0.1699	7.83
3		0.254	0.121	3,073.40	236.42	CX Extrema	0.00931	0.1699	9.04
4		0.231	0.144	3,657.60	281.35	CX Extrema	0.01108	0.1699	5.52
5		0.277	0.098	2,489.20	191.48	C5 Muy Alta	0.00754	0.1699	14.21
6		0.235	0.14	3,556.00	273.54	CX Extrema	0.01077	0.1699	6.05
Promedio		0.249	0.122	3103.03	238.69	CX Extrema	0.00940	0.1699	9.30
1	5/16 Cara Norte	0.243	0.070	1,765.30	135.79	C5 Muy Alta	0.00535	0.1699	13.67
2		0.257	0.056	1,409.70	108.44	C5 Muy Alta	0.00427	0.1699	20.40
3		0.222	0.091	2,298.70	176.82	C5 Muy Alta	0.00696	0.1699	7.48
4		0.236	0.077	1,943.10	149.47	C5 Muy Alta	0.00588	0.1699	11.23
5		0.242	0.071	1,790.70	137.75	C5 Muy Alta	0.00542	0.1699	13.30
6		0.227	0.086	2,171.70	167.05	C5 Muy Alta	0.00658	0.1699	8.68
Promedio		0.238	0.075	1896.53	145.89	C5 Muy Alta	0.00574	0.1699	12.46
1	5/16 Cara Poniente	0.243	0.070	1,765.30	135.79	C5 Muy Alta	0.00535	0.1699	13.67
2		0.249	0.064	1,612.90	124.07	C5 Muy Alta	0.00488	0.1699	16.19
3		0.242	0.071	1,790.70	137.75	C5 Muy Alta	0.00542	0.1699	13.30
4		0.242	0.071	1,790.70	137.75	C5 Muy Alta	0.00542	0.1699	13.30
Promedio		0.244	0.069	1739.90	133.84	C5 Muy Alta	0.00527	0.1699	14.11
1	5/16 Cara Sur	0.242	0.071	1,790.70	137.75	C5 Muy Alta	0.00542	0.1699	13.30
2		0.243	0.070	1,765.30	135.79	C5 Muy Alta	0.00535	0.1699	13.67
3		0.25	0.063	1,587.50	122.12	C5 Muy Alta	0.00481	0.1699	16.66
4		0.245	0.068	1,714.50	131.88	C5 Muy Alta	0.00519	0.1699	14.46

(Continúa ...)

Tabla 4.1. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de sedimentación
(Continuación)

Lugar y Ubicación del lugar					Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1				
Nombre del Equipo					Tanque de sedimentación				
Años de exposición					13 años (desde 2008)				
Quien hace la prueba					Br. Ernesto Dubón				
Fecha					8/10/2021				
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
5		0.212	0.101	2,552.70	196.36	C5 Muy Alta	0.00773	0.1699	5.45
6		0.234	0.079	1,993.90	153.38	C5 Muy Alta	0.00604	0.1699	10.62
Promedio		0.238	0.075	1900.77	146.21	C5 Muy Alta	0.00576	0.1699	12.36
1	5/16	0.233	0.080	2,019.30	155.33	C5 Muy Alta	0.00612	0.1699	10.32
2		0.24	0.073	1,841.50	141.65	C5 Muy Alta	0.00558	0.1699	12.57
3	Cara Oriente	0.228	0.085	2,146.30	165.10	C5 Muy Alta	0.00650	0.1699	8.94
4		0.232	0.081	2,044.70	157.28	C5 Muy Alta	0.00619	0.1699	10.03
Promedio		0.233	0.079	2012.95	154.84	C5 Muy Alta	0.00610	0.1699	10.46

Mediciones realizadas con la autorización de la Gerencia de perforación de LaGeo, para la Central Geotérmica de Berlín-Usulután-El Salvador.

4.1.2. Tanque de succión de bombas

Tabla 4.2. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de succión de bombas.

Lugar y Ubicación del lugar					Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1				
Nombre del Equipo					Tanque de succión de bombas				
Años de exposición					13 años (desde 2008)				
Quien hace la prueba					Br. Ernesto Dubón				
Fecha					8/10/2021				
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	3/8 Cara superior	0.296	0.142	3,594.1	276.47	CX Extrema	0.01088	0.124	15.80
2		0.309	0.129	3,263.9	251.07	CX Extrema	0.00988	0.124	18.72
3		0.242	0.196	4,965.7	381.98	CX Extrema	0.01504	0.124	7.85
4		0.24	0.198	5,016.5	385.88	CX Extrema	0.01519	0.124	7.64
Promedio		0.272	0.166	4210.1	323.85	CX Extrema	0.01275	0.124	12.50
1	5/16 Cara Norte	0.209	0.104	2,628.9	202.22	C5 Muy Alta	0.00796	0.124	10.68
2		0.237	0.076	1,917.7	147.52	C5 Muy Alta	0.00581	0.124	19.46
3		0.227	0.086	2,171.7	167.05	C5 Muy Alta	0.00658	0.124	15.66
4		0.239	0.074	1,866.9	143.61	C5 Muy Alta	0.00565	0.124	20.34
Promedio		0.228	0.0845	2146.3	165.10	C5 Muy Alta	0.00650	0.124	16.53
1	5/16 Cara Poniente	0.252	0.061	1,536.7	118.21	C5 Muy Alta	0.00465	0.124	27.50
2		0.236	0.077	1,943.1	149.47	C5 Muy Alta	0.00588	0.124	19.03
3		0.249	0.064	1,612.9	124.07	C5 Muy Alta	0.00488	0.124	25.59
4		0.242	0.071	1,790.7	137.75	C5 Muy Alta	0.00542	0.124	21.76
5		0.216	0.097	2,451.1	188.55	C5 Muy Alta	0.00742	0.124	12.39
6		0.241	0.072	1,816.1	139.70	C5 Muy Alta	0.00550	0.124	21.27
Promedio		0.239	0.073	1858.4	142.96	C5 Muy Alta	0.00563	0.124	21.26

(Continúa ...)

Tabla 4.2. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de succión de bombas (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar		Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1							
Nombre del Equipo		Tanque de succión de bombas							
Años de exposición		13 años (desde 2008)							
Quien hace la prueba		Br. Ernesto Dubón							
Fecha		8/10/2021							
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	5/16	0.246	0.067	1,689.1	129.93	C5 Muy Alta	0.00512	0.124	23.85
2	Cara Sur	0.24	0.073	1,841.5	141.65	C5 Muy Alta	0.00558	0.124	20.80
3		0.249	0.064	1,612.9	124.07	C5 Muy Alta	0.00488	0.124	25.59
4		0.235	0.078	1,968.5	151.42	C5 Muy Alta	0.00596	0.124	18.62
Promedio		0.243	0.070	1778.0	136.77	C5 Muy Alta	0.00538	0.124	22.21
1	5/16 Cara Oriente	0.23	0.083	2,095.5	161.19	C5 Muy Alta	0.00635	0.124	16.70
2		0.228	0.085	2,146.3	165.10	C5 Muy Alta	0.00650	0.124	16.00
3		0.25	0.063	1,587.5	122.12	C5 Muy Alta	0.00481	0.124	26.21
4		0.235	0.078	1,968.5	151.42	C5 Muy Alta	0.00596	0.124	18.62
5		0.237	0.076	1,917.7	147.52	C5 Muy Alta	0.00581	0.124	19.46
6		0.242	0.071	1,790.7	137.75	C5 Muy Alta	0.00542	0.124	21.76
Promedio	0.237	0.076	1917.7	147.52	C5 Muy Alta	0.00581	0.124	19.79	

Mediciones realizadas con la autorización de la Gerencia de perforación de LaGeo, para la Central Geotérmica de Berlín-Usulután-El Salvador.

4.1.3. Tanque de almacenamiento de agua N° 1

Tabla 4.3. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 1

Lugar y Ubicación del lugar					Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1				
Nombre del Equipo					Tanque de almacenamiento de agua N° 1				
Años de exposición					13 años (desde 2008)				
Quien hace la prueba					Br. Julio Zeceña				
Fecha					14/10/2021				
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	5/16 Cara Norte	0.231	0.0815	2070.10	159.24	C5 Muy Alta	0.0063	0.1537	12.33
2		0.237	0.0755	1917.70	147.52	C5 Muy Alta	0.0058	0.1537	14.34
3		0.228	0.0845	2146.30	165.10	C5 Muy Alta	0.0065	0.1537	11.43
4		0.233	0.0795	2019.30	155.33	C5 Muy Alta	0.0061	0.1537	12.97
5		0.227	0.0855	2171.70	167.05	C5 Muy Alta	0.0066	0.1537	11.15
6		0.233	0.0795	2019.30	155.33	C5 Muy Alta	0.0061	0.1537	12.97
7		0.234	0.0785	1993.90	153.38	C5 Muy Alta	0.0060	0.1537	13.30
8		0.231	0.0815	2070.10	159.24	C5 Muy Alta	0.0063	0.1537	12.33
Promedio		0.232	0.081	2051.05	157.77	C5 Muy Alta	0.0062	0.1537	12.60
1	5/16 Cara Poniente	0.230	0.083	2095.50	161.19	C5 Muy Alta	0.0063	0.1537	12.02
2		0.237	0.0755	1917.70	147.52	C5 Muy Alta	0.0058	0.1537	14.34
3		0.228	0.0845	2146.30	165.10	C5 Muy Alta	0.0065	0.1537	11.43
4		0.235	0.0775	1968.50	151.42	C5 Muy Alta	0.0060	0.1537	13.64
Promedio		0.233	0.080	2032.00	156.31	C5 Muy Alta	0.0062	0.1537	12.86
1	5/16 Cara Sur	0.242	0.0705	1790.70	137.75	C5 Muy Alta	0.0054	0.1537	16.28
2		0.234	0.0785	1993.90	153.38	C5 Muy Alta	0.0060	0.1537	13.30
3		0.234	0.0785	1993.90	153.38	C5 Muy Alta	0.0060	0.1537	13.30
4		0.241	0.0715	1816.10	139.70	C5 Muy Alta	0.0055	0.1537	15.87
5		0.240	0.073	1841.50	141.65	C5 Muy Alta	0.0056	0.1537	15.47
6		0.236	0.0765	1943.10	149.47	C5 Muy Alta	0.0059	0.1537	13.99

(Continúa ...)

Tabla 4.3. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 1 (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar					Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1				
Nombre del Equipo					Tanque de almacenamiento de agua N° 1				
Años de exposición					13 años (desde 2008)				
Quien hace la prueba					Br. Julio Zeceña				
Fecha					14/10/2021				
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
7		0.229	0.0835	2120.90	163.15	C5 Muy Alta	0.0064	0.1537	11.72
8		0.233	0.0795	2019.30	155.33	C5 Muy Alta	0.0061	0.1537	12.97
Promedio		0.236	0.076	1939.93	149.23	C5 Muy Alta	0.0059	0.1537	14.11
1	5/16	0.249	0.0635	1612.90	124.07	C5 Muy Alta	0.0049	0.1537	19.51
2	Cara Oriente	0.239	0.0735	1866.90	143.61	C5 Muy Alta	0.0057	0.1537	15.09
3		0.234	0.0785	1993.90	153.38	C5 Muy Alta	0.0060	0.1537	13.30
4		0.241	0.0715	1816.10	139.70	C5 Muy Alta	0.0055	0.1537	15.87
Promedio		0.241	0.072	1822.45	140.19	C5 Muy Alta	0.0055	0.1537	15.94

Mediciones realizadas con la autorización de la Gerencia de perforación de LaGeo, para la Central Geotérmica de Berlín-Usulután-El Salvador.

4.1.4. Tanque de almacenamiento de agua N° 2

Tabla 4.4. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 2

Lugar y Ubicación del lugar					Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1				
Nombre del Equipo					Tanque de almacenamiento de agua N° 2				
Años de exposición					13 años (desde 2008)				
Quien hace la prueba					Br. Julio Zeceña				
Fecha					14/10/2021				
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	5/16 Cara Norte	0.197	0.1155	2933.70	225.67	CX Extrema	0.0089	0.126	7.99
2		0.174	0.1385	3517.90	270.61	CX Extrema	0.0107	0.126	4.51
3		0.181	0.1315	3340.10	256.93	CX Extrema	0.0101	0.126	5.44
4		0.181	0.1315	3340.10	256.93	CX Extrema	0.0101	0.126	5.44
5		0.173	0.1395	3543.30	272.56	CX Extrema	0.0107	0.126	4.38
6		0.236	0.0765	1943.10	149.47	C5 Muy Alta	0.0059	0.126	18.69
7		0.242	0.071	1790.70	137.75	C5 Muy Alta	0.0054	0.126	21.39
8		0.180	0.1325	3365.50	258.88	CX Extrema	0.0102	0.126	5.30
9		0.191	0.1215	3086.10	237.39	CX Extrema	0.0093	0.126	6.95
10		0.184	0.1285	3263.90	251.07	CX Extrema	0.0099	0.126	5.87
Promedio		0.194	0.119	3012.44	231.73	CX Extrema	0.0091	0.126	7.44
1	5/16 Cara Poniente	0.193	0.1195	3035.30	233.48	CX Extrema	0.0092	0.126	7.29
2		0.191	0.1215	3086.10	237.39	CX Extrema	0.0093	0.126	6.95
3		0.213	0.0995	2527.30	194.41	C5 Muy Alta	0.0077	0.126	11.37
4		0.158	0.1545	3924.30	301.87	CX Extrema	0.0119	0.126	2.69
Promedio			0.189	0.124	3143.25	241.79	CX Extrema	0.0095	0.126
1	5/16 Cara Sur	0.194	0.1185	3009.90	231.53	CX Extrema	0.0091	0.126	7.46
2		0.202	0.1105	2806.70	215.90	CX Extrema	0.0085	0.126	8.94

(Continúa ...)

