

SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA RETRASAR LA CORROSION EN
TUBERIAS EN AMBIENTES AGRESIVOS

SONIA ESPERANZA AMAYA OROZCO
ASTRID CAROLINA GARNICA PIRANQUE

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTA D.C
2020

SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA RETRASAR LA CORROSION EN
TUBERIAS EN AMBIENTES AGRESIVOS

SONIA ESPERANZA AMAYA OROZCO
ASTRID CAROLINA GARNICA PIRANQUE

Proyecto integral de grado para obtener el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
WILSON ANIBAL VERGARA URREGO
Ingeniero Civil

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTA D.C
2020

Nota de aceptación:

Jurado 1.
Ing. Luis Alberto Figueroa Casallas.

Jurado 2.
Ing. Cesar Augusto Sánchez Correa.

Bogotá D.C, septiembre de 2020.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD.

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA.

Consejero institucional.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA PEÑA.

Vicerrectora académica y de investigación.

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ.

Vicerrector Administrativo y financiero.

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARALDA CASTRO.

Secretaria general.

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMAN.

Decano de la Facultad de Ingenierías.

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI.

Director Programa de Ingeniería Química.

Ing. IVAN RAMIREZ MARIN.

Las directivas de la Fundación Universidad de América, jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por las ideas estipuladas a lo largo del presente trabajo, pues estas corresponden totalmente a las autoras.

¡En principio le agradezco a Dios, a mis padres Néstor y Clemencia, a mis abuelas Transito y Luisa por su apoyo incondicional día tras día por hacer realidad este sueño, por su amor y comprensión en las adversidades, gracias, sin duda alguna este logro tan grande es de ustedes! Han sido mi motor y guía por este camino, son todo en mi vida, ¡Gracias!

Igualmente le agradezco a Sebastián Gómez, por su mano amiga, sus consejos y palabras de aliento; y sobre todo gracias por estar siempre, por ser mi compañía y darme todo su apoyo con el fin de cumplir este gran logro.

De igual forma agradezco a mis hermanos, Camilo e Isabella, gracias por todo su amor, por compartir este gran triunfo juntos, unidos y felices, son los amores de mi vida. De igual forma, agradezco a toda mi familia, tíos, tías y primos, agradezco y valoro su amor y cariño, este triunfo más que mío, ¡también es de ustedes!

Finalmente agradezco a la Universidad de América, por su formación como la profesional que ahora soy, gracias por su educación y formación, gracias porque gracias a ustedes logre cumplir este gran sueño y cumplir una más de mis metas.

¡Gracias a todos, gracias Dios!

ASTRID CAROLINA GARNICA PIRANEQUE.

En primera instancia agradezco a mi madre Nancy Orozco, por su incondicionalidad y apoyo a lo largo de mi carrera. Al igual que a mis hermanos Julián y Laura por su impecable ejemplo. Agradezco además a mi compañera de trabajo de grado por su infinita ayuda, paciencia y su disciplina que lograron sacar adelante este documento. Además, a las personas con las que compartí mi carrera y aportaron en mi crecimiento como profesional y persona, Carlos Arciniegas, Gabriela Gómez y Diego Rodríguez.

Por último, agradezco a los profesores y a la Universidad de América por contribuir a mis conocimientos que permitieron prosperar en la carrera.

¡Gracias totales!

Sonia Esperanza Amaya Orozco.

AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos a la Fundación Universidad de América, por permitir formarnos como profesionales en sus instalaciones por medio de las bases y orientaciones a lo largo de la carrera. A todos los maestros que aportaron conocimientos y guiaron nuestro proceso de aprendizaje, muchas gracias.

De la misma manera, agradecemos a la empresa soluciones en diseño de ingeniería S.A.S, entidad quien permitió desarrollar este tema de proyecto de grado, en especial al ingeniero Wilson Aníbal Vergara, quien nos acompañó durante este camino y estuvo para brindar sus conocimientos y experiencia. Finalmente, agradecemos a la empresa Sika S.A.S, quienes brindaron información necesaria para la culminación de este trabajo, en especial al Ingeniero José Gonzales, por su carisma y compartir sus conocimientos, y a la ingeniera Andrea, por su apoyo y ayuda para datos requeridos según su experiencia. Infinitas gracias.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS	23
1. GENERALIDADES DE LA CORROSIÓN	24
1.1 CORROSION.	24
1.1.1 Tipos de corrosión.	25
1.1.1.1 Otros tipos de corrosión.	25
1.1.2 Factores que influyen en la corrosión	27
1.1.2.1 Acidez de la solución	27
1.1.2.2 Sales disueltas.	27
1.1.2.3 Capas protectoras.	27
1.1.2.4 Temperatura.	27
1.1.2.5. Velocidad de flujo.	27
1.1.3 Corrosión en tubería.	27
1.1.3.1 Causas de corrosión en tuberías.	29
1.2 ALTERNATIVAS PARA EL CONTROL Y PREVENCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN	31
1.2.1 Protección catódica.	31
1.2.1.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio.	32
1.2.1.2. Factores que intervienen en la protección catódica.	32
1.2.1.3 Factores de diseño.	33
1.2.2 Protección anódica.	33
1.2.3 Recubrimientos y revestimientos contra el efecto corrosivo.	33
1.2.3.1 Pinturas.	34
1.2.3.2. Tipos de pinturas.	35
1.2.3.3 Recubrimiento con mortero.	36
1.2.3.4 Tipos de morteros.	36
1.2.3.5 Uso de los morteros.	38

2.	CARACTERIZACION DE MATERIAS PRIMAS	39
2.1	ÁNODOS DE SACRIFICIO	39
2.1.1	Ánodo de magnesio.	39
2.1.2	Ánodo de Zinc.	40
2.1.3	Ánodo de aluminio.	40
2.2	RECUBRIMIENTOS	40
2.2.1	Pinturas.	40
2.2.1.1	Pinturas epoxi.	41
2.2.1.2	Pigmentos derivados de fosfatos.	42
2.2.2	Recubrimiento con mortero.	43
2.2.2.1	Agua.	44
2.2.2.2	Arena.	46
2.2.2.3	Cemento.	47
2.2.2.4	Cal.	48
2.2.2.5	Yeso.	49
2.3	PRUEBAS Y ENSAYOS	49
2.3.1	Especificaciones de los ánodos y el medio.	49
2.3.1.1.	Limitaciones protección catódica con ánodos de sacrificio.	50
2.3.2	Limpieza de superficie para recubrimiento.	50
2.3.3	Ensayo del aspa.	51
2.3.3.1	Limitaciones en prueba del aspa.	52
2.3.4	Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).	52
2.3.4.1	Limitaciones en la prueba EIS.	53
2.3.5	Pruebas y análisis para las pinturas.	53
2.3.6	Pruebas y análisis para mortero.	55
2.3.6.1	Granulometría de la arena.	55
2.3.6.2	Propiedades Cemento Portland.	55
2.4	DIAGNOSTICO DE LA CARACTERIZACION.	56
3.	ANÁLISIS PARA LA COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS	57
3.1	DISEÑO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO	57
3.1.1	Vida útil.	60
3.1.2	Sistema de protección catódica.	61

3.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN PROTECCIÓN CON PINTURAS EPÓXI	62
3.3 MECANISMO DE ACCIÓN DE LOS PIGMENTOS ANTICORROSIVOS	63
3.3.1 Comportamiento de pigmentos a base de fosfato en pinturas.	65
3.4 COMPORTAMIENTO Y EVALUACIÓN DE MORTEROS CON ADITIVOS	67
3.4.1 Ambiente de carbonatación.	71
3.4.2 Ambiente con cloruros.	71
3.4.3 Ambiente mixto.	72
3.5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	74
4. ANÁLISIS FINANCIERO	77
4.1 PROCESO DE ANÁLISIS DE COSTOS.	77
4.1.1 Diagrama de flujo del análisis de costos.	77
4.2 NÚMERO DE ÁNODOS EN PROTECCIÓN CATÓDICA	77
4.2.1 Resultados y análisis.	79
4.3 USO DE PINTURAS EPOXI Y PINTURAS CON PIGMENTOS COMO RECUBRIMIENTO.	80
4.3.1 Incidencia del espesor.	80
4.3.2 Cálculos de espesor de película húmeda, rendimiento teórico y práctico para pintura epoxi.	81
4.3.3 Cálculos de espesor de película húmeda, rendimiento teórico y práctico para pintura que contiene pigmentos anticorrosivos.	85
4.4 RECUBRIMIENTO CON MORTERO COMO ALTERNATIVA DE PROTECCIÓN.	87
5. CONCLUSIONES	90
6. RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS	98

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tipos de corrosión.	25
Cuadro 2. Composición pinturas epóxi.	42
Cuadro 3. Pigmentos anticorrosivos.	43
Cuadro 4. Efectos negativos en la mezcla de mortero por efecto de los valores permisibles.	46
Cuadro 5. Pruebas y ensayos de protección catódica.	50
Cuadro 6. Pruebas control de calidad de la pintura.	54
Cuadro 7. Ventajas y desventajas de las alternativas de protección y su vida útil.	75

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Serie galvánica de metales y aleaciones en suelos y agua neutra.	30
Tabla 2. Recomendación de ánodos de sacrificio según la resistividad del medio.	40
Tabla 3. Requisitos permitidos para el agua de mezcla.	45
Tabla 4. Uso de los morteros de cemento y dosificación cemento/arena.	47
Tabla 5. Número asignado según grado de corrosión por método del aspa.	51
Tabla 6. Características generales Cemento Portland.	55
Tabla 7. Densidad de corriente para las tuberías.	58
Tabla 8. Resistividad en función de la temperatura y clorinidad.	60
Tabla 9. Valores para el cálculo vida de los ánodos.	61
Tabla 10. Grado de corrosión del acero en pinturas expuestas en cámara de niebla salina.	66
Tabla 11. Composición de mezcla.	67
Tabla 12. Espesor de película seca para ambientes marítimos de pinturas epoxi.	80
Tabla 13. Rendimientos y volumen de pinturas epóxi.	84
Tabla 14. Costo total para recubrimiento de pintura epoxi según volumen requerido.	84
Tabla 15. Espesor de película para ambientes marítimos de pinturas con pigmentos anticorrosivos.	85
Tabla 16. Rendimientos y volumen de pintura que contiene pigmentos anticorrosivos.	86
Tabla 17. Costo total para recubrimiento de pintura epoxi según volumen requerido.	86
Tabla 18. Dosificación de mortero para tubería.	87
Tabla 19. Precio mezcla de mortero muestra patrón.	88
Tabla 20. Precio total mezcla de mortero con aditivos.	89
Tabla 21. Precio total por alternativa.	89

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Número de ánodos.	57
Ecuación 2. Intensidad de corriente.	58
Ecuación 3. Intensidad de corriente del ánodo.	59
Ecuación 4. Resistencia del ánodo para geometrías desconocidas.	59
Ecuación 5. Vida útil del ánodo.	60
Ecuación 6. Área de un cilindro sin bases.	78
Ecuación 7. Cálculo espesor de película húmeda.	81
Ecuación 8. Rendimiento teórico (RT) de pinturas.	82
Ecuación 9. Rendimiento práctico de las pinturas.	83
Ecuación 10. Calculo de volumen de pintura [gal].	84
Ecuación 11. Calculo volumen del cemento.	88

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Corrosión identificable por inspección visual.	26
Imagen 2. Corrosión identificable por medio de herramientas de inspección especiales.	26
Imagen 3. Vista microscópica de superficie metálica.	28
Imagen 4. Efecto corrosivo en tuberías.	29
Imagen 5. Protección catódica por ánodo de sacrificio.	32
Imagen 6. Efecto corrosivo en tuberías a lo largo del tiempo	34
Imagen 7. Componentes de las pinturas.	41
Imagen 8. Circuito equivalente para metales con recubrimiento.	52
Imagen 9. Esquema de funcionamiento de Prueba EIS.	53
Imagen 10. Resultados del ensayo aspa en probetas de acero cubiertas con pintura epoxi.	62
Imagen 11. Resultados con microscopio óptico Olympus BX-51 para probetas de acero recubiertas con pintura epoxi.	63
Imagen 12. Propiedades de la pintura en función del PVC.	64
Imagen 13. Modelo de circuito para análisis de resultados de prueba EIS.	66
Imagen 14. Prueba OCP. a. Ambiente de referencia. B. Carbonatación. C. Cloruros. D. Ambientes mixtos.	69
Imagen 15. Comparación de ambientes según tasa de corrosión (Icorr). a. OPC. b. MK. C. SF.	72
Imagen 16. Diagrama de flujo del análisis de costos.	77
Imagen 17. Galga para medición de EPH.	82
Imagen 18. Hoja técnica imprimante rico en cinc.	99
Imagen 19. Hoja técnica coaltar epóxico.	101
Imagen 20. Hoja técnica imprimante epoxi fosfato de cinc.	103
Imagen 21. Tabla dosificación revestimiento exterior.	105

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Información imprimante rico en cinc.	pág. 99
Anexo B. Información coaltar epóxico.	101
Anexo C. Información imprimante fosfato de cinc.	103
Anexo D. Dosificación de agua, arena, cemento para la empresa Tubos SDI....	105

GLOSARIO

CORROSIÓN: Es el desgaste de diferentes materiales que se da a causa de diversas reacciones electroquímicas del material y el ambiente al que está expuesto, hay que tener este término muy en cuenta en el estudio de materiales pues conllevar varias consecuencias tanto económicas como de seguridad¹.

DURABILIDAD: Es la facultad que tiene un material para poder tolerar un medio o diferentes condiciones físicas o químicas y así lograr cumplir con la vida útil para la cual el material ha sido proyectado².

MORTERO: Es una mezcla uniforme que contiene materiales aglutinantes, agregados gruesos o finos y agua. Esta mezcla cumple diferentes funciones, sin embargo, entre las principales funciones están las estructurales. También pueden contener aditivos, que pueden llegar a mejorar sus propiedades mecánicas³.

PINTURA: Es un material que en un principio está compuesto por materiales sólidos y líquidos los cuales logran formar una película fluida y homogénea, que al secarse y/o solidificarse protege la superficie del ambiente de exposición⁴.

RECUBRIMIENTO: Se conoce como recubrimiento al material que está dedicado a proteger una superficie de agentes del exterior que puedan causar daños por su carácter agresivo. Estos materiales deben cubrir en su totalidad la superficie base y deben tener un espesor finito⁵.

TUBERÍAS: Es un conducto que sirve para transportar fluidos, el tipo de tubería varía dependiendo del tipo de fluido a transportar. Estos conductos a su vez conforman redes para cumplir con su finalidad; pueden ser metálicas, plástico, hormigón, entre otros⁶.

¹ SALAZAR, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). Scielo. 2015, vol. 28, nro. 3. pp. 2.

² GALVEZ, Jaime. Aspectos generales durabilidad. Puerto Rico: 2019. pp. 2-3.

³ GUTIERREZ DE LOPEZ, Libia. El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción. En: ARANGO, Roberto ALONSO, Nelson, ed. Agregados. Manizales: Sede Manizales, 2003. pp. 115.

⁴ E.U.A.T DE SEVILLA MATERIALES II. PINTURAS. [En línea]. Tema 18 - Pinturas. [Consultado: agosto 18 de 2020]. Disponible en: <http://asignatura.us.es/materialesII/Carpetas/Apuntes/pintura/pinturas.pdf>

⁵ SOLIS, Miguel. Que es un recubrimiento. [En línea]. Definición recubrimiento. (octubre 3 2020). [Consultado: agosto 18 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/360542890/Que-Es-Un-Recubrimiento>.