Tabla 4.4. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 2 (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar					Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1				
Nombre del Equipo					Tanque de almacenamiento de agua N° 2				
Años de exposición					13 años (desde 2008)				
Quien hace la prueba					Br. Julio Zeceña				
Fecha					14/10/2021				
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
3		0.194	0.1185	3009.90	231.53	CX Extrema	0.0091	0.126	7.46
4		0.188	0.1245	3162.30	243.25	CX Extrema	0.0096	0.126	6.47
5		0.189	0.124	3136.90	241.30	CX Extrema	0.0095	0.126	6.63
6		0.236	0.0765	1943.10	149.47	C5 Muy Alta	0.0059	0.126	18.69
7		0.241	0.0715	1816.10	139.70	C5 Muy Alta	0.0055	0.126	20.91
8		0.188	0.1245	3162.30	243.25	CX Extrema	0.0096	0.126	6.47
9		0.239	0.0735	1866.90	143.61	C5 Muy Alta	0.0057	0.126	19.99
10		0.167	0.1455	3695.70	284.28	CX Extrema	0.0112	0.126	3.66
Promedio		0.204	0.109	2760.98	212.38	CX Extrema	0.0084	0.126	10.67
1		5/16 Cara Oriente	0.181	0.1315	3340.10	256.93	CX Extrema	0.0101	0.126
2	0.178		0.1345	3416.30	262.79	CX Extrema	0.0103	0.126	5.03
3	0.163		0.1495	3797.30	292.10	CX Extrema	0.0115	0.126	3.22
4	0.237		0.0755	1917.70	147.52	C5 Muy Alta	0.0058	0.126	19.11
Promedio	0.190		0.123	3117.85	239.83	CX Extrema	0.0094	0.126	8.20

Mediciones realizadas con la autorización de la Gerencia de perforación de LaGeo, para la Central Geotérmica de Berlín-Usulután-El Salvador.

4.1.5. Tanque de almacenamiento de agua N° 3

Tabla 4.5. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 3

Lugar y Ubicación del lugar				Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1					
Nombre del Equipo				Tanque de almacenamiento de agua N° 3					
Años de exposición				13 años (desde 2008)					
Quien hace la prueba				Br. Julio Zeceña					
Fecha				14/10/2021					
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	5/16 Cara Norte	0.164	0.1485	3771.90	290.15	CX Extrema	0.0114	0.1537	0.90
2		0.160	0.153	3873.50	297.96	CX Extrema	0.0117	0.1537	0.54
3		0.166	0.1465	3721.10	286.24	CX Extrema	0.0113	0.1537	1.09
4		0.188	0.1245	3162.30	243.25	CX Extrema	0.0096	0.1537	3.58
5		0.216	0.0965	2451.10	188.55	C5 Muy Alta	0.0074	0.1537	8.39
6		0.248	0.0645	1638.30	126.02	C5 Muy Alta	0.0050	0.1537	19.01
7		0.239	0.0735	1866.90	143.61	C5 Muy Alta	0.0057	0.1537	15.09
8		0.237	0.0755	1917.70	147.52	C5 Muy Alta	0.0058	0.1537	14.34
Promedio		0.202	0.110	2800.35	215.41	CX Extrema	0.0085	0.1537	7.87
1	5/16 Cara Poniente	0.216	0.097	2451.10	188.55	C5 Muy Alta	0.0074	0.1537	8.39
2		0.198	0.1145	2908.30	223.72	CX Extrema	0.0088	0.1537	5.03
3		0.212	0.1005	2552.70	196.36	C5 Muy Alta	0.0077	0.1537	7.54
4		0.199	0.1135	2882.90	221.76	CX Extrema	0.0087	0.1537	5.19
Promedio			0.206	0.106	2698.75	207.60	CX Extrema	0.0082	0.1537
1	5/16 Cara Sur	0.241	0.0715	1816.10	139.70	C5 Muy Alta	0.0055	0.1537	15.87
2		0.154	0.1585	4025.90	309.68	C5 Muy Alta	0.0122	0.1537	0.02
3		0.248	0.0645	1638.30	126.02	C5 Muy Alta	0.0050	0.1537	19.01

(Continúa ...)

Tabla 4.5. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para tanque de almacenamiento de agua N° 3 (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar				Central Geotérmica Berlín, Reinyección Total Berlín (TRB), Pozo TR-1						
Nombre del Equipo				Tanque de almacenamiento de agua N° 3						
Años de exposición				13 años (desde 2008)						
Quien hace la prueba				Br. Julio Zeceña						
Fecha				14/10/2021						
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)	
4		0.227	0.0855	2171.70	167.05	C5 Muy Alta	0.0066	0.1537	11.15	
5		0.248	0.065	1638.30	126.02	C5 Muy Alta	0.0050	0.1537	19.01	
6		0.248	0.0645	1638.30	126.02	C5 Muy Alta	0.0050	0.1537	19.01	
7		0.242	0.0705	1790.70	137.75	C5 Muy Alta	0.0054	0.1537	16.28	
8		0.249	0.0635	1612.90	124.07	C5 Muy Alta	0.0049	0.1537	19.51	
Promedio		0.232	0.080	2041.53	157.04	C5 Muy Alta	0.0062	0.1537	14.98	
1		5/16 Cara Oriente	0.216	0.0965	2451.10	188.55	C5 Muy Alta	0.0074	0.1537	8.39
2			0.209	0.1035	2628.90	202.22	CX Extrema	0.0080	0.1537	6.95
3	0.227		0.0855	2171.70	167.05	C5 Muy Alta	0.0066	0.1537	11.15	
4	0.224		0.0885	2247.90	172.92	C5 Muy Alta	0.0068	0.1537	10.33	
Promedio	0.219		0.0935	2374.90	182.68	C5 Muy Alta	0.0072	0.1537	9.20	

Mediciones realizadas con la autorización de la Gerencia de perforación de LaGeo, para la Central Geotérmica de Berlín-Usulután-El Salvador.

4.1.6. Mástil

Tabla 4.6. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para mástil

Lugar y Ubicación del lugar				Central Geotérmica Berlín, Pozo TR-17					
Nombre del Equipo				Mástil-Sección I					
Años de exposición				35 años (desde 1985)					
Quien hace la prueba				Br. Julio Zeceña					
Fecha				25/10/2021					
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	5/8 Norte	0.392	0.233	5918.2	169.09	C5 Muy alta	0.00666	0.25	21.33
2		0.393	0.232	5892.8	168.37	C5 Muy alta	0.00663	0.25	21.57
3		0.4	0.225	5715.0	163.29	C5 Muy alta	0.00643	0.25	23.33
4		0.392	0.233	5918.2	169.09	C5 Muy alta	0.00666	0.25	21.33
5		0.402	0.223	5664.2	161.83	C5 Muy alta	0.00637	0.25	23.86
6		0.4	0.225	5715.0	163.29	C5 Muy alta	0.00643	0.25	23.33
7		0.373	0.252	6400.8	182.88	C5 Muy alta	0.00720	0.25	17.08
8		0.377	0.248	6299.2	179.98	C5 Muy alta	0.00709	0.25	17.92
9		0.375	0.25	6350.0	181.43	C5 Muy alta	0.00714	0.25	17.50
10		0.38	0.245	6223.0	177.80	C5 Muy alta	0.00700	0.25	18.57
Promedio		0.3884	0.2366	6009.64	171.70	C5 Muy alta	0.00676	0.25	20.58
1	7/16 Norte cruzadas	0.242	0.1955	4965.7	141.88	C5 Muy alta	0.00559	0.1875	9.76
2		0.246	0.1915	4864.1	138.97	C5 Muy alta	0.00547	0.1875	10.69
3		0.356	0.0815	2070.1	59.15	C4 Alta	0.00233	0.1875	72.36
4		0.361	0.0765	1943.1	55.52	C4 Alta	0.00219	0.1875	79.38
5		0.371	0.0665	1689.1	48.26	C3 Media	0.00190	0.1875	96.58
6		0.248	0.1895	4813.3	137.52	C5 Muy alta	0.00541	0.1875	11.17
7		0.367	0.0705	1790.7	51.16	C4 Alta	0.00201	0.1875	89.11
8		0.36	0.0775	1968.5	56.24	C4 Alta	0.00221	0.1875	77.90
9		0.304	0.1335	3390.9	96.88	C5 Muy alta	0.00381	0.1875	30.54

(Continúa ...)

Tabla 4.6. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para mástil (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar		Central Geotérmica Berlín, Pozo TR-17							
Nombre del Equipo		Mástil-Sección I							
Años de exposición		35 años (desde 1985)							
Quien hace la prueba		Br. Julio Zeceña							
Fecha		25/10/2021							
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
10		0.307	0.1305	3314.7	94.71	C5 Muy alta	0.00373	0.1875	32.05
Promedio		0.3162	0.1213	3081.02	88.03	C5 Muy alta	0.00347	0.1875	50.96
1	5/8 Sur	0.38	0.245	6223.0	177.80	C5 Muy alta	0.00700	0.25	18.57
2		0.382	0.243	6172.2	176.35	C5 Muy alta	0.00694	0.25	19.01
3		0.488	0.137	3479.8	99.42	C5 Muy alta	0.00391	0.25	60.80
4		0.376	0.249	6324.6	180.70	C5 Muy alta	0.00711	0.25	17.71
5		0.491	0.134	3403.6	97.25	C5 Muy alta	0.00383	0.25	62.95
6		0.494	0.131	3327.4	95.07	C5 Muy alta	0.00374	0.25	65.19
7		0.49	0.135	3429.0	97.97	C5 Muy alta	0.00386	0.25	62.22
8		0.357	0.268	6807.2	194.49	C5 Muy alta	0.00766	0.25	13.97
9		0.498	0.127	3225.8	92.17	C5 Muy alta	0.00363	0.25	68.35
10		0.489	0.136	3454.4	98.70	C5 Muy alta	0.00389	0.25	61.51
Promedio		0.4445	0.1805	4584.7	130.99	C5 Muy alta	0.00516	0.25	45.03
1	7/16 Sur cruzadas	0.305	0.1325	3365.5	96.16	C5 Muy alta	0.00379	0.1875	31.04
2		0.361	0.0765	1943.1	55.52	C4 Alta	0.00219	0.1875	79.38
3		0.237	0.2005	5092.7	145.51	C5 Muy alta	0.00573	0.1875	8.64
4		0.241	0.1965	4991.1	142.60	C5 Muy alta	0.00561	0.1875	9.53
5		0.24	0.1975	5016.5	143.33	C5 Muy alta	0.00564	0.1875	9.30
6		0.24	0.1975	5016.5	143.33	C5 Muy alta	0.00564	0.1875	9.30
7		0.242	0.1955	4965.7	141.88	C5 Muy alta	0.00559	0.1875	9.76
8		0.24	0.1975	5016.5	143.33	C5 Muy alta	0.00564	0.1875	9.30
9		0.241	0.1965	4991.1	142.60	C5 Muy alta	0.00561	0.1875	9.53
10		0.24	0.1975	5016.5	143.33	C5 Muy alta	0.00564	0.1875	9.30

(Continúa ...)

Tabla 4.6. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para mástil (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar		Central Geotérmica Berlín, Pozo TR-17							
Nombre del Equipo		Mástil-Sección II							
Años de exposición		35 años (desde 1985)							
Quien hace la prueba		Br. Julio Zeceña							
Fecha		25/10/2021							
Nº de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
Promedio		0.2587	0.1788	4541.52	129.76	C5 Muy alta	0.00511	0.1875	18.51
1	5/8 Lado I Norte	0.503	0.247	6273.8	179.25	C5 Muy alta	0.00706	0.286	30.75
2		0.503	0.247	6273.8	179.25	C5 Muy alta	0.00706	0.286	30.75
3		0.501	0.249	6324.6	180.70	C5 Muy alta	0.00711	0.286	30.22
4		0.498	0.252	6400.8	182.88	C5 Muy alta	0.00720	0.286	29.44
5		0.505	0.245	6223.0	177.80	C5 Muy alta	0.00700	0.286	31.29
Promedio		0.502	0.248	6299.2	179.98	C5 Muy alta	0.00709	0.286	30.49
1	5/8 Lado II Superior	0.504	0.246	6248.4	178.53	C5 Muy alta	0.00703	0.286	31.02
2		0.499	0.251	6375.4	182.15	C5 Muy alta	0.00717	0.286	29.70
3		0.461	0.289	7340.6	209.73	CX Extrema	0.00826	0.286	21.19
4		0.501	0.249	6324.6	180.70	C5 Muy alta	0.00711	0.286	30.22
5		0.503	0.247	6273.8	179.25	C5 Muy alta	0.00706	0.286	30.75
Promedio		0.494	0.256	6512.6	186.07	C5 Muy alta	0.00733	0.286	28.58
1	7/16 Lado I Norte Cruzada	0.361	0.0765	1943.1	55.52	C4 Alta	0.00219	0.250	50.78
2		0.358	0.0795	2019.3	57.69	C4 Alta	0.00227	0.250	47.55
3		0.387	0.0505	1282.7	36.65	C3 Media	0.00144	0.250	94.95
4		0.384	0.0535	1358.9	38.83	C3 Media	0.00153	0.250	87.66
5		0.366	0.0715	1816.1	51.89	C4 Alta	0.00204	0.250	56.78
6		0.367	0.0705	1790.7	51.16	C4 Alta	0.00201	0.250	58.09
Promedio		0.371	0.067	1701.8	48.62	C3 Media	0.00191	0.250	65.97
1	7/16 Lado II Superior	0.367	0.0705	1790.7	51.16	C4 Alta	0.00201	0.250	58.09
2		0.369	0.0685	1739.9	49.71	C3 Media	0.00196	0.250	60.80
3		0.37	0.0675	1714.5	48.99	C3 Media	0.00193	0.250	62.22

(Continúa ...)