⁶ Pro materiales. Tuberías y accesorios. Salubridad, higiene e innovación. [En línea]. Futura systems. [Consultado: agosto 18 de 2020]. Disponible en: <https://promateriales.com/pdf/PM-84-8.pdf>

RESUMEN

En el presente trabajo tiene como finalidad evaluar conceptualmente diferentes alternativas de inhibición a la corrosión en tuberías, pues esta problemática afecta interés tanto económicos como técnicos de las empresas. Esta evaluación se basa en la comparación de tres diferentes métodos. En la protección catódica se estudiaron los ánodos de sacrificio en general. En el caso de las pinturas como recubrimiento, se caracterizaron de dos tipos; una pintura epoxi y otra la cual presenta pigmentos como refuerzo a base de fosfatos. Por último, se estudió el revestimiento de mortero como recubrimiento con y sin la inclusión de aditivos en la mezcla.

Para dar inicio a la escogencia de la mejor alternativa, se caracterizaron teóricamente las materias primas y sus propiedades más relevantes, con el fin de contextualizar su función en cada uno de las opciones analizadas. Respecto a la protección catódica, se establece el concepto de ánodos de sacrificio y se destacan tres de ellos (zinc, aluminio y magnesio), teniendo como propósito elegir el más adecuado según las especificaciones técnicas de proyecto. En relación a las pinturas, se identificaron sus principales componentes, función y clasificación. Finalmente, se conceptualizaron los revestimientos con morteros, sus usos y dosificación.

Por otro lado, se analizaron distintas investigaciones referentes a cada método de protección, teniendo como objetivo relacionar datos experimentales con la durabilidad. Por parte de la protección catódica, se logró evidenciar que para la estimación del cálculo de la vida útil se es necesario recurrir a métodos experimentales o algoritmos que permitan obtener datos aproximados, dado que según la información recopilada según literatura no llega a ser precisa en su totalidad, sin embargo, se obtuvo que la durabilidad aproximada de esta técnica es de alrededor 15 años; cabe aclarar, que está sujeta al costo de mantenimiento que requiera, valor que no se logró calcular.

En el caso de las pinturas, se evidenció según estudios que el proceso corrosivo de aquellas que contienen pigmentos inicia a mediados de los 10 meses de estudio, y su costo equivalente según especificaciones de la tubería en relación al diámetro y longitud fue de \$68.645,20. En relación a las pinturas epoxi sin pigmentos y resina epoxi, se establece que el desgaste a causa de la corrosión se logra evidenciar a los 30 días según el estudio analizado, y su costo se aprecia en \$241.739,40 y 208.467,30 respectivamente. Cabe aclarar que estos precios están sujetos al espesor escogido en este trabajo, el cual satisface las necesidades como recubrimiento ante la corrosión, y actúa como barrera protectora durante 15 años.

Finalmente, para los revestimientos con mortero se evaluaron dos posibilidades logrando evidenciar el costo, para ello, se analizó la implementación del mortero como recubrimiento con y sin la inclusión de aditivos. Para ello, se estudió el

comportamiento de la mezcla de mortero con dos aditivos: Metakaolin (MK) y silica fume (SF); donde se obtuvo que al sustituir el 10% p/p del material cementante por aditivo, se evidencia una mejora en sus propiedades de porosidad, sin llegar a determinar un posible incremento de su vida útil, pues esta estimación requiere de experimentación. El precio calculado de la muestra patrón (sin aditivos) fue de \$117.000, mientras que para la mezcla con 10% p/p de MK fue de \$153.128,06 y para SF fue de \$155.041,06.

PALABRAS CLAVE.

Corrosión, Vida útil, Mortero, Protección catódica, Pinturas.

ABSTRACT

In the present work, different alternatives of corrosion inhibition in pipes were evaluated, since this problem affects both economic and technical interests. This evaluation was based on the comparison of three different methods. In cathodic protection, sacrificial anodes were studied in general. In the case of paints as coating, they were characterized by two types; one epoxy paint and another one which presents pigments as reinforcement based on phosphates. Finally, it was studied the mortar coating as a coating with and without the inclusion of additives in the mixture.

In order to start choosing the best alternative, the raw materials and their most relevant properties were characterized, with the purpose of contextualizing their function in each of the options analyzed. Regarding cathodic protection, the concept of sacrificial anodes was established and three of them (zinc, aluminum and magnesium) were highlighted, having as purpose to choose the most suitable one according to the project's technical specifications. In relation to paints, their main components, function and classification were identified. Finally, the mortar coatings, their uses and dosage were conceptualized.

On the other hand, different researches were analyzed regarding each protection method, having as an objective to relate experimental data with durability. On the part of the cathodic protection, it was evidenced that, for the estimation of the useful life calculation, it is necessary to resort to experimental methods or algorithms that allow obtaining approximate data, since according to the information compiled according to literature, it is not precise in its totality; however, it was possible to establish that the approximate durability of this technique is of around 15 years, it is necessary to clarify that it is subject to the maintenance cost that it requires, value that was not calculated.

In the case of the paints, it was evidenced according to studies that the corrosive process of those containing pigments begins in the middle of the 10 months of study, and its equivalent cost according to the specifications of the pipe in relation to the diameter and length was \$68,645.20. In relation to the epoxy paints without pigments and epoxy resin, it was established that the wear and tear due to corrosion is evident after 30 days according to the study analyzed, and its price is appreciated in \$241,739.40 and 208,467.30 respectively. It should be clarified that these prices are subject to the thickness chosen in this work, which meets the needs as a coating against corrosion, and acts as a protective barrier for 15 years.

Finally, for the coatings with mortar, two possibilities were evaluated achieving evidence of the cost, for this, the implementation of the mortar as a coating with and

without the inclusion of additives was analyzed. For it, it was studied the behavior of the mortar mixture with two additives: Metakaolin (MK) and silica fume (SF); where it was obtained that when substituting 10% w/w of the cementitious material by an additive, it is evidenced an improvement in its properties of porosity, without determining a possible increase of its useful life, because this estimation requires experimentation. The calculated price of the standard sample (without additives) was \$117,000, while for the mixture with 10% w/w of MK it was \$153,128.06 and for SF it was \$155,041.06.

KEYWORDS.

Corrosion, Useful life, Mortar, Cathodic protection, Paints.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el transporte de agua potable para grandes ciudades se lleva a cabo en tuberías, sin embargo, esto, trae consigo un adecuado mantenimiento en relación a su protección, pues debido a que, al estar sometidas en ambientes agresivos, que contengan iones cloruro, estas estructuras están expuestas a sufrir un ataque corrosivo trayendo consigo perforaciones que van desde el exterior al interior de la tubería, provocando que este daño provoque dificultades en la distribución de agua, o en el peor de los casos una explosión que genere daños colaterales. Es por esto, que muchos estudios se han enfocado en la mitigación de esta problemática dado que los gastos de estas fallas conllevan pérdidas masivas en la producción, implementando alternativas tales como el revestimiento interno y externo de las tuberías con mortero; por lo cual, este trabajo propone una evaluación y comparación de las alternativas anteriormente mencionadas, con el fin de establecer cuál de estas sería una alternativa atractiva tanto técnica como económicamente hablando.

El desarrollo del trabajo, está enfocado en la solución de tres objetivos específicos, como primer objetivo se realiza la previa caracterización de las materias primas utilizadas en cada una de las alternativas comprendidos en los capítulos 1 y 2, donde se describen las propiedades de cada uno de los materiales, las pruebas que se deben realizar, y así mismo, la función que cumple, es decir el aporte que se puede evidenciar en cada una de los métodos a escoger según la información obtenida por los estudios previamente analizados. Como segundo objetivo, se lleva a cabo la comparación entre cada una de las alternativas, evidenciando los beneficios técnicos y económicos que pueda ofrecer a las empresas que deseen implementar técnicas que mitiguen el efecto corrosivo para las tuberías expuestas en ambientes agresivos, tales como la penetración de iones en la barrera protectora, aumento de su vida útil, permeabilidad, y otros descritos a lo largo del capítulo 3.