Tabla 4.6. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para mástil (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar				Central Geotérmica Berlín, Pozo TR-17					
Nombre del Equipo				Mástil-Sección II					
Años de exposición				35 años (desde 1985)					
Quien hace la prueba				Br. Julio Zeceña					
Fecha				25/10/2021					
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
4		0.369	0.0685	1739.9	49.71	C3 Media	0.00196	0.250	60.80
5		0.356	0.0815	2070.1	59.15	C4 Alta	0.00233	0.250	45.52
6		0.354	0.0835	2120.9	60.60	C4 Alta	0.00239	0.250	43.59
Promedio		0.364	0.073	1862.7	53.22	C4 Alta	0.00210	0.250	55.17
1	5/8 Lado I Sur	0.498	0.252	6400.8	182.88	C5 Muy alta	0.00720	0.286	29.44
2		0.489	0.261	6629.4	189.41	C5 Muy alta	0.00746	0.286	27.22
3		0.49	0.26	6604.0	188.69	C5 Muy alta	0.00743	0.286	27.46
4		0.512	0.238	6045.2	172.72	C5 Muy alta	0.00680	0.286	33.24
5		0.491	0.259	6578.6	187.96	C5 Muy alta	0.00740	0.286	27.70
Promedio		0.496	0.254	6451.6	184.33	C5 Muy alta	0.00726	0.286	29.01
1	5/8 Lado II Superior	0.483	0.267	6781.8	193.77	C5 Muy alta	0.00763	0.286	25.82
2		0.484	0.266	6756.4	193.04	C5 Muy alta	0.00760	0.286	26.05
3		0.488	0.262	6654.8	190.14	C5 Muy alta	0.00749	0.286	26.98
4		0.485	0.265	6731.0	192.31	C5 Muy alta	0.00757	0.286	26.28
5		0.485	0.265	6731.0	192.31	C5 Muy alta	0.00757	0.286	26.28
Promedio		0.485	0.265	6731.0	192.31	C5 Muy alta	0.00757	0.286	26.29
1	7/16 Lado I Sur Cruzada	0.364	0.0735	1866.9	53.34	C4 Alta	0.00210	0.250	54.29
2		0.367	0.0705	1790.7	51.16	C4 Alta	0.00201	0.250	58.09
3		0.249	0.1885	4787.9	136.80	C5 Muy alta	0.00539	0.250	-0.19
4		0.25	0.1875	4762.5	136.07	C5 Muy alta	0.00536	0.250	0.00
5		0.361	0.0765	1943.1	55.52	C4 Alta	0.00219	0.250	50.78
6		0.361	0.0765	1943.1	55.52	C4 Alta	0.00219	0.250	50.78
Promedio	0.325	0.112	2849.0	81.40	C5 Muy alta	0.00320	0.250	35.63	

(Continúa ...)

Tabla 4.6. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para mástil (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar		Central Geotérmica Berlín, Pozo TR-17							
Nombre del Equipo		Mástil-Sección II							
Años de exposición		35 años (desde 1985)							
Quien hace la prueba		Br. Julio Zeceña							
Fecha		25/10/2021							
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	7/16 Lado II Superior	0.356	0.0815	2070.1	59.15	C4 Alta	0.00233	0.250	45.52
2		0.35	0.0875	2222.5	63.50	C4 Alta	0.00250	0.250	40.00
3		0.252	0.1855	4711.7	134.62	C5 Muy alta	0.00530	0.250	0.38
4		0.255	0.1825	4635.5	132.44	C5 Muy alta	0.00521	0.250	0.96
5		0.361	0.0765	1943.1	55.52	C4 Alta	0.00219	0.250	50.78
6		0.362	0.0755	1917.7	54.79	C4 Alta	0.00216	0.250	51.92
Promedio		0.323	0.115	2916.8	83.34	C5 Muy alta	0.00328	0.250	31.59

Mediciones realizadas con la autorización de la Gerencia de perforación de LaGeo, para la Central Geotérmica de Berlín-Usulután-El Salvador.

4.1.7. Malacate

Tabla 4.7. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para malacate

Lugar y Ubicación del lugar		Central Geotérmica Berlín, Pozo TR-17							
Nombre del Equipo		Malacate							
Años de exposición		41 años (desde 1980)							
Quien hace la prueba		Br. Ernesto Dubón							
Fecha		25/10/2021							
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	3/4 Viga	0.522	0.228	5791.20	141.25	C5 Muy Alta	0.005561	0.286	42.44
2		0.529	0.221	5613.40	136.91	C5 Muy Alta	0.005390	0.286	45.08
3		0.589	0.161	4089.40	99.74	C4 Alta	0.003927	0.286	77.16
4		0.534	0.216	5486.40	133.81	C5 Muy Alta	0.005268	0.286	47.07
5		0.538	0.212	5384.80	131.34	C5 Muy Alta	0.005171	0.286	48.74
Promedio		0.542	0.208	5273.04	128.61	C5 Muy Alta	0.005063	0.286	52.10
1	1/4 Guarda protectora	0.199	0.051	1295.40	31.60	C3 Media	0.001244	0.100	79.59
2		0.198	0.052	1320.80	32.21	C3 Media	0.001268	0.100	77.27
3		0.184	0.066	1676.40	40.89	C3 Media	0.001610	0.100	52.18
4		0.196	0.054	1371.60	33.45	C3 Media	0.001317	0.100	72.89
5		0.197	0.053	1346.20	32.83	C3 Media	0.001293	0.100	75.04
6		0.191	0.059	1498.60	36.55	C3 Media	0.001439	0.100	63.24
7		0.18	0.070	1778.00	43.37	C3 Media	0.001707	0.100	46.86
8		0.191	0.059	1498.60	36.55	C3 Media	0.001439	0.100	63.24
Promedio	0.192	0.058	1473.20	35.93	C3 Media	0.001415	0.100	66.29	

(Continúa ...)

Tabla 4.7. Resultados de mediciones de espesor, clasificación de ambientes y vida útil estimada para malacate (**Continuación**)

Lugar y Ubicación del lugar		Central Geotérmica Berlín, Pozo TR-17							
Nombre del Equipo		Malacate							
Años de exposición		41 años (desde 1980)							
Quien hace la prueba		Br. Ernesto Dubón							
Fecha		25/10/2021							
N° de Medidas	Espesor de fábrica (in)	Espesor real (in)	Perdida de espesor en años exp. (in)	Perdida de espesor en años exp. (µm)	Perdida de espesor al año (µm)	Categoría, Corrosión. (ISO 12944-2)	Perdida de espesor al año (in)	Valor de falla (in)	Vida útil estimada (Años)
1	1/8	0.112	0.023	571.50	13.94	C2 Baja	0.000549	0.100	21.87
2	Tapaderas de cadenas	0.115	0.020	495.30	12.08	C2 Baja	0.000476	0.100	31.54
3		0.118	0.017	419.10	10.22	C2 Baja	0.000402	0.100	44.73
Promedio		0.115	0.020	495.30	12.08	C2 Baja	0.000476	0.100	32.71
1	3/8 Compound-	0.367	0.071	1790.70	43.68	C3 Media	0.001720	0.250	68.04
2		0.364	0.074	1866.90	45.53	C3 Media	0.001793	0.250	63.59
3		0.373	0.065	1638.30	39.96	C3 Media	0.001573	0.250	78.19
4		0.365	0.073	1841.50	44.91	C3 Media	0.001768	0.250	65.03
Promedio		0.367	0.070	1784.35	43.52	C3 Media	0.001713	0.250	68.71

Mediciones realizadas con la autorización de la Gerencia de perforación de LaGeo, para la Central Geotérmica de Berlín-Usulután-El Salvador.

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación de la Figura 4.1 a la Figura 4.8 se presentan los análisis de resultados obtenidos para cada equipo correspondientes a la cara u orientación y a todo el equipo en general.

4.2.1. Tanque de sedimentación

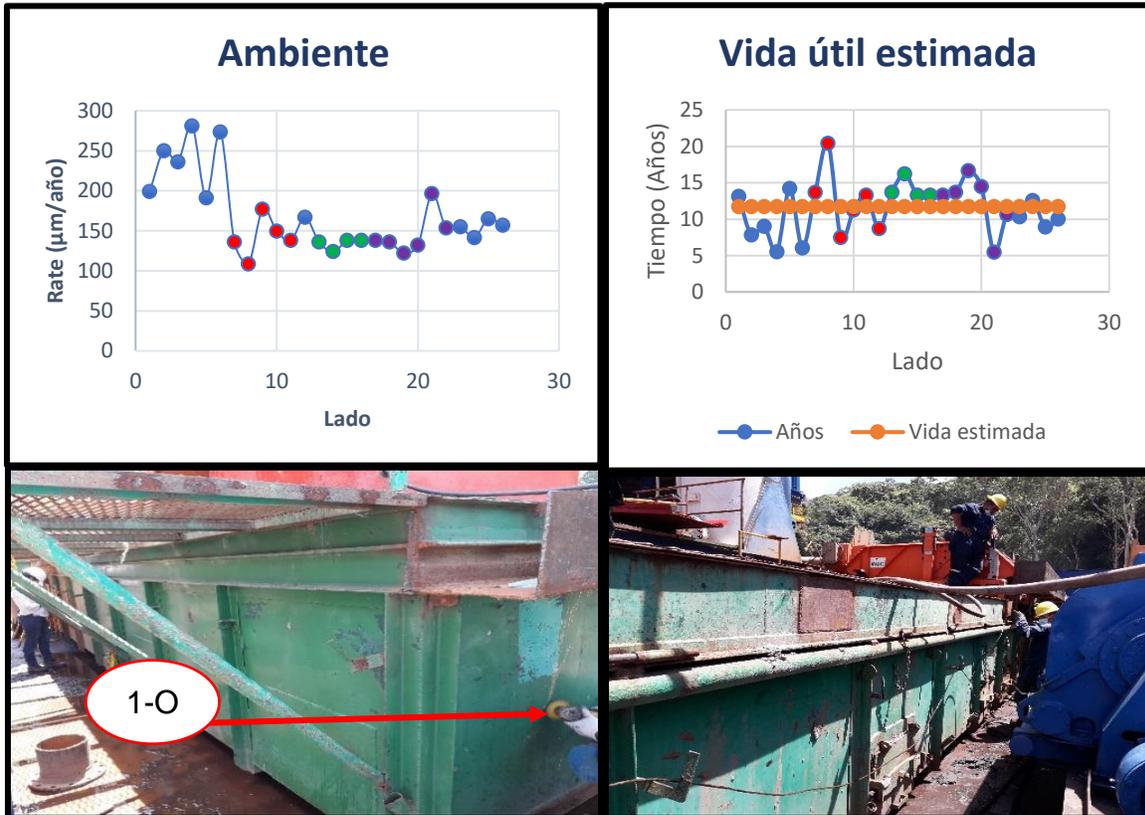


Figura 4.1. Resultados y muestras para tanque de sedimentación

Análisis por cada lado

Para este tanque de sedimentación los análisis realizados dictaminan que el tanque en su cara superior el ambiente resulto ser “CX Extremo” y su tiempo de vida útil estimada es de 9.30 años, para la cara norte, el ambiente de corrosión es “C5 Muy Alta” y que la vida útil estimada para la cara norte es de 12.46 años. Para la cara poniente su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 14.11 años. Para la cara sur el ambiente corrosivo es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 12.36 años. Para la cara oriente su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 10.46 años. Algunos datos varían en cada una de las caras debido a posibles modificaciones de láminas en las diferentes caras y por ende valores diferentes de espesores.

Análisis general del tanque completo:

En promedio para todo el tanque de sedimentación, contabilizando todas sus caras, resulta que su ambiente esta categorizado en “C5 Muy alta” por lo que está en un ambiente altamente corrosivo y su tiempo de vida útil estimado es de 11.74 años (un poco más de 11 años y medios).