Finalmente, el tercer objetivo, comprende un análisis financiero que permite contrastar los costos totales de la producción frente a esta misma con la inclusión de la mejor alternativa escogida para el sistema de distribución de agua por medio de tuberías. Para ello, se realiza el análisis entre el costo total de inversión de la alternativa a escoger y el beneficio que aporta a esta protección, es decir al aumento de la vida útil, mostrado en el capítulo 4. Cabe resaltar que el costo de inversión está relacionado con el valor adicional de la implementación de la alternativa escogida para una tubería de 6 m de longitud y 24" de diámetro, y a su vez, está sujeto a los valores brindados por la empresa Sika S.A.S y Tubos SID.

Con base al estudio y análisis realizado, se elaboraron las conclusiones y recomendaciones del trabajo, lo cual beneficiará a otras investigaciones que estén interesadas en implementar técnicas de barrera que reduzcan la corrosión en tuberías destinadas para el transporte de agua en diferentes ciudades.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar teóricamente diferentes alternativas que inhiban la corrosión en tuberías sometidas a medios agresivos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar conceptualmente las materias primas y ensayos utilizados en los distintos métodos para la reducción del efecto corrosivo.
2. Establecer una comparación entre los métodos de inhibición por el efecto corrosivo en tuberías identificando la mejor alternativa.
3. Realizar el análisis financiero con la inclusión de la alternativa escogida.

1. GENERALIDADES DE LA CORROSIÓN

A lo largo de este primer capítulo, se estructuran las especificaciones conceptual y teóricamente para la elaboración del trabajo de grado, para ello, se definen conceptos básicos y propiedades relacionados con las materias primas utilizadas en las posibles alternativas que inhiban el desgaste de tuberías provocado por el efecto corrosivo, y así lograr establecer una evaluación y comparación entre ellas para su posterior elección según beneficios técnicos y económicos plasmados en los capítulos 2 y 3.

1.1 CORROSION

Este fenómeno se define como el proceso de deterioro que sufren los materiales metálicos provocados por reacciones químicas y electroquímicas, debido a que estos, buscan reducir su potencial energético. Esto conlleva a repercusiones económicas, de seguridad y de la conservación de los materiales. En el caso de materiales como polímeros y cerámicos, se utiliza el término degradación.

Esta problemática se debe a que, con el tiempo los materiales tratan de lograr su estado natural, modificado por aleaciones u otros procesos, lo cual conlleva a la generación de reacciones de óxido-reducción, donde se ven involucrados 3 constituyentes: electrodos (ánodo y cátodo), un electrolito que actúa como medio conductor, que generalmente es una solución acuosa. Además, cuenta con una conexión eléctrica entre los electrodos. Por otro lado, este fenómeno está directamente relacionado con el potencial electroquímico, el cual se considera como la resistencia que presenta un material metálico a la corrosión, y que depende de la composición del electrolito. Dicho esto, se tiene que en cuanto más positivo sea el valor del potencial, más noble es el material, es decir más resistente; mientras que, si el valor es más negativo, entonces el material es más reactivo a la corrosión⁷.

Por su parte, según Bruce, a través de la historia el hombre ha desarrollado diversos contrales que mitiguen este problema. Por ejemplo, los primeros mecanismos de control implementados por los romanos del siglo I estuvieron relacionados con la inclusión de bitumen y pinturas a base de plomo. Para el año 500 a.C., se empleaban revestimientos de sulfuro de cobre en las espadas para evitar el efecto corrosivo, ya que estas eran fabricadas en bronce. Posterior a esto, Michael Faraday para el año 1800 determinó una relación cuantitativa entre la corriente eléctrica y la acción química de la corrosión, lo cual a hoy en día se ha venido

⁷SALAZAR, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). Scielo. 2015, vol. 28, nro. 3. pp. 128-134.

estudiando con el fin de manejar y controlarla por medio de métodos técnico y financieramente sostenibles⁸.

1.1.1 Tipos de corrosión. Existen diferentes procesos en donde se puede evidenciar el fenómeno de corrosión, y estos se caracterizan dependiendo de la naturaleza del material y de las condiciones a las que está expuesto, por lo cual con base a lo anterior se pueden clasificar en cuatro categorías: corrosión generalizada, corrosión localizada, corrosión combinada con un fenómeno físico evidenciada en el cuadro 1.

Cuadro 1. Tipos de corrosión.

Tipo	Generalidades
Corrosión generalizada	Desgasta total y uniformemente la superficie del material dando lugar a grandes pérdidas de dinero debido al deterioro. Su propagación se debe a la presencia de impurezas, generando una diferencia de potencial y formación de electrodos que inician el efecto corrosivo.
Corrosión localizada	Se evidencia en determinadas zonas del material, ya sea por su geometría o las condiciones del medio; por lo cual, presenta mayor riesgo, y generalmente se presentan por fisura, picaduras o cavitación.
Corrosión combinada con un fenómeno físico	El fenómeno físico causa el inicio de la corrosión. Puede darse por erosión, afectando la capa pasiva. De igual forma se tiene corrosión por tensión, debida al esfuerzo del material que conllevan fisuras. Por último, está la corrosión por fatiga, donde el material está expuesto a esfuerzos externos cíclicos o fluctuantes.

Fuente: Elaboración propia con base en SALAZAR, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Scielo*. 2015, vol. 28, nro. 3. pp. 128-134.

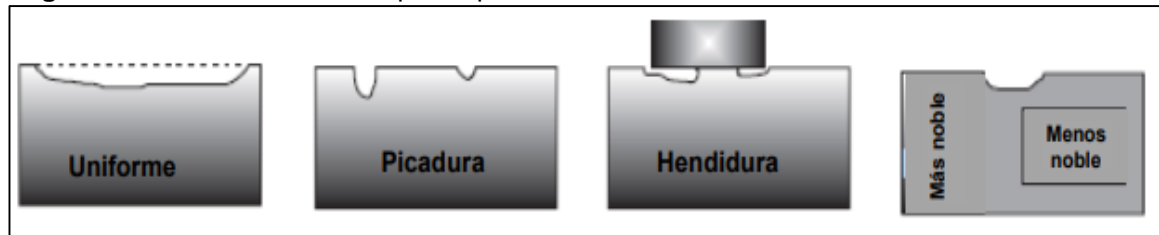
1.1.1.1 Otros tipos de corrosión. En este caso se tiene la corrosión por desaleación y por oxidación. Para la desaleación, se establece que esta actúa en aleaciones metálicas, donde el material con mayor afinidad al oxígeno, se separa, dejando a la intemperie el otro material y dando inicio al proceso de la corrosión. En relación a la oxidación, se tiene que es un proceso el cual se lleva a cabo en elevadas temperaturas y con presencia de algún oxidante. Al iniciar las reacciones químicas y no disponer de un electrolito, las moléculas de gas oxidante entran en contacto con el material y reaccionan, y con el efecto de la temperatura, el

⁸BRUCE, Nausha y MARKO Oystein. La corrosión: La lucha más extensa. [En línea]. (mayo). [Consultado: junio 12 2019]. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/03-corrosion-spanish>

compuesto empieza a difundirse en el interior del material, provocando que este se vuelva frágil y pueda corroerse posteriormente⁹.

Cabe aclarar que los tipos de corrosión anteriormente descritos pueden llevar a identificarse por inspección visual tal como se evidencia en la imagen 1, donde la corrosión uniforme se diferencia por la pérdida regular de peso del metal, la localizada por el desgaste de metal en áreas discretas y la galvánica la cual es ocasionada por contacto eléctrico entre conductores.

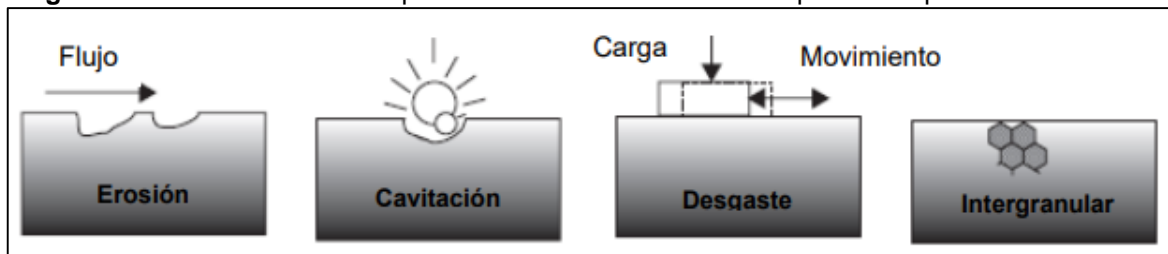
Imagen 1. Corrosión identificable por inspección visual.