4.2.2. Tanque de succión de bombas

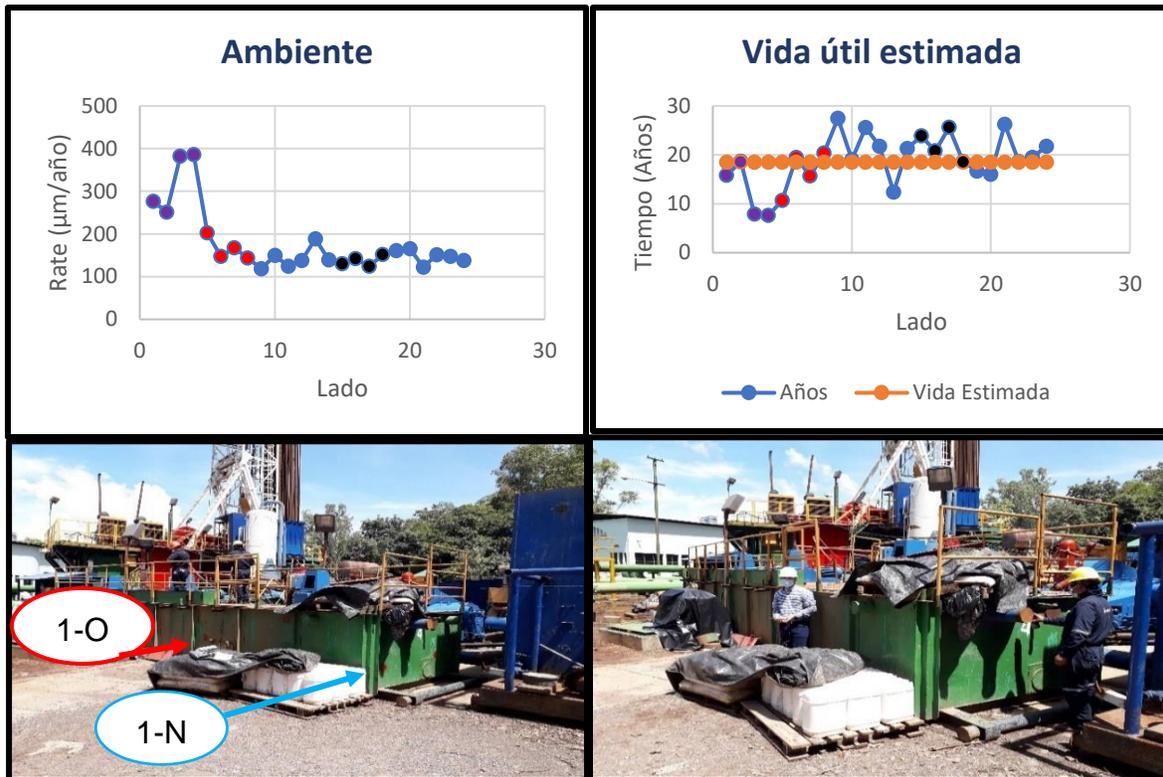


Figura 4.2. Resultados y muestras para tanque de succión de bombas

Análisis por cada lado

Para este tanque de succión de bombas los análisis realizados indican que el tanque en su cara superior el ambiente resulto ser “CX Extremo” y su tiempo de vida útil estimada es de 12.50 años, para la cara norte, el ambiente de corrosión es “C5 Muy Alta” y que la vida útil estimada para la cara norte es de 16.53 años. Para la cara poniente su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 21.26 años. Para la cara sur el ambiente corrosivo es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 22.21 años. Para la cara oriente su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 19.79 años. Algunos datos varían en cada una de las caras debido a posibles modificaciones de láminas en las diferentes caras y por ende valores diferentes de espesores.

Análisis general del tanque completo

En promedio para todo el tanque de succión de bombas, contabilizando todas sus caras, resulta que su ambiente esta categorizado en “C5 Muy alta” por lo que está en un ambiente altamente corrosivo y su tiempo de vida útil estimado es de 18,5 años (18 años y 6 meses). Este tanque de succión tiene una mayor proyección de vida útil comparado al tanque de sedimentación, debido a que el tanque de sedimentación se encuentra aún más expuesto a agentes corrosivos, como el de temperatura y humedad.

4.2.3. Tanque de almacenamiento de agua N° 1

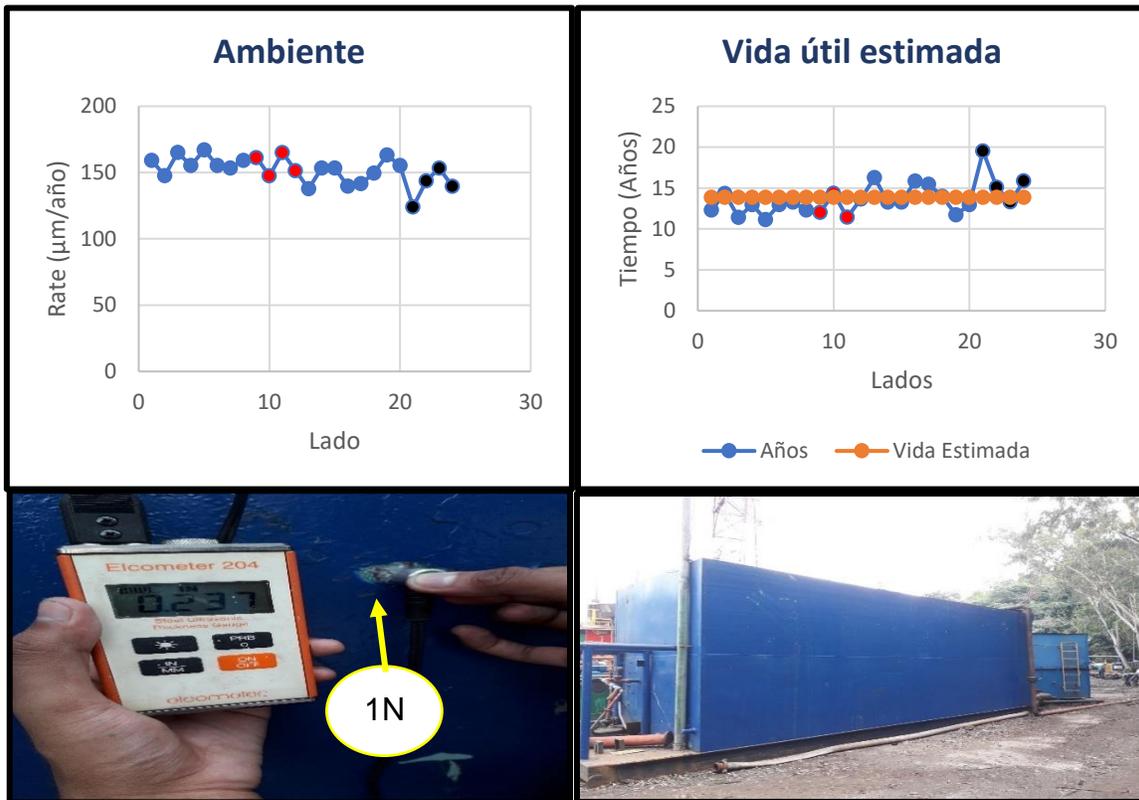


Figura 4.3. Resultados y muestras para tanque de almacenamiento de agua N° 1

Análisis por cada cara

Para este tanque de almacenamiento de agua de condensado los análisis realizados dictaminan que el tanque en su cara norte, el ambiente de corrosión es “C5 Muy Alta” y que la vida útil estimada para la cara norte es de 12.6 años. Para la cara poniente su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 12.86 años. Para la cara sur el ambiente corrosivo es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 14.11 años.

Para la cara oriente su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 15.94 años. Algunos datos varían en cada una de las caras debido a posibles modificaciones de láminas en las diferentes caras y por ende valores diferentes de espesores.

Análisis general del tanque completo

En promedio para todo el tanque de agua 1, contabilizando todas sus caras, resulta que su ambiente esta categorizado en “C5 Muy alta” por lo que está en un ambiente altamente corrosivo y su tiempo de vida útil estimado es de 13.88 años (casi 14 años).

4.2.4. Tanque de almacenamiento de agua N° 2

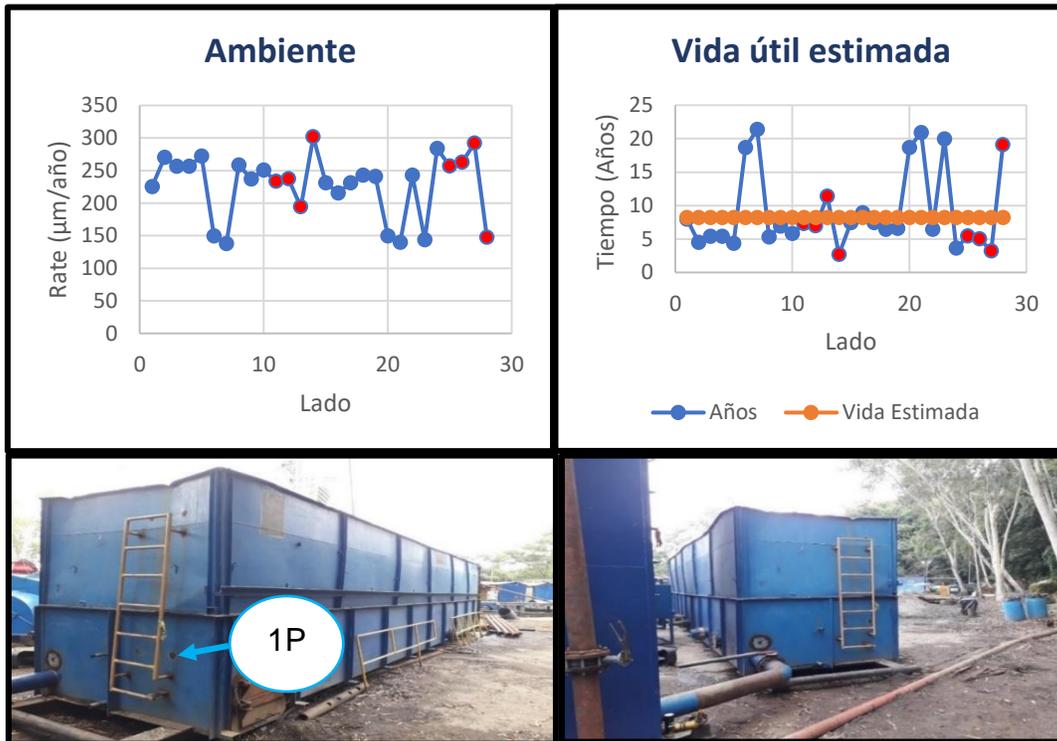


Figura 4.4. Resultados y muestras para tanque de almacenamiento de agua N° 2

Análisis por cada cara

Para este tanque de almacenamiento de agua de condensado los análisis realizados dictaminan que el tanque en su cara norte, el ambiente de corrosión es “CX Extrema” y que la vida útil estimada para la cara norte es de 7.44 años. Para la cara poniente su ambiente es “CX Extrema” y su vida útil estimada es de 6.59 años. Para la cara sur el ambiente corrosivo es “CX Extrema” y su vida útil estimada es de 10.67 años.

Para la cara oriente su ambiente es “CX Extrema” y su vida útil estimada es de 8.20 años. A este tanque está más cercano o expuesto a agentes corrosivos debido a que cada una de sus caras tiene una proyección de vida útil estimada menor comparado con los demás tanques de almacenamiento de agua. Por lo que la corrosión ha atacado más a este tanque a través de los años.

Análisis en general del tanque completo

En promedio para todo el tanque de agua 2, contabilizando todas sus caras, resulta que su ambiente esta categorizado en “CX Extrema” por lo que está en un ambiente aun mayormente corrosivo que el tanque de almacenamiento 1 y su tiempo de vida útil estimado es de 8.23 años (casi 8 años y 3 meses). Como se puede observar a este tanque le quedan menos años de vida útil comparado con el tanque de almacenamiento 1.

4.2.5. Tanque de almacenamiento de agua N° 3

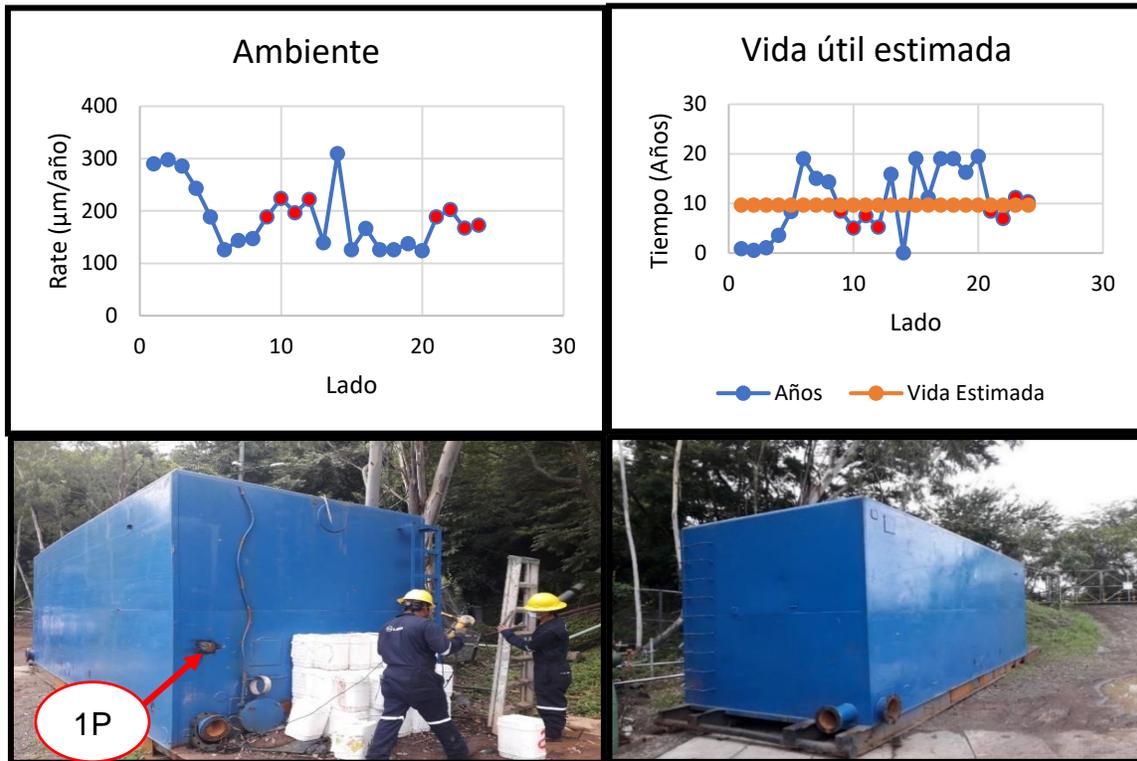


Figura 4.5. Resultados y muestras para tanque de almacenamiento de agua N° 3

Análisis por cada cara

Para este tanque de almacenamiento de agua de condensado los análisis realizados dictaminan que el tanque en su cara norte, el ambiente de corrosión es “CX Extrema” y que la vida útil estimada para la cara norte es de 7.87 años. Para la cara poniente su ambiente es “CX Extrema” y su vida útil estimada es de 6.54 años.