Fuente: SOSA, Adrián. Administración de la corrosión externa en ductos: Estudio en laboratorio [en línea] Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, 2013.

Por otro lado, los diversos deterioros por corrosión tales como la erosión, cavitación, desgaste e intergranular, requieren por su parte herramientas de inspección especiales; en el caso de la corrosión por tensión y fatiga demandan un análisis microscopio con el fin de evidenciar los agrietamientos o efectos microbianos que provoquen el efecto corrosivo como se evidencia en la imagen 2, donde efectos como la erosión o cavitación generan daños en las estructuras, que no pueden ser identificadas por inspección visual, sino que es necesario el uso de herramientas anteriormente mencionadas¹⁰.

Imagen 2. Corrosión identificable por medio de herramientas de inspección especiales.



Fuente: SOSA, Adrián. Administración de la corrosión externa en ductos: Estudio en laboratorio [en línea] Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, 2013.

⁹ SALAZAR, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Scielo*. 2015, vol. 28, nro. 3. pp. 128-134.

¹⁰ SOSA, Adrián. Administración de la corrosión externa en ductos: Estudio en laboratorio [en línea] Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, 2013.

1.1.2 Factores que influyen en la corrosión. En este caso, es importante tener en cuenta tanto las propiedades del material y el medio al que se encuentra expuesto, pues según Salazar¹¹ estos afectan directamente el comportamiento.

1.1.2.1 Acidez de la solución. El pH es la característica que define la cantidad de hidrógenos libres en una solución, por lo cual, en soluciones acidas, al tener una mayor capacidad de aceptar electrones, tienden a ser más vulnerables a la corrosión que las soluciones neutras y alcalinas, puesto que la zona anódica al liberar electrones da lugar a reacciones que generan el rápido deterioro de la superficie y consigo del material.

1.1.2.2 Sales disueltas. En la actualidad se tienen 2 tipos de sales, las acidas y las alcalinas. En el caso de las acidas, al diluirse con la solución electrolítica, reduce el pH, y consigo aumenta la velocidad de corrosión debido al efecto de acidez; por su parte, las soluciones alcalinas, incrementan el pH, por lo cual, en algunos casos actúan como inhibidores durante el proceso de corrosión.

1.1.2.3 Capas protectoras. Generalmente para mitigar el efecto de la corrosión se tiende a crear capas que protejan la superficie de agentes externos, las cuales pueden ser implementadas en forma de recubrimientos, o por el fenómeno de pasividad, o en último caso, formando capas de óxidos metálicos que impiden el avance del proceso corrosivo.

1.1.2.4 Temperatura. Este parámetro es directamente proporcional a la velocidad de corrosión, puesto que influye en la difusión del oxígeno hacia la superficie del material, causando un deterioro irreversible.

1.1.2.5. Velocidad de flujo. Generalmente en los sistemas de transporte de fluidos, un aumento de la velocidad de estos, incrementa el proceso corrosivo, debido a que esto posibilita a que las sustancias corrosivas alcancen y ataquen zonas que aún no han sido afectadas. Además, una alta velocidad de flujo, en cierta parte, afecta la formación de capas resistentes que protegen al material del efecto de la corrosión.

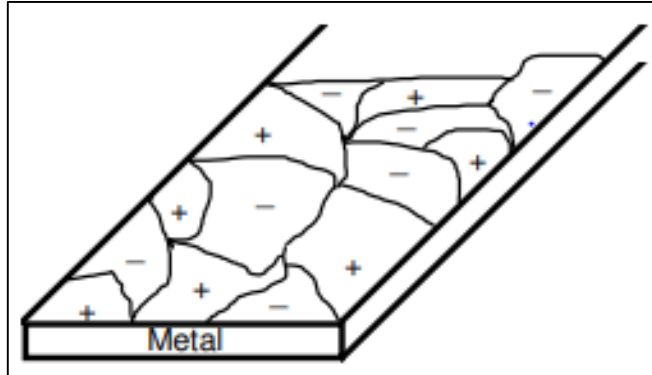
1.1.3 Corrosión en tuberías. Los ductos en las grandes ciudades se destinan como medio de transporte de gases y líquidos a diferentes lugares; estas por lo general se encuentran enterradas en la tierra, por lo cual se considera un ente bastante discreto y que a su vez, no se evidencia su presencia, sin embargo, al estar sometidas a grandes profundidades estas sufren desgaste por el fenómeno de corrosión debido a los factores anteriormente descritos, no obstante, el primordial a analizar y que trae consigo mayor problemática en los sistemas de transporte de agua es la penetración por ion cloruro u otras sustancias presentes en el suelo,

¹¹ SALAZAR, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Scielo*. 2015, vol. 28, nro. 3. pp. 128-134.

minerales como silicatos, micas, cuarzo, arcilla y demás, óxidos e hidróxidos de hierro, carbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos¹².

Por otro lado, según el ingeniero Rendón al tener la vista de una tubería de acero al microscopio se puede lograr identificar una configuración granulada como se observa en la imagen 3, los cuales debido a su proceso de producción y calidad del material conlleva a que cada sección se comporte como un electrodo con determinada tendencia ya sea anódica o catódica.

Imagen 3. Vista microscópica de superficie metálica.

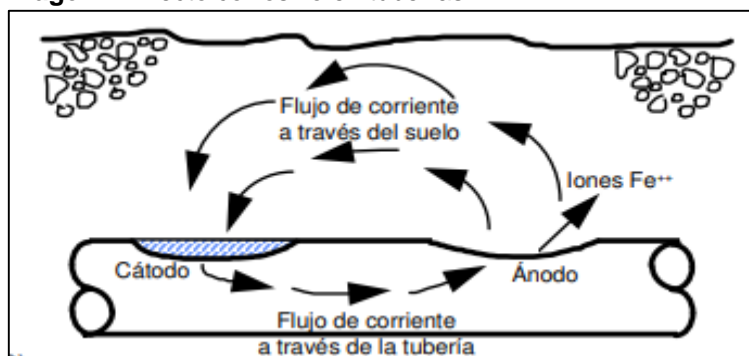


Fuente: RENDÓN, José. Protección contra la corrosión en tuberías. [En línea]. (febrero 13). [Consultado: junio 19 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/13987860/PROTECCION_CONTRA_LA_CORROSION_EN_TUBERIAS

Partiendo de esto, el efecto corrosivo tiene lugar cuando se evidencia la formación de una pila o se cierra el circuito entre los polos, imagen 4, es decir, debe existir un medio que permita el desplazamiento de electrones entre las áreas de la tubería, el cual en este caso será el suelo, dando lugar a que la tendencia anódica ceda electrones mientras que la catódica los recibe, este efecto se puede llegar a explicar y entender.

¹² SOSA, Adrián. Administración de la corrosión externa en ductos: Estudio en laboratorio [en línea] Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, 2013.

Imagen 4. Efecto corrosivo en tuberías.



Fuente: RENDON, José. Protección contra la corrosión en tuberías. [En línea]. (febrero 13). [Consultado: junio 19 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/13987860/PROTECCION_CONTRA_LA_CORROSION_EN_TUBERIAS

En relación a lo anterior, se tiene que este desgaste puede traer consigo pérdidas a nivel productivo y económico, por lo cual es necesario la implementación de un control de la corrosión de las tuberías a partir de diversos métodos que permitan un aislamiento entre la tubería y el medio externo al que está expuesta.

1.1.3.1 Causas de corrosión en tuberías. Frente a esta situación se tienen diferentes aspectos que afectan directamente el desgaste de las tuberías, los cuales a su vez son considerados variables a controlar. En primera instancia se tiene gran variedad de suelos en relación a su aspereza y tamaño de grano, por ejemplo, en roca, mezcla de suelos o incluso arcilla. En muchos de los casos una misma tubería puede estar sometida a disímiles suelos, por lo cual el electrolito del suelo será determinante para cada sección de la misma. Cabe aclarar que este potencial galvánico al variar a través del área de la tubería puede estar tanto en macro escala (extensos kilómetros de la tubería) como en micro escala (a escasos centímetros entre uno y otro).

Por otra parte, se tiene la presencia en altas o bajas cantidades de diversos componentes; por ejemplo, en el caso de la concentración de oxígeno, la tubería puede estar sometida a dos casos diferentes, zona en la cual presenta baja presencia de oxígeno denominada anódica y, por otro lado, aquella que presenta una mayor concentración, dando lugar a que la actividad corrosiva en este caso se pueda conocer como una pila de concentración.

Así mismo, se tiene que los componentes que están en contacto con la tubería generalmente son metales, los cuales pueden estar sujetos al ataque corrosivo si no existe un aislamiento entre ellos.¹³ Como se puede evidenciar en la tabla 1, los

¹³ SOSA, Adrián. Administración de la corrosión externa en ductos: Estudio en laboratorio [en línea] Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, 2013

metales tienden a ser clasificados por su parte anódica y catódica, siendo que los metales de arriba tienden a ser más anódicos. En caso tal de no llevarse un control que aisle estos materiales, puede generar daños colaterales que aumenten la velocidad de corrosión de la estructura, pues esto genera el paso de iones entre un material metálico al otro provocando consigo la corrosión, así pues, por medio de la tabla 1 puede llegar a escogerse los materiales que reduzcan este efecto que puede darse en suelos y estructuras que permitan el paso de agua neutra.

Tabla 1. Serie galvánica de metales y aleaciones en suelos y agua neutra.

Metal o aleación	Potencial (V)
Más activo	
Magnesio puro	-1,75
Aleación de magnesio	-1,16
Zinc	-1,1
Aleación de aluminio	-1,05
Aluminio puro	-0,8
Acero bajo carbono (limpio)	-0,5 a -0,8
Acero bajo carbono (oxidado)	-0,2 a -0,5
Hierro fundido	-0,5
Plomo	-0,5
Acero bajo carbono en concreto	-0,2
Cobre, latón y bronce	-0,2
Hierro fundido con alto sílice	-0,2
Cascarilla de acero	-0,2
Carbón, grafito y coque	0,3
Más noble	

Fuente: SOSA, Adrián. Administración de la corrosión externa en ductos: Estudio en laboratorio [en línea] Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, 2013.

En consecuencia, se tiene que la corrosión le cuesta dinero a cualquier empresa, y al implementar un control previene este problema y así mismo puede llegar a generar un ahorro, dado que según Cuervo¹⁴, las cifras relacionadas con los activos expuestos (I.A.E) de la corrosión en la zona de la Costa Atlántica, por cierto, una de las áreas más vulnerable por esta problemática debido a la elevada presencia de cloruros y sulfuros en sus suelos por la cercanía de las aguas saladas, presenta un 42,85% y en el cual predomina la tecnificación del sistema productivo. A su vez

¹⁴ CUERVO, Joaquín; DELGADO Juan y HERRERA Francisco. Inhibidores de los costos de la corrosión en Colombia. [En línea]. Universidad de Antioquia. [Consultado: junio 19 2020]. Disponible en: http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/5327/1/CuervoJoaquin_1998_IndicadoresCostosCorrosi%C3%B3n.pdf

también plantea la cantidad de activos que están altamente expuestos al efecto corrosivo. Es por esto que esta investigación tiene como objetivo principal plantear métodos y/o alternativas que mitiguen este fenómeno que afecta tanto técnica como económicamente las empresas que utilizan las tuberías para el transporte de agua en las grandes ciudades, y que a su vez permitirá prevenir accidentes por parte de grandes explosiones, debido a elevadas presiones a la que fluye el agua y traerá consigo un aumento en la vida útil de esta.

1.2 ALTERNATIVAS PARA EL CONTROL Y PREVENCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN

Con el fin de lograr la mitigación de este efecto corrosivo en las tuberías de acero enterradas en el suelo, se analizan diferentes métodos y con base a estos se establece la mejor alternativa que satisfaga las necesidades frente a la problemática establecida, además se tendrá en cuenta que la opción a escoger estará intrínsecamente relacionada con factores técnicos y financieros.

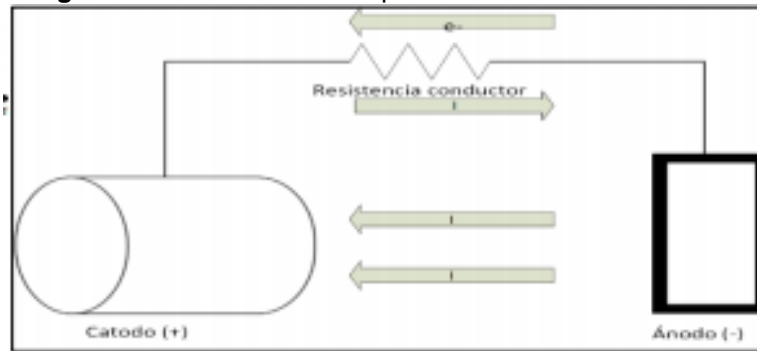
En este caso, existen diversas alternativas que mitigan este acelerado ataque corrosivo en las tuberías por los componentes que a su paso desgastan el material por medio de perforaciones en las cuales penetran la tubería y generan daños irremediables en ella. Estas posibles soluciones, están relacionadas con prácticas tales como la protección catódica, recubrimientos con pinturas especiales y recubrimientos de mortero u hormigón con la inclusión de aditivos¹⁵.

1.2.1 Protección catódica. Esta técnica, ha sido una de las más utilizadas por las industrias para mitigar el ataque corrosivo generado por componentes que perforan y causan consigo daños colaterales en las tuberías. Este método por su parte, obliga a que la estructura que se desea proteger funcione como un cátodo favoreciendo los factores electroquímicos, dado que, el ánodo de sacrificio (ánodo galvánico) al estar conectado, genera una descarga de corriente la cual, por su parte, fluye por el electrolito hasta la estructura que se está protegiendo sin causar daño en la misma, imagen 5. En este caso, el sistema actúa con base al principio del potencial diferencial, teniendo como conductor de corriente la tierra o el suelo que permite el cambio de las propiedades de los elementos a proteger¹⁶.

¹⁵ J.A. Sciortino. Construcción y mantenimiento de puertos y desembarcaderos para buques pesqueros. [En línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma. [Consultado: junio 30 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/v5270s/V5270S00.htm#TOC>

¹⁶ LOACHAMIN, Jefferson. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA INDUSTRIA PETROLERA [en línea]Universidad Politécnica Salesiana. Sede Quito, 2019. p. 5-6.

Imagen 5. Protección catódica por ánodo de sacrificio.



Fuente: LOACHAMIN, Jefferson. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA INDUSTRIA PETROLERA [en línea]Universidad Politécnica Salesiana. Sede Quito, 2019. p. 6.

1.2.1.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio. En el caso de la protección galvánica se sabe que está depende directamente del potencial del ánodo, el cual a su vez será el metal de sacrificio.

Por su parte los controles de los valores de potencial son medidos respecto al electrodo de referencia (generalmente cobre/sulfato de cobre). Por otra parte, según el potencial del material el más conveniente y útil es el aluminio, beneficiando la protección catódica en ambientes marinos, en el caso de los suelos se recomienda el zinc o magnesio. Es muy importante que el ánodo utilizado tenga una distancia prudente de la estructura, permitiendo la eficiente distribución de la corriente del ánodo a lo largo de la tubería, asegurando consigo que cada uno de los ánodos proteja cierta longitud de la misma.