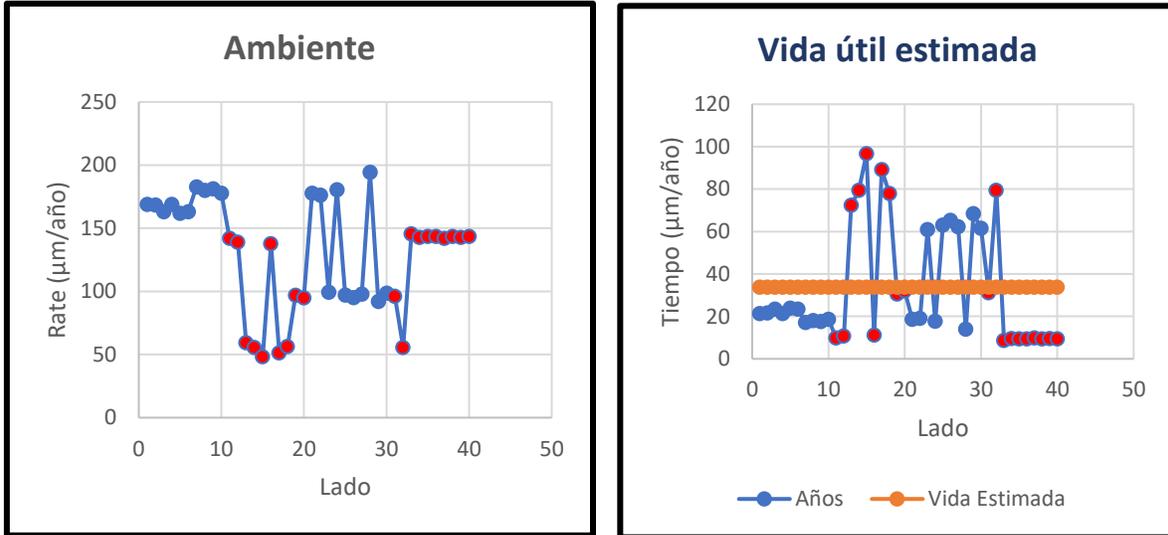
Para la cara sur el ambiente corrosivo es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 14.98 años. Para la cara oriente su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 9.20 años. Algunos datos de igual forma difieren entre sí por diferentes circunstancias, como el cambio de lámina en algún punto de una cara, o que algunos puntos estén más expuestos a temperaturas más elevadas.

Análisis general del tanque completo

En promedio para todo el tanque de agua 3, contabilizando todas sus caras, resulta que su ambiente esta categorizado en “C5 Muy Alta” por lo que está en un ambiente altamente corrosivo y su tiempo de vida útil estimado es de 9.65 años (casi 10 años). Como se puede observar a este tanque le quedan menos años de vida útil comparado con el tanque de almacenamiento 1. Y a la vez le quedan más años de vida útil comparada con el tanque de almacenamiento 2.

4.2.6. Mástil

a) Sección I



b) Sección II

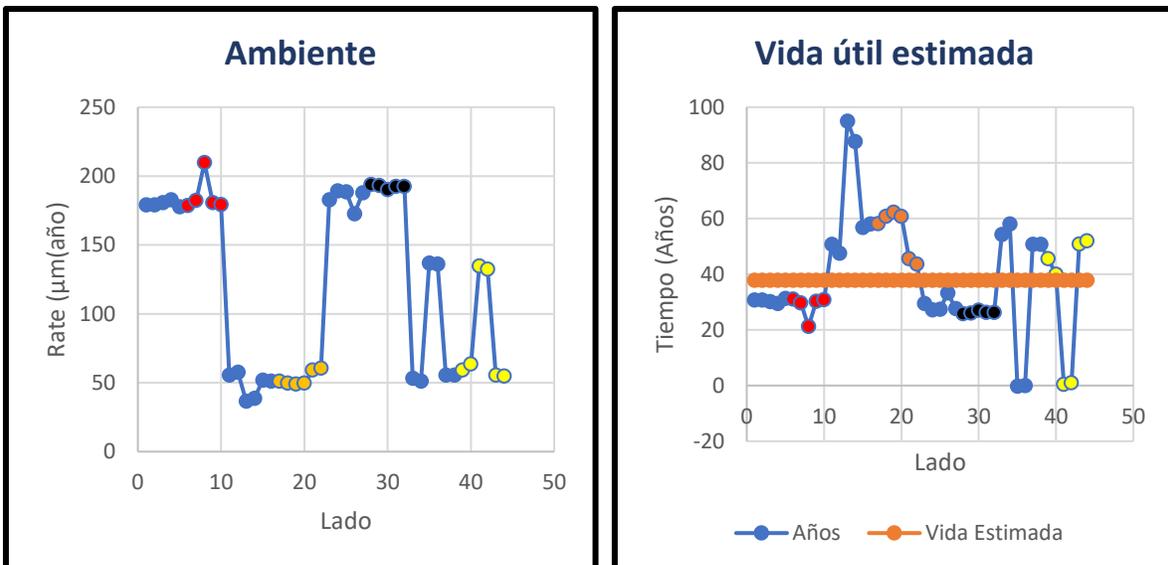


Figura 4.6. a) Resultados de Mástil-sección I, b) Resultados mástil-sección II

a) Mástil- Sección I

b) Mástil- Sección II



Figura 4.7. Muestras tomadas para Mástil

Análisis por cada cara

Para el mástil sección I, los análisis realizados dictaminan que el mástil en su lado norte, el ambiente de corrosión es “C5 Muy Alta” y que la vida útil estimada para la cara norte es de 20.58 años. Para el lado norte cruzadas su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 50.96 años. Para la cara sur el ambiente corrosivo es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 45.03 años. Para el lado sur cruzada su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 18.51 años. Para el mástil sección II, los análisis realizados dictaminan que el mástil en su lado norte, el ambiente de corrosión es “C5 Muy Alta” y que la vida útil estimada para la cara norte es de 30.49 años. Para el lado norte cruzadas su ambiente es “C3 Media” y su vida útil estimada es de 65.97 años. Para la cara sur el ambiente corrosivo es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 29.01 años. Para el lado sur cruzadas su ambiente es “C5 Muy Alta” y su vida útil estimada es de 35.63 años. Para cada uno de los lados superiores en promedio la vida útil estimada es de 35,40 años.

Análisis general del mástil completo

En promedio para todo el mástil, contabilizando todas sus caras, resulta que su ambiente esta categorizado en “C5 Muy Alta” por lo que está en un ambiente altamente corrosivo y su tiempo de vida útil estimado es de 36.5 años (36 años y medio).

4.2.7. Malacate

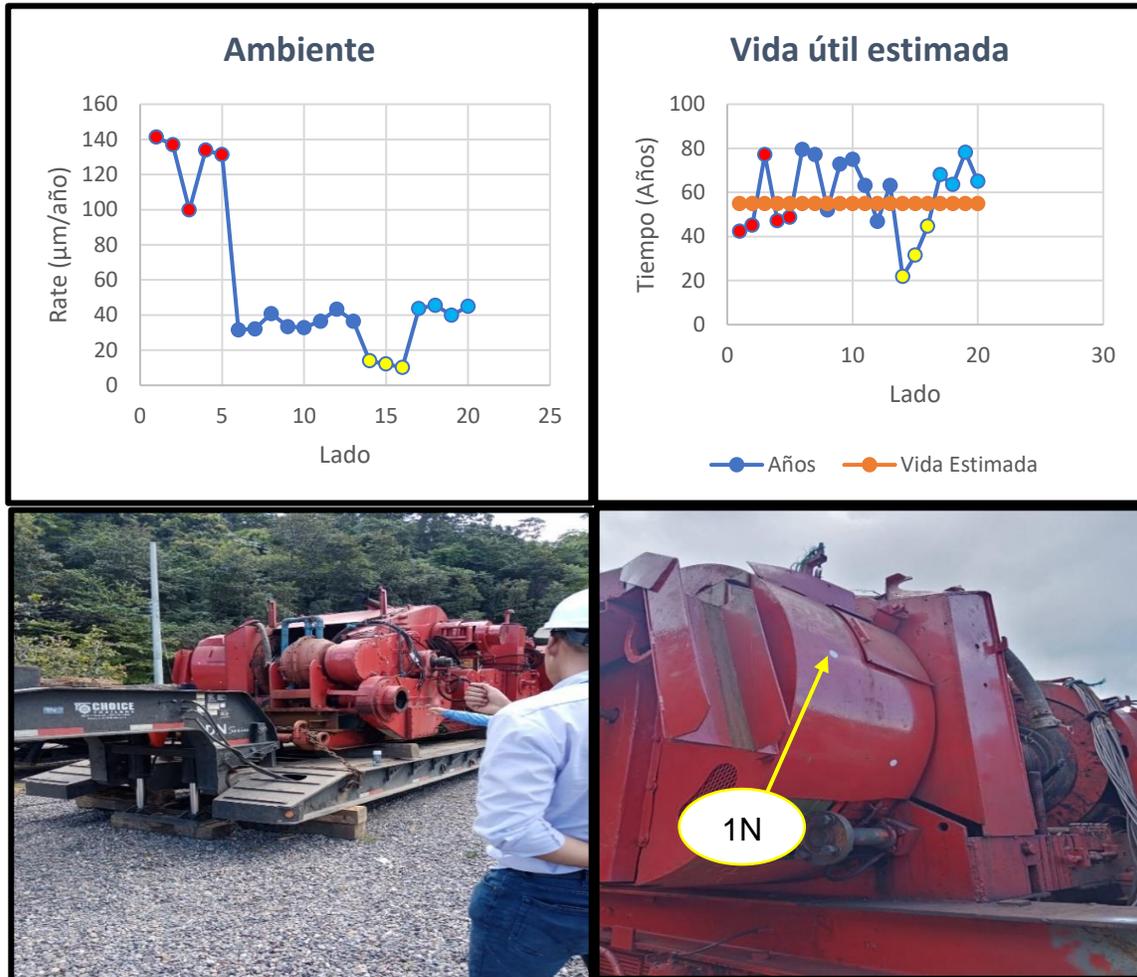


Figura 4.8. Resultados y muestras para malacate

Análisis para cada lado

Los resultados obtenidos para la viga del malacate es un ambiente corrosivo “C5 Muy Alta” y su tiempo de vida útil estimado es de 52.10 años. Para la guarda protectora su ambiente es “C3 Media” y su tiempo de vida útil estimado es de 66.29 años. Para las tapaderas de cadenas su ambiente es “C2 Baja” y su tiempo de vida útil estimado es 32.71 años. Para el convertidor de velocidades su ambiente es “C3 Media” y su tiempo de vida útil es de 68.71 años.

Análisis en general para todo el malacate

En conjunto todo el malacate en promedio tiene un tiempo de vida útil estimado de 54.95 años (casi 55 años) y su ambiente corrosivo está en la categoría “C3 Media”. Por lo cual está en un ambiente corrosivo medio.

CONCLUSIONES

- I. En el estudio predictivo realizado, en un tiempo de 2 a 3 meses, se dieron resultados importantes con relación a los tiempos de vida útil estimada y la clasificación de ambientes de los equipos. Para el mástil el tiempo de vida útil estimada fue de 36 años 6 meses y 54.95 años para el malacate; los ambientes corrosivos de estos equipos están categorizado entre “C5 Muy Alta” y “C3 Media”. La vida útil restante es bastante larga si los comparamos con los tanques de sedimentación, succión de bombas y los 3 tanques de almacenamiento de agua que tienen una vida útil estimada de 11.74 años, 18 años 6 meses, 13.88 años, 8.23 años y 9.65 años respectivamente. Esto se debe a que éstos últimos están más susceptibles a los ataques corrosivos, es decir, más susceptible a la humedad, oxígeno, sales disueltas, etc., los cuales según norma ISO 12944-2 están categorizados como “C5 Muy alta” y “CX Extremo”. Cabe destacar que estos tiempos de vida útil han sido estimados bajo las condiciones de mantenimiento en las cuales actualmente se encuentran, por tanto, para que exista cumplimiento de estos tiempos es necesario continuar con las mismas medidas de control implementadas; incluso se puede notar que al cambiar estas medidas a una mejor la durabilidad del equipo de perforación se puede prolongar más.

- II. Con base en el análisis y los resultados se pudo comprobar que la corrosión en los equipos e instalaciones es un fenómeno natural y espontáneo que no se puede detener, pero sí controlar con mantenimientos periódicos. Por tanto, se pudo verificar que las consecuencias en las que se puede incurrir al no haber un proceso de control de la corrosión en los equipos e instalaciones dentro de la industria como lo es la protección a corto plazo (recubrimientos) y la sustitución parcial de los componentes, son muy severas, ya que al no haber un control estos pueden ocasionar pérdidas de recursos. Por ende, se hace hincapié que la falta de los mantenimientos puede afectar de manera imprevista la operación y generar paros no planificado debido a fugas o rompimientos de material metálico, no descartando así también la posible contaminación del producto que se podría generar debido al desprendimiento de óxidos y

recubrimientos. De igual manera, se puede verificar que la falta de los mantenimientos, puede generar una disminución drástica de la vida útil estimada del equipo debido a la pérdida excesiva de espesor de material y a la agresividad del ambiente al que están sometidos. Al igual, ésta pérdida excesiva de material puede generar pérdida de eficiencia del equipo y por ende menor producción, esto se verá más notorio con el tiempo. Así mismo, se puede ver que la falta de mantenimiento puede generar más gastos en reparación parcial o total del equipo, y por supuesto, es evidente que la falta de mantenimiento puede generar también accidentes laborales que puedan ocasionar pérdidas irremediables. Es por esta misma razón que tener un control de la corrosión dentro de la industria es fundamental ya que se puede minimizar el impacto económico y poder ahorrar millones de dólares. Cabe mencionar que este fenómeno en la Industria global supone un coste estimado de 2.5 billones de dólares, lo que equivale al 3.4% del PIB mundial ¡he aquí la importancia de la corrosión y de los mantenimientos preventivos!

- III. Al realizar las mediciones con la metodología planteada usando el método de ultrasonido industrial y utilizando como instrumento de medida de espesor el “Elcometer 204”, se pudo demostrar y verificar que es un ensayo no destructivo fácil y fiable de utilizar y no genera alteración alguna en las dimensiones del material, ya que no hay pérdida de material al aplicarlo. Por lo que es un método eficiente que se puede aplicar a los equipos e instalaciones para determinar la vida útil estimada y poder clasificar sus ambientes respectivos según norma ISO 12944-2. De igual manera, se pudo verificar que es un método que no genera gastos algunos al aplicarlo respecto a los gastos que se pueden generar en caso de falla en un equipo. Es por esta misma razón que este método y equipo es suficiente para realizar un control sobre la pérdida de material que están sufriendo las instalaciones y equipos de perforación. Es decir, este método y equipo de medición es basto para determinar la gravedad del equipo de perforación y poder determinar cuáles serían las posibles consecuencias y las pérdidas de recursos que se podrían incurrir si hay una falla en el equipo, es decir una pérdida de espesor por abajo del valor de falla del mismo.

IV. Mediante los resultados mostrados y teniendo en cuenta todos los factores mencionados anteriormente, se puede concretar que este estudio adquiere gran importancia para LaGeo ya que tienen un documento escrito sobre los tiempos estimados de duración de sus equipos y la clasificación de esos ambientes en base a la norma ISO 12944-2. Por tanto, este estudio predictivo puede ser una base teórica para la planeación de los mantenimientos preventivos de la corrosión de sus equipos de perforación, lo cual puede ser muy beneficioso ya que esto puede ayudar a que se tomen medidas de prevención o control más rigurosas a las tomadas actualmente (recubrimientos y reemplazos) y generar de cierta manera mayor durabilidad a sus equipos. No obstante, si en lugar de tomar medidas más rigurosas se reducen las medidas de prevención que actualmente se realizan, estos equipos de perforación durarán menos tiempo que el estimado, y producirá pérdidas de materiales y monetarias.

RECOMENDACIONES

- I. De acuerdo con el estudio realizado y los resultados mostrados con tal de poder mitigar o minimizar el daño que la corrosión está generando en los equipos e instalaciones y poder generar una mayor producción se recomienda realizar inspecciones de los equipos más corroídos y realizar limpiezas de residuos/óxidos y la aplicación de nuevos recubrimientos anticorrosivos, ya que al no realizarlo los agentes corrosivos del pozo y del ambiente toman la oportunidad de atacar el material base desgastándolo constantemente. (No esperar a realizar esto cuando la mayor parte del equipo esté corroído). De igual forma, se recomienda hacer reemplazos parciales de material en equipo de perforación cuando se considere según las especificaciones de carga, vibraciones, esfuerzo, etc., que el metal o lámina esté demasiado corroído, con tal de poder evitar fugas, paros, accidentes, etc. Al igual, se recomienda no esperar a la vida útil estimada en este documento para hacer un reemplazo total del equipo, ya que puede que las condiciones cambien con el pasar de los años, aumentando o disminuyendo los resultados mostrados. Por ello, se recomienda hacer inspecciones frecuentes de los equipos con tal de llevar un control de la corrosión, del tipo de corrosión y del ambiente, es decir, llevar un historial de todas las inspecciones y mediciones verificando así si los equipos se encuentran dentro del espesor requerido para poder realizar reemplazos oportunos, de igual manera esto puede servir para buscar mejores alternativas anticorrosivas. Una vez se considere que el equipo ha llegado a su vida útil, se recomienda reemplazar el equipo completo antes de generar algún accidente.

- II. Debe darse seguimiento a las medidas preventivas contra la corrosión que se han venido realizando con el tiempo en los equipos e instalaciones para que al haiga cumplimiento con el tiempo de vida útil estimado en este documento; se recomienda realizar inspecciones frecuentes del avance de la corrosión ya que con el pasar del tiempo el material se irá desgastando y el equipo perderá eficiencia y puede que el ambiente se haga aún más agresivo. Por lo que seguir con los mantenimientos de

control de la corrosión actuales o buscar mejores métodos anticorrosivos ayudaría al cumplimiento de la vida útil en este documento o aumentaría los valores de vida útil.

- III. Para disminuir la velocidad de corrosión de los equipos de perforación H-525 como lo son los tanques de almacenamiento, succión de bombas, sedimentación, malacate, mástil y cualquier otro equipo de perforación se recomienda hacer uso de recubrimientos metálicos más resistentes a la corrosión, ya que de esto va a depender la durabilidad de la película protectora creada por el mismo y tendrá la función de proteger al sustrato o metal base de la humedad, del oxígeno y de las sales disueltas que oscilan en el medio. De igual manera si no es posible hacer una modificación del entorno del equipo se recomienda que al momento de la adquisición de un nuevo equipo tener en cuenta el criterio de la resistencia a la corrosión del material y no solamente el precio, ya que esto puede influir de manera significativa en la velocidad de corrosión. De igual forma, si lo que se pretende es alargar la durabilidad del equipo, se recomienda hacer uso de protección catódica ya sea por corriente impresa o por ánodos de sacrificio lo que evitará enormemente la velocidad de corrosión del equipo.
- IV. Dar lineamientos o capacitaciones a todos los profesionales o técnicos de LaGeo sobre lo importante que es mantener los equipos protegidos contra la corrosión y que la capacitación vaya orientada desde lo económico como hasta el fallo de los equipos y pérdida de eficiencia en los procesos.
- V. Realizar estudios predictivos de la corrosión a más equipos en la planta de LaGeo, ya que no solo los equipos de perforación están inmersos en un ambiente corrosivo, esto puede ayudar a proteger y darle mayor durabilidad a los mismos ya que se contará con un documento escrito sobre la vida útil estimada de los equipos y el ambiente en que el que están inmersos y con esto se pueden planear de manera anticipada medidas preventivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AISC, A. L. (2010). *Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero*. Los Condes, Santiago de Chile, Chile. Proyecto Editorial: Asociación Latinoamericana del Acero. Recuperado de <https://cutt.ly/VOp7J2f>.
- Alvarenga Artiga, K. P. et al. (2004). *Evaluación y análisis de los beneficios de la ecoeficiencia en el proceso de la perforación de pozos geotérmicos* (Trabajo de grado). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. Recuperado de <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1921/>
- API STANDARD 650. (June 2007). *Welded Steel Tanks for Oil Storage. Eleventh Edition*. American Petroleum Institute. Washington D. C., Estados Unidos. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.650.2007.pdf>.
- ASME, C. (2001). *Diseño y cálculo de recipientes a Presión. Sección VIII División 1*. Lindavista, México. Recuperado de <https://cutt.ly/tOp7NQx>.
- ASTM E 797. (2001). *Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method*. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Recuperado de <https://cutt.ly/COp78yZ>.
- Arévalo Martínez, J. (2021). Asesoría Técnica e instrucciones sobre seguridad industrial en el pozo facilitadas por el coordinador de operaciones de campo de LaGeo, en el Campo Geotérmico de Berlín, Usulután. El Salvador.
- Baker Hughes, I. (Agosto de 1998). *Fluidos. Manual de Ingeniería*. Houston, TX 77267-0968, Texas, USA. Technical Communications Group. Recuperado de <https://n9.cl/hnkbt>.
- Castro Fuentes, M. R. et al. (2007). *Ensayos de polimerización y depósito de sílice, pruebas de radiotrazadores y simulación numérica en el campo geotérmico de Berlín, El Salvador, Centroamérica*. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California (Vol. 20). Ohio., Athens. Recuperado de <https://n9.cl/q1nhu>.

- Eduardo Javier, O. D. (2008). *Recipiente rectangular con tirantes bajo presión hidrostática*. (Trabajo de grado). Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica. Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, México. Recuperado de <https://n9.cl/7hvct>.
- Elcometer. (2009). Steel Ultrasonic Thickness Gauge. Elcometer 204 Class A, Group 1 ISM. *Operating Instructions* (TMA-0410 Issue 07), 21. Recuperado de <https://n9.cl/7y5fl>.
- Grupo Nova Àgora. (2019). *Ensayos no Destructivos (END)*, Interempresas Media, S.L.U. Barcelona, España. Recuperado de <https://bit.ly/3o8YMEC>.
- Guerra Pérez, H. (2021). Asesor curso de especialización Introducción al Control de la Corrosión Industrial (ICCI). Universidad de El Salvador, San Salvador. El Salvador.
- Hernandez Cabrera Mayra Raquel Y Campos Ramos Álvaro Josué. (2013). *Evaluación de amenaza geológica por deslizamientos de ladera* (Trabajo de grado). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. Recuperado de <https://bit.ly/3rbVXE5>.
- ISO 12944. (1998). *Pinturas y barnices: protección contra la corrosión de estructuras de acero mediante sistemas de pintura protectora*. Pinturas Jet. Perú. Recuperado de <https://n9.cl/9rur2>.
- ISO 12994-9. (2018). *Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores*. Parte 9: Sistemas de pintura protectores y métodos de ensayo de comportamiento en laboratorio para estructuras de ultramar y estructura. Polinyà, Barcelona, España. Recuperado de <https://cutt.ly/qOp6jfE>.
- ISO 9223. (2012). *Corrosion of metals and alloys, Corrosivity of atmospheres, Classification, determination and estimation. 2nd. Edition*. Technical Committee ISO/TC 156. Case postale 56. CH-1211 Genève 20, Switzerland, Europa. Recuperado de <https://bit.ly/3u5HZ9j>.
- Jerez Virginia et al. (Junio de 2012). *Ensayos No Destructivos*, Universidad Nacional Experimental Rafael Maria Baralt. 10. Ojeda, Republica Bolivariana de Venezuela. Recuperado de <https://cutt.ly/ZOaqENT>.

- Molina Padilla, S. (2021). Asesoría Técnica de los equipos más propensos a corrosión facilitada por el gerente de perforación de LaGeo, en el Campo Geotérmico de Berlín, Usulután. El Salvador.
- Mosquera Ávila, P. F. et al. (2015). *Detección de fallas superficiales e internas en tuberías de alta presión para motores estacionarios por el método de ultrasonido*. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8947/1/UPS-CT005211.pdf>.
- Parra Cacuango, K. M. (Enero 2013). *Análisis técnico para determinar los métodos de control de corrosión en los tanques de almacenamiento de crudo del campo Edén-Yuturi* (Trabajo de grado). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/6066>.
- Proyecto Papime, C. P. (s.f.). *Desarrollo e implementación de prácticas sobre pruebas no destructivas y material didáctico asociado para el Laboratorio de Tecnología de Materiales*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ingeniería, Cuautitlán, México. Recuperado de <https://cutt.ly/rOp6M8c>.
- Rojas, R. V. (2016). *Bienvenidos al curso Ultrasonido Industrial Nivel I División Tecnológica de LLOG, S.A. de C.V. BIKO INSPECCIONES, S.A. DE C.V.* Universidad de Tarapacá, Arica, Chile. Recuperado de <https://bit.ly/3KVXtT2>.
- Ramos, S. (2021). Asesoría Técnica sobre los equipos más corroídos y orientación sobre la corrosión en las industrias facilitada por el coordinador de cementación, aire y fluidos de LaGeo, en el Campo Geotérmico de Berlín, Usulután. El Salvador.
- Tlaxcala Martínez, L. L. (2018). *Procedimiento escrito de medición de espesores para tuberías forzadas a presión*. Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Cuitláhuac, México. Recuperado de <https://n9.cl/edluq>.
- UNE-EN ISO 12944-2. (2017). Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 2: Classification of environments. ASEFAPI. Madrid. España. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/iso-12944-2-2017-pdf-free.html>.

ANEXOS

Anexo 2.1. Toxicidad del sulfuro de hidrógeno para el ser humano

H ₂ S ppm	0 - 2 minutos	2 - 15 minutos	15 - 30 minutos	30 minutos- 1 hora	1 - 4 horas	4 - 8 horas
5 100				Conjuntivitis suave; irritación del tracto respiratorio		
100 150		Tos; irritación de ojos; pérdida del olfato	Problemas para respirar; dolor de ojos; somnolencia	Irritación de garganta	Salivación y descarga mucosa; dolor agudo en ojos; tos	Síntomas acentuados.
150 200		Pérdida del olfato	Irritación de garganta y ojos	Irritación de garganta y ojos	Dificultad para respirar; visión borrosa; sensibilidad a la luz	Efectos de irritación grave
250 350		Irritación de ojos, pérdida del olfato	Irritación de ojos	Lagrimeo doloroso; cansancio	Sensibilidad a la luz; catarro nasal; dolor de ojos; dificultad para respirar	Hemorragia y muerte
350 450		Irritación de ojos; pérdida del olfato	Dificultad respiratoria, tos, irritación de ojos	Mayor irritación de ojos y tracto nasal, dolor ligero de cabeza, cansancio, sensibilidad a la luz	Mareo, debilidad, mayor irritación, muerte.	Muerte
500 600	Tos, colapso, pérdida del conocimiento	Molestias respiratorias, irritación de ojos, colapso	Irritación grave de ojos, palpitaciones, algunos casos de muerte	Dolor fuerte en ojos y cabeza, mareo, temblor en las extremidades, mucha debilidad y muerte.		
600 700 800 1500	Colapso, pérdida del conocimiento, muerte					

(Fuente: Baker Hughes, Agosto de 1998)

Anexo 3.1. Dimensiones y memoria de cálculo

DIMENSIONES DE TANQUES H-525 EN POZO TR-1 LAGEO Y ESPESORES MÍNIMOS

Escenarios de los tanques:

Proceso:

- I. Tanto para la perforación como para la limpieza de los pozos en los tanques se ocupa agua de condensado.