Este sistema tiene como ventajas que no requiere de un suministro de corriente por fuente externa, puesto que esta corriente se logra con la unión eléctrica entre la tubería, que en este caso es la estructura a proteger junto con el ánodo galvánico; el mantenimiento es bajo costo en comparación con el de corriente impresa y existe una baja interferencia con otros metales, sin embargo, presenta el inconveniente de la limitación de corriente, dada que esta depende del potencial del ánodo y la resistividad del suelo, ya que entre mayor sea esta última, la protección no será tan eficiente como se prevé¹⁷.

Por otro lado, este tipo de protección catódica, recomienda mantener el control del potencial del circuito abierto, el contenido de energía teórico y su eficiencia.

1.2.1.2. Factores que intervienen en la protección catódica. Estos factores están directamente relacionados con la resistividad del suelo, tales como la temperatura,

¹⁷ J.A. Sciortino. Construcción y mantenimiento de puertos y desembarcaderos para buques pesqueros. [En línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma. [Consultado: junio 30 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/v5270s/v5270S00.htm#TOC>

humedad, niveles de salinidad, como fueron mencionados anteriormente, además del contenido de oxígeno y compactación del suelo.

1.2.1.3 Factores de diseño. Es muy importante tener en cuenta los parámetros de diseño para la eficiente protección catódica en estructuras como tuberías dispuestas para el transporte masivo de agua potable, por lo cual es fundamental el uso del algoritmos de diseños para los ánodos de sacrificio con base a las normas NACE y H-201 de PDVSA utilizando programas como MATLAB, el cual, acobija factores tales como área a proteger, densidad de corriente, corriente total, peso y numero de ánodos requeridos, resistencia ánodo-suelo, entre otras¹⁸.

1.2.2 Protección anódica. Este método de protección está basado en la corrosión galvánica enfocada a proteger el material anódico. Esta por su parte, se caracteriza por provocar un paso de corriente entre los metales y así lograr la formación de una capa pasiva en la superficie manteniendo una barrera entre estos¹⁹.

Pese a esto, se requiere un alto flujo de corriente para lograr la formación de esta película pasiva, no obstante, al lograr que esté presente como protección y se mantenga en buenas condiciones, la corriente empieza a disminuir notoriamente, lo cual permite que a nivel de magnitud ya no se requiera una fuente externa continua de corriente.

Otra de sus ventajas está relacionada con la técnica que emplea, debido a su característico factor de penetración, por ende, este método es usualmente utilizado en tuberías o reactores con diferentes formas geométricas, así como en medios corrosivos. Sin embargo, no puede llegar a proteger metales que no puedan ser pasivados en dicho medio, y además si el sistema llegase a fallar, puede provocar un ataque crucial que provocara desgaste y por lo tanto perdida de material²⁰.

1.2.3 Recubrimientos y revestimientos contra el efecto corrosivo. Según Núñez, la realidad de los sistemas de tuberías de metal tanto subterráneos como visibles están siempre expuestos a la corrosión durante su funcionamiento tanto para sistemas de agua caliente o fría, drenaje, de descarga y distribución. Estos por su parte, al ser instalados deben ser evaluados a nivel de alternativas que permitan mitigar el desgaste imparable e imperceptible debido a esta problemática tanto en el interior como exterior de los tubos que provocan una reducción de su vida útil con se muestra en la imagen 6, la cual establece el porcentaje de desgaste evidenciado a lo largo de los años para la tubería²¹.

¹⁸ LOACHAMIN, Jefferson. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA INDUSTRIA PETROLERA [en línea]Universidad Politécnica Salesiana. Sede Quito, 2019.

¹⁹ TERRAZAS, Miriam. Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor [en línea]Centro de investigación en materiales avanzados, 2021. 26 p.

²⁰ *Ibíd.*, p 26 – 27.

²¹ NUÑEZ, Eduardo. Recubrimiento epóxico para combatir la corrosión. Mundo HVAC&R.

Imagen 6. Efecto corrosivo en tuberías a lo largo del tiempo



Fuente: NUÑEZ, Eduardo. Recubrimiento epóxico para combatir la corrosión. *Mundo HVCAC&R*.

Por otro lado, el desgaste de estas tuberías también conlleva problemas serios con el desprendimiento de partículas, debido a que por ejemplo tubos dispuestos para el transporte y distribución de agua pueden ser contaminados con estos compuestos, causando daños en el producto.

Este problema, en el mayor de los casos no es visible de quien lo controla, ya que estas tuberías están ubicadas en terrenos subterráneos, por lo cual su control es tedioso en el caso de la protección catódica; teniendo claro esto, las industrias actualmente implementan recubrimientos parcial o totalmente según los requerimientos y causas para su control, con el fin de evitar el reemplazo total de la tubería a corto plazo²².

Por lo anterior, se tiene que los métodos para inhibir la corrosión se dividen en los recubrimientos metálicos (protección catódica) y orgánicos (pinturas y resinas) los cuales generalmente son aplicados como líquidos que se secan y crean una película endurecida sobre la superficie que se desea proteger²³.

Como se mencionó anteriormente, los recubrimientos permiten aumentar la vida útil de la tubería por causas del efecto corrosivo y una de las soluciones es la aplicación de pintura por medio de capas delgadas a ductos tanto externa como internamente, la cual se transforma en una película sólida que se adhiere formando una película brillante o mate que protege a la tubería de compuestos que la corroen.

1.2.3.1 Pinturas. Las pinturas líquidas son consideradas un sistema disperso fisicoquímicamente hablando. Están compuestas por partículas sólidas finas que se dispersan en una sustancia aglutinante la cual está dispuesta en una mezcla solvente o solvente. Cabe resaltar, la existencia de pinturas en polvo, aquellas que están 100% compuestas de sólidos (sin solvente) y además requieren de tratamientos térmicos para obtener una película continua durante su aplicación.

²² NUÑEZ, Eduardo. Recubrimiento epóxico para combatir la corrosión. *Mundo HVCAC&R*.

²³ OROZCO, Ricardo. Recubrimientos anticorrosivos. [En línea]. Unidad anticorrosión. [Consultado: Julio 01 2020]. Disponible en: <https://www.uv.mx/personal/roozco/files/2011/05/6-UNIDAD-4-RECUBRIMIENTOS-ANTICORROSIVOS-INICIO.pdf>

1.2.3.2. Tipos de pinturas. La clasificación de las pinturas depende de sus características y finalidad de aplicación.

- **Medio dispersante:** Estas sustancias pueden estar o ser difundidas en agua, en disolventes orgánicos (donde el aglutinante puede estar disuelto en el disolvente, o disperso).
- **Cantidad de medio dispersante:** Bajo y alto contenido de sólidos y en polvo.
- **Proceso de secado de la película:** En este ítem se debe tener en cuenta el recubrimiento que se desea aplicar y puede ser por evaporación del disolvente, reacción producida por los dos componentes (esta se da en presencia del oxígeno del aire o incluso la humedad) y por radiación.
- **Función:** En este caso, depende directamente del propósito, es decir si es para acabado, imprimación o de fondo.
- **Naturaleza química del aglutinante:** Existen epoxídicas, poliuretanos, vinílicas, acrílicas, siliconadas, y otras más²⁴.

En este caso, el trabajo está enfocado en la clasificación de las pinturas según su naturaleza química, puesto que las más utilizadas en la industria como recubrimiento son las epóxi y las siliconadas.

Por otro lado, la clasificación de las pinturas puede depender de diferentes factores como su finalidad, propiedades, composición, entre otras. Es por esto, que a continuación se realiza una breve clasificación según su aglutinante para su posterior utilidad como recubrimiento de barrera contra la corrosión²⁵.