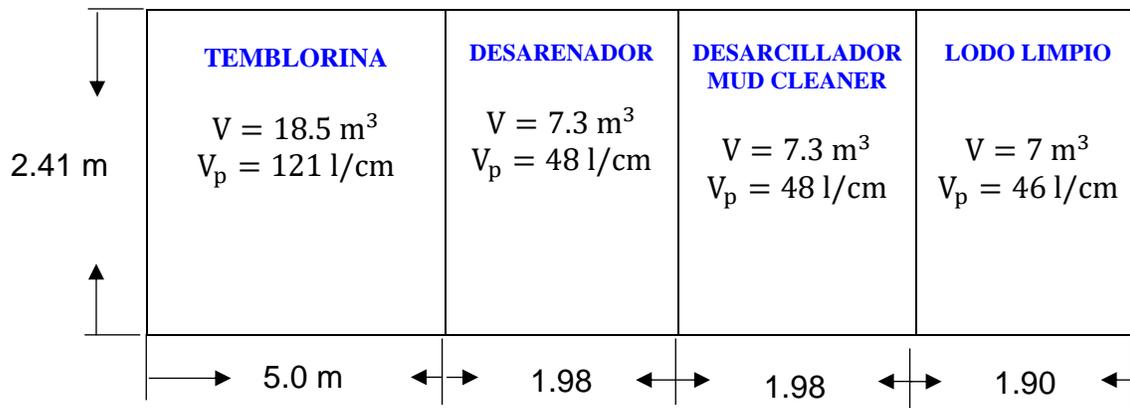
Movilidad:

- II. Los tanques se trasladan de un lugar a otro en tráiler, siendo sujetos a vibraciones y otros factores.

TANQUE DE SEDIMENTACIÓN

ALTURA = 1.53 m

Contenido: agua de condensado



Cálculo de espesor placa para compartimiento 1

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Esfuerzo de placa = $36000 \frac{\text{Lbf}}{\text{Ln}^2}$ (Anexo 4.2)

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Donde:

t = espesor minimo por diseño

L = largo del tanque

H = altura del tanque

G = gravedad especifica del agua

S = esfuerzo de placa según norma API 650 para A36

α = factor dependiente de relacion de longitud a la altura del tanque $\left(\frac{H}{L}\right)$

Datos:

L = 196.85 plg

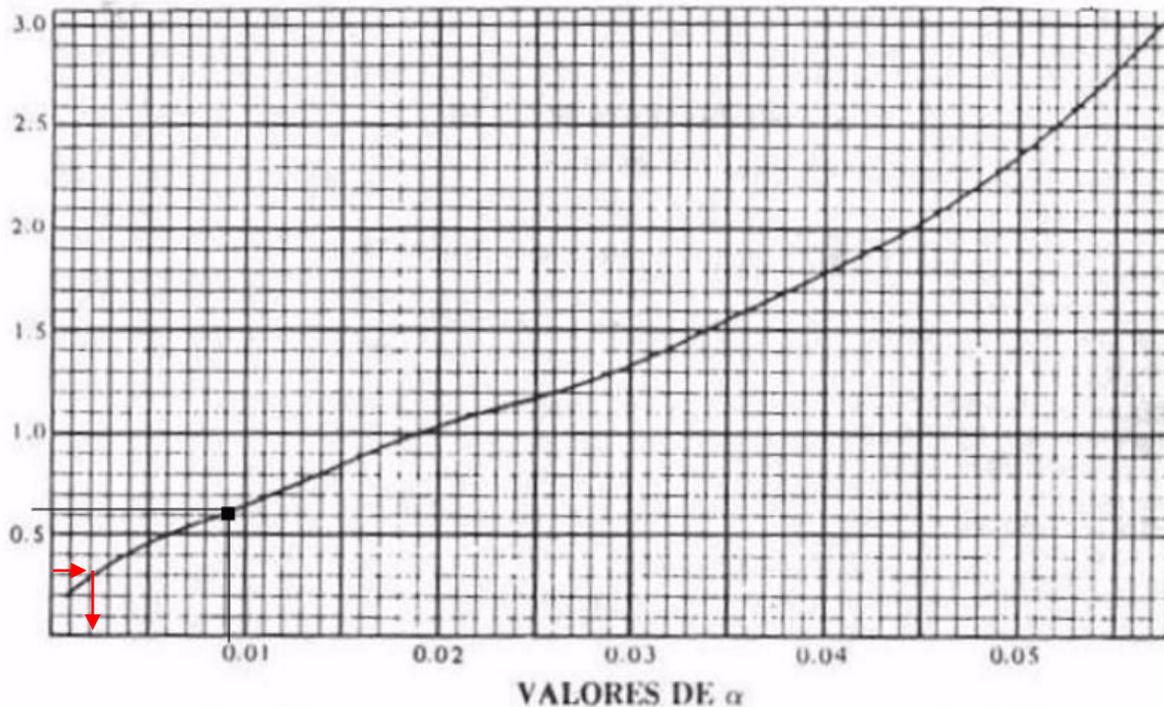
H = 60.2362 plg

G = 1

S = 36,000 $\frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$

$\frac{H}{L} = \frac{60.2362}{196.85} = 0.306$

De la gráfica podemos calcular el factor dependiente de H/L



(Eduardo Javier, 2008)

De grafica

$$\alpha = 0.0021$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 196.85 \sqrt{\frac{0.0021 * 60.2362 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1715 \text{ plg}$$

Cálculo de espesor placa para compartimiento 2

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Datos:

$$L = 77.9527 \text{ plg}$$

$$H = 60.2362 \text{ plg}$$

$$G = 1$$

$$S = 36,000 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{60.2362}{77.9527} = 0.7727$$

De grafica

$$\alpha = 0.013$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 77.9527 \sqrt{\frac{0.013 * 60.2362 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1690 \text{ plg}$$

Cálculo de espesor placa para compartimiento 3

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Datos:

$$L = 77.9527 \text{ plg}$$

$$H = 60.2362 \text{ plg}$$

$$G = 1$$

$$S = 36,000 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{60.2362}{77.9527} = 0.7727$$

De grafica

$$\alpha = 0.013$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 77.9527 \sqrt{\frac{0.013 * 60.2362 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1690 \text{ plg}$$

Cálculo de espesor placa para compartimiento 4

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Datos:

$$L = 74.8031 \text{ plg}$$

$$H = 60.2362 \text{ plg}$$

$$G = 1$$

$$S = 36,000 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{60.2362}{74.8031} = 0.80526$$

De grafica

$$\alpha = 0.0143$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

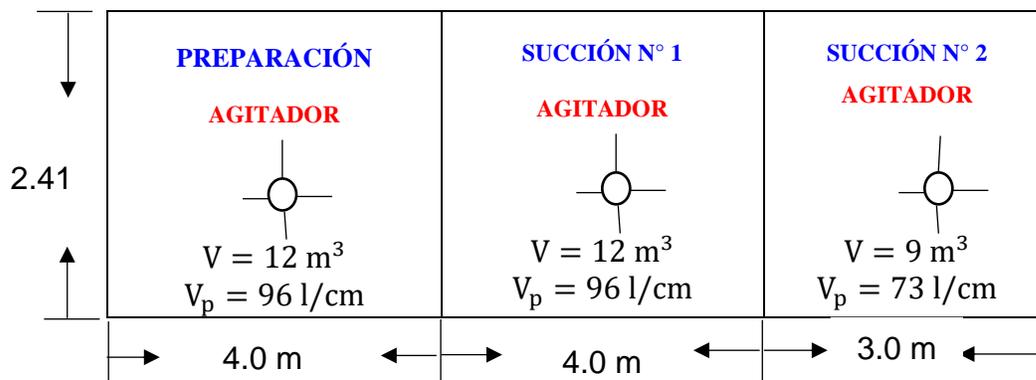
$$t = 2.45 * 74.8031 \sqrt{\frac{0.0143 * 60.2362 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1701 \text{ plg}$$

TANQUE DE SUCCIÓN DE BOMBA

ALTURA = 1.22 m

Contenido: Agua de condensado



Cálculo de espesor placa para compartimiento 1

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Donde:

t = espesor minimo por diseño

L = largo del tanque

H = altura del tanque

G = gravedad especifica del agua

S = esfuerzo de placa segun norma api 650

α = factor dependiente de relacion de longitud a la altura del tanque

Datos:

$$L = 157.48 \text{ plg}$$

$$H = 48.0315 \text{ plg}$$

$$G = 1$$

$$S = 36,000 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{48.0315}{157.48} = 0.305$$

De grafica

$$\alpha = 0.0021$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 157.48 \sqrt{\frac{0.0021 * 48.0315 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1225 \text{ plg}$$

Cálculo de espesor placa para compartimiento 2

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Datos:

$$L = 157.48 \text{ plg}$$

$$H = 48.0315 \text{ plg}$$

$$G = 1$$

$$S = 36,000 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{48.0315}{157.48} = 0.305$$

De grafica

$$\alpha = 0.0021$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 157.48 \sqrt{\frac{0.0021 * 48.0315 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1225 \text{ plg}$$

Cálculo de espesor placa para compartimiento 3

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Datos:

$$L = 118.11 \text{ plg}$$

$$H = 48.0315 \text{ plg}$$

$$G = 1$$

$$S = 36,000 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{48.0315}{118.11} = 0.4066$$

De grafica

$$\alpha = 0.004$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

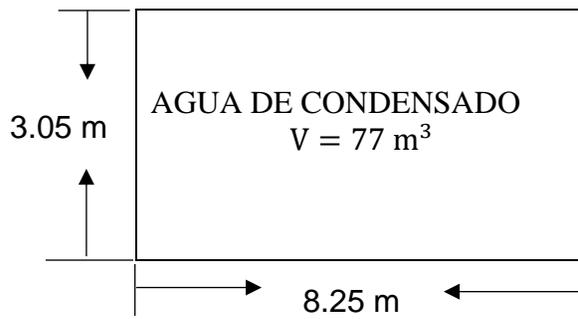
$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 118.11 \sqrt{\frac{0.004 * 48.0315 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1268 \text{ plg}$$

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA N°1

ALTURA = 3.06 m



Cálculo de espesor placa

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Donde:

t = espesor mínimo por diseño

L = largo del tanque

H = altura del tanque

G = gravedad específica del agua

S = esfuerzo de placa según norma API 650

α = factor dependiente de relación de longitud a la altura del tanque

Datos:

L = 324.8031 plg

H = 120.4724 plg

G = 1

S = 36,000 $\frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{120.4724}{324.8031} = 0.3709$$

De grafica

$$\alpha = 0.0031$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

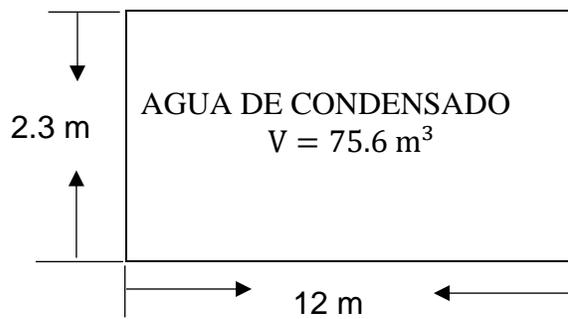
$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 324.8031 \sqrt{\frac{0.0031 * 120.4724 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1537 \text{ plg}$$

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA N°2

ALTURA = 2.74 m



Cálculo de espesor placa

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Datos:

$$L = 472.441 \text{ plg}$$

$$H = 107.874 \text{ plg}$$

$$G = 1$$

$$S = 36,000 \frac{\text{lb}_f}{\text{plg}^2}$$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{107.874}{472.441} = 0.2283$$

De grafica

$$\alpha = 0.0011$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

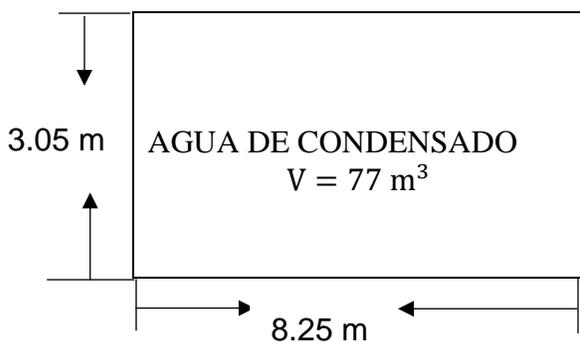
$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 472.441 \sqrt{\frac{0.0011 * 107.874 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1260 \text{ plg}$$

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA N°3

ALTURA = 3.06 m



Cálculo de espesor placa

Material empleado en lámina: ASTM/ASME A36

Formula general:

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

Datos:

$$L = 324.8031 \text{ plg}$$

$$H = 120.4724 \text{ plg}$$

$$G = 1$$

$$S = 36,000 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2}$$

$$\alpha = \frac{H}{L} = \frac{120.4724}{324.8031} = 0.3709$$

De grafica

$$\alpha = 0.0031$$

Resolviendo para espesor mínimo de diseño

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha H 0.036G}{S}}$$

$$t = 2.45 * 324.8031 \sqrt{\frac{0.0031 * 120.4724 * 0.036 * 1}{36,000}}$$

$$t = 0.1537 \text{ plg}$$

Anexo 3.2. Especificaciones del mástil y malacate según fabricante

Mástil	
Tipo de mástil	Viga voladiza (Cantilever)
Nombre de fabricante	LEE C. MOORE
Dirección de fabricante	Tulsa Oklahoma
Número de serie de mástil	
Altura total libre del mástil en pies.	131 pies
Año de fabricación	1985
Subestructura	
Nombre del fabricante	LEE C. MOORE
Número de serie de subestructura	
Altura del piso	12 pies
Ancho del piso	23 pies
longitud del piso	15 pies
GL a vigas giratorias inferiores	11 pies
Año de fabricación	1985
Capacidad máxima de retroceso de tubería	300,000 lbs
Capacidad simultánea total	750,000,00 lbs
Capacidad máxima de soporte de la mesa giratoria	450,000 lbs

Anexo 4.1. Espesores mínimos de mástil y malacate

Espesores de fábrica y espesores mínimos aceptables de diseño para Mástil y Balata del malacate basado en norma API 650 y norma AISC/ANSI 310-16 para el acero ASTM A36 de acuerdo a sus especificaciones.

Mástil			
Secciones	Orientación	Espesores de fábrica (in)	Espesores mínimos de diseño (in)
I	Oriente	5/8	0.25
	Oriente (Cruzadas)	7/16	0.1875
	Poniente	5/8	0.25
	Poniente (Cruzadas)	7/16	0.1875
II	Oriente y superior	3/4	0.286
	Oriente (Cruzadas) y superior	7/16	0.25
	Poniente y superior	3/4	0.286
	Poniente (Cruzadas) y superior	7/16	0.25
Balata del malacate			
	Viga	3/4	0.286
	Guarda protectora	1/4	0.1
	Tapaderas de cadenas	Calibre N°10	0.1
	Compound	7/16	0.25

Anexo 4.2. Esfuerzos permitidos para los materiales en acuerdo con API 650, para tanques de almacenamiento atmosféricos.

Especificación de placa	Grado	Espesor de placa nominal “t”, pulg	Esfuerzo de Cedencia, lbf/pulg²	Esfuerzo a tensión mínimo, lbf/pulg²	Esfuerzo de diseño por producto, “Sd”, lbf/pulg²	Esfuerzo por prueba hidrostática, “St”, lbf/pulg²
Especificaciones ASTM						
A-283	C		30,000	55,000	20,000	22,500
A-285	C		30,000	55,000	20,000	22,500
A-131	A, B		34,000	58,000	22,700	24,900
A-36			36,000	58,000	23,200	25,900
A-131	EH-36		51,000	71,000	28,400	30,400
A-573	58		32,000	58,000	21,300	24,000
A-573	65		35,000	65,000	23,300	26,300
A-573	70		42,000	70,000	28,000	30,000
A-516	55		30,000	55,000	20,000	22,500
A-516	60		32,000	60,000	21,300	24,000
A-516	65		35,000	65,000	23,300	26,300
A-516	70		38,000	70,000	25,300	28,300
A-662	B		40,000	65,000	26,000	27,900
A-662	C		43,000	70,000	28,000	30,000
A-537 (1)	1		50,000	70,000	28,000	30,000
A-537 (2)	2		60,000	80,000	32,000	34,300
A-633(C,D)	C, D		50,000	70,000	28,000	30,000
A-678 (A)	A		50,000	70,000	28,000	30,000
A-678 (B)	B		60,000	80,000	32,000	34,300
A-737 (B)	B		50,000	70,000	28,000	30,000
A-841	Clase 1		50,000	70,000	28,000	30,000
A-841	Clase 2		60,000	80,000	32,000	34,300
Especificaciones CSA						
G40.21	38 W		38,000	60,000	24,000	25,700
G40.21	38 WT		38,000	60,000	24,000	25,700
G40.21	44 W		44,000	64,000	25,600	27,400
G40.21	44 WT		44,000	64,000	25,600	27,400
G40.21	50 W		50,000	65,000	26,000	27,900
G40.21	50 WT	t ≤ 2-1/2	50,000	65,000(nota a)	26,000	27,900
		2-1/2 < t ≤ 4	46,000	65,000 (nota a)	26,000	27,900

Anexo 4.3. Memoria de cálculo para clasificación de ambiente y estimación de vida útil del equipo.

Tanque de sedimentación

Cara superior:

A continuación, se muestra la aplicación de la metodología antes descrita en el Capítulo III.

Nota: Cada celda de izquierda a derecha representa las siguientes variables respectivamente.

Orientación, Espesor de fábrica (in), Espesor real (in), Pérdida de espesor en años expuestos (in), Pérdida de espesor en años expuestos (μm), Pérdida de espesor al año (μm), Categoría corrosión (ISO 12944-2), Pérdida de espesor al año (in), Valor de falla (in), Vida útil estimada (Años).

Muestra de llenado de una fila.

Cara superior	3/8	0.273	0.102	2,590.80	199.29	C5 Muy Alta	0.00785	0.1699	13.14
---------------	-----	-------	-------	----------	--------	-------------	---------	--------	-------

Años de exposición: 13 años (desde el 2008)

Pasos:

Al hacer uso de la ecuación 3.1 encontramos la pérdida de espesor tras todos los años que el material a estado expuesto al ambiente. Esto se indica a continuación:

$$\text{Pérdida de espesor en años exp.} = \text{Espesor de fábrica} - \text{Espesor real}$$

$$\text{Pérdida de espesor en años exp.} = 0.375 \text{ in} - 0.273 \text{ in} = 0.102 \text{ in}$$

Luego que tenemos la pérdida de espesor en pulgadas de los años expuestos, se procede a pasar ese espesor que está en base a los años expuestos de pulgadas (in) a micrones (μm). Esto se hace con el objetivo de tener las unidades consistentes para elegir la categoría del ambiente en base a la norma ISO 12944-2.

$$\text{Pérdida de espesor en años exp.} = 0.102 \text{ in} \times \frac{25,400 \mu\text{m}}{1 \text{ in}} = 2590.80 \mu\text{m}$$

Este espesor representa la pérdida de espesor en micrones de todos los años que el material ha estado expuesto. Es decir, solo se ha hecho una conversión de unidades.

Posterior a ello, se hace uso de la ecuación 3.2 para calcular la pérdida de espesor tras un año de exposición. Para lo cual se necesitó la pérdida de espesor en micrones de los años expuestos.

$$\text{Pérdida de espesor al año exp.} = \frac{\text{Pérdida de espesor en años exp.}}{\text{años exp.}}$$

$$\text{Pérdida de espesor al año exp.} = \frac{2590.80 \mu\text{m en 13 años}}{13 \text{ años}} = 199.29 \mu\text{m}$$

Nota: Este espesor de 199.29 μm es lo que se ha perdido de material en un año y este valor es el que se busca en la norma ISO.

Según Norma ISO 12944-2, como ya se conoce el valor de pérdida de espesor al año de exposición, se hace uso de la Tabla 2.2.

Categoría	Pérdida de Masa por unidad de superficie/pérdida de espesor (tras el primer año de exposición)			
	Acero bajo en carbono		Zinc	
	Pérdida de masa g/m^2	Pérdida de espesor, μm	Pérdida de masa g/m^2	Pérdida de espesor, μm
C5 Muy alta	>650 a 1500	>80 a 200	>30 a 60	>4.2 a 8.4

Nota: Para ver todos los demás datos véase Tabla 2.2

Por tanto, la categoría de la corrosividad para la cara superior del tanque de sedimentación es **C5 Muy alta** (“Según el punto N°1”).

Luego se procede a calcular la vida útil estimada de acuerdo a la ecuación 3.3:

$$t_{v.u} = \frac{E_r - E_f}{V_c}$$

Donde:

E_r = Espesor real

E_f = Espesor de falla

V_c = Velocidad de corrosión tras un año de exposición

$t_{v.u}$ = Tiempo de vida útil estimada según el ambiente

Debido a que el espesor real y el valor de fallo están en pulgadas, se pasará la pérdida de espesor de un año (dada en micrones) a pulgadas (in). Esto se hace de la siguiente manera:

$$\text{Pérdida de espesor al año} = 199.29 \mu\text{m} \times \frac{1 \text{ in}}{25400 \mu\text{m}} \cong 0.00785 \text{ in}$$

Nota: Esta es la pérdida de espesor en pulgadas (in) al año, que vendría siendo la velocidad de corrosión en ipy (pulgadas al año), es decir, $V_c = 0.00785 \text{ in/año}$.

Según los cálculos realizados anteriormente para el tanque de sedimentación el espesor de falla es de 0.1699 pulgadas (in) (véase Anexo 3.1).

Luego de conocer todas las variables se procede a aplicar la ecuación 3.3 y estimar la vida útil:

$$t_{v.u} = \frac{E_r - E_f}{V_c} = \frac{0.273 \text{ in} - 0.1699 \text{ in}}{0.0078461 \dots \frac{\text{in}}{\text{año}}} = 13.14 \text{ años}$$

Por tanto, el tiempo estimado de vida útil para el punto N°1 del tanque de sedimentación es de 13.14 años.

Anexo 4.4. Equipos analizados

Tanque de sedimentación



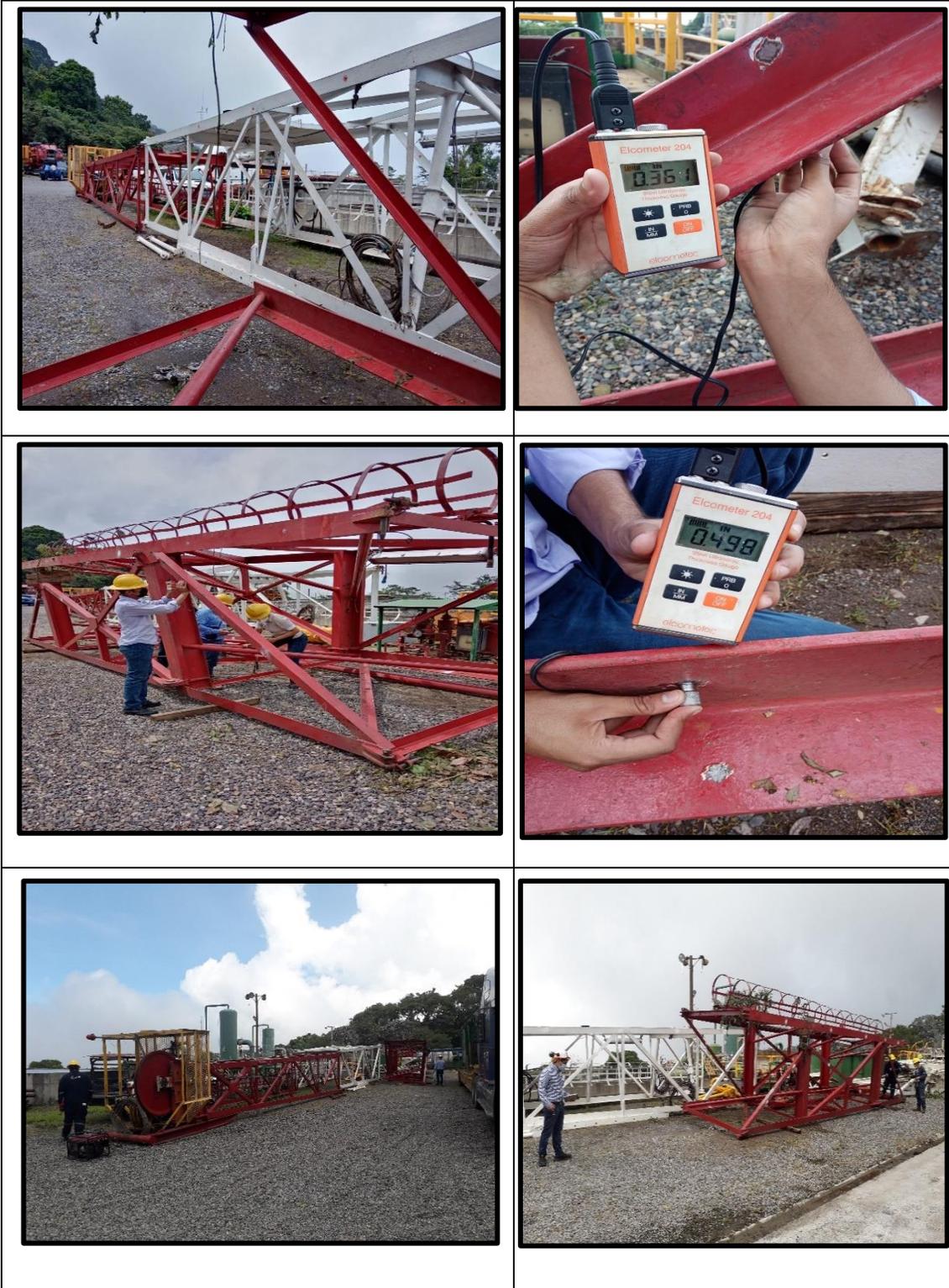
Tanque de succión de bombas



Tanques de almacenamiento de agua N°1, N°2 y N°3.



Mástil



Malacate