- **Resina epóxi:** Estos recubrimientos han sido estudiados para ser implementados en estructuras expuestas a ambientes marinos (curadas con poliamidas) e industriales con el fin de mejorar las propiedades anticorrosivas. Cabe resaltar que este tipo de resina, en muchas ocasiones puede ser evaluada con la inclusión de diversos compuestos tales como nano estructuras, sílice, aminas, entre otras, que mejoran sus propiedades contra el efecto corrosivo y así se puedan llegar a obtener mejores resultados en campos tales como recubrimientos protectores, aplicaciones eléctricas, refuerzo, entre otras, dado que esta presenta una excelente adherencia, resistencia química y calor, debido a su buena termo estabilidad²⁶.
- **Pigmentos inhibidores:** Estos compuestos al igual que las resinas, son empleados para reducir la permeabilidad en el sistema a proteger por medio de una película que aísla el metal de los medios externos, siendo que el espesor de dicha capa será directamente proporcional a la eficiencia frente a la mitigación de esta problemática.

²⁴ GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 18 p.

²⁵ GUIDICE, Carlos y PEREYRA, Andrea. Tecnología de pinturas y recubrimientos. Argentina: Editorial de la universidad tecnológica Nacional - Argentina, 2009. 2-12 p.

²⁶ AGUILAR, Erick y RIGAIL, Andrés. Propiedades Anticorrosivas de un recubrimiento nanocompuesto de epóxica / amina/ nanoarcillas. Revista tecnológica ESPOL. 2006, pp. 125-126.

Generalmente, estos pigmentos se clasifican según su mecanismo de acción en solubles, formadores de complejos, básicos y metálicos. Es importante aclarar que estos pigmentos deben estar libres de cromo y plomo, debido al impacto ambiental y factores de toxicidad²⁷. Además, los pigmentos se pueden clasificar según su finalidad, y en el caso de este trabajo se abarcan principalmente los anticorrosivos, tales como: barrera, aquellas que pasivan la superficie y los que generen una protección catódica²⁸, es decir aquellos que además de brindar el color a la pintura permite reforzar el grado de anticorrosión en ambientes agresivos con componentes tales como el zinc, fosfatos, entre otros. Habitualmente estos pigmentos son de color rojo²⁹.

1.2.3.3 Recubrimiento con mortero. Esta técnica permite pasivación y el retardo de la corrosión en las superficies y materiales, ya que en su mayoría, estas estructuras están expuestas en ambientes agresivos y provocan, por ejemplo, la carbonatación en el hormigón, proceso en el cual el pH del concreto disminuye causando que valores inferiores a 11, destruyan el agente pasivo dando lugar a que entre más bajo sea el valor, aumentara la velocidad del deterioro en el material; por su parte, los ambientes agresivos afectan los recubrimientos por medio de la capilaridad y difusión, provocando una destrucción localizada en la capa pasiva³⁰.

A lo largo del estudio, se evalúan las diferentes variaciones en las propiedades mediante la inclusión de aditivos con el fin de realizar una comparación asertiva frente a la mitigación de la corrosión en tuberías.

1.2.3.4 Tipos de morteros. Según su endurecimiento los morteros se clasifican en dos: los hidráulicos que son aquellos que se caracterizan por endurecerse bajo agua, pues su composición posibilita alcanzar altas resistencias iniciales; y los aéreos, en los cuales su endurecimiento se debe a la reducción de humedad (secado) por efecto del aire y proceso de carbonatación, fraguan poco a poco.³¹

Por otro lado, los morteros pueden llegar a clasificarse según su material constituyente tal como se describe a continuación.

- **Morteros de cemento y arena.** Estos morteros son los más empleados en Colombia para diferentes usos, tales como los revestimientos para la protección de tuberías de acero, por sus destacadas características como las altas resistencias y su trabajabilidad. Estas por su parte, depende de la proporción de

²⁷ AGUILAR, Erick y RIGAIL, Andrés. Propiedades Anticorrosivas de un recubrimiento nanocompuesto de epóxica / amina/ nanoarcillas. Revista tecnológica ESPOL. 2006, p.154-155.

²⁸ GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 16 p.

²⁹ GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

³⁰ CYMPER. Morteros de reparación con inhibidores de corrosión. [En línea]. [Consultado: 30/03/2020]. Disponible en: <https://www.cymper.com/blog/morteros-de-reparacion-con-inhibidores-de-corrosion/>

³¹ GUTIERREZ DE LOPEZ, Libia. El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción. En: ARANGO, Roberto ALONSO, Nelson, ed. Agregados. Manizales: Sede Manizales, 2003. pp. 115

cemento y arena usados; es decir, dependiendo de las necesidades o requerimientos puede variarse y lograr obtener la textura deseada.

Al ser un mortero clasificado como hidráulico, debe ser preparado en corto lapso de tiempo entre los procesos de amasado y la colocación. Generalmente su uso debe ser inmediato, por lo que su mezcla es realizada en el lugar donde será dispuesto, mezclando primero el cemento y la arena, y luego agregando agua según se requiera. Es importante mencionar las características de granulometría, módulo de finura y textura de las partículas para la arena, pues son factores fundamentales para la calidad del mortero³².

Por parte de la cantidad del cemento, se tiene que bajos contenidos de este compuesto provoca que la mezcla torne a volverse áspera y con difícil de manejar, puesto que las partículas de arena rozan entre si e impidiendo que la pasta de cemento actué como lubricante en la mezcla; no obstante, al tener gran agregado de cemento, aumenta su resistencia pero es presenta una alta retracción en el secado, es decir, presenta una tendencia a agrietarse, por lo cual genera una alta porosidad en su estructura y puede ser penetrado fácilmente por compuestos externos presentes en el ambiente donde está expuesto³³.

- **Morteros de cal y cemento:** Estos morteros, se suelen utilizar cuando se desea obtener una mezcla de gran trabajabilidad, alta retención agua y resistencia. A diferencia, de los morteros de cal, estos sustituyen parte del cemento por cal, por lo cual, estos son conocidos también como Morteros de cemento rebajado.

Dependiendo de los requerimientos, se establece que en el caso de obtener una mezcla con alto contenido de cemento, se tendrá una mezcla con buena resistencia y poco tiempo de amasado y colocación, será normalmente trabajable; por el contrario, en el caso de tener un mortero con alto contenido de cal, tendrá baja resistencia, aumentara el tiempo de amasado y colocación, a su vez será plástico y aumentara su permeabilidad, y tendrá mayor retracción³⁴.

- **Morteros de yeso:** Por su parte, estos morteros de yeso son preparados a partir de yeso hidratado con agua, y este contenido varía dependiendo al grado de cocción, según la calidad y finura del yeso. Usualmente se agrega el 50% para obras normales, en estucos el 60% y en moldes el 70%. Este se destaca por su bajo tiempo de fraguado (inicia a los cinco minutos y termina a los quince

³² GUTIERREZ DE LOPEZ, Libia. El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción. En: ARANGO, Roberto ALONSO, Nelson, ed. Agregados. Manizales: Sede Manizales, 2003. pp. 117.

³³ *Ibíd.*, p. 118.

³⁴ *Ibíd.*, p. 118-119.

aproximadamente), por lo cual es recomendable hacer la mezcla a medida que se necesita³⁵.

1.2.3.5 Uso de los morteros. Según su utilidad, los morteros pueden llegar a utilizarse en labores o directamente en la construcción de elementos estructurales. No obstante, pueden encontrarse morteros con funciones no estructurales destinados como recubrimiento. Este por su parte, tiene como finalidad crear una superficie homogénea para la aplicación de pinturas si es deseado.

Los morteros de relleno, como su nombre lo indica, son destinados para ocupar los espacios vacíos de las celdas de mampostería estructural, para lograr el soporte de la estructura, estos morteros deben tener una adecuada y determinada resistencia.

En el caso de los morteros de pega, también son utilizados en mampostería a diferencia que estos deben poseer propiedades aglutinantes y cualidades especiales que permitan resistir esfuerzos de compresión y tensión³⁶.

³⁵ GUTIERREZ DE LOPEZ, Libia. El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción. En: ARANGO, Roberto ALONSO, Nelson, ed. Agregados. Manizales: Sede Manizales, 2003. pp. 115-116.

³⁶ *Ibíd.*, p 117-118.

2. CARACTERIZACION DE MATERIAS PRIMAS

En este capítulo se definen conceptual y teóricamente las materias primas utilizadas en cada uno de los métodos anteriormente descritos, los cuales, según estudios realizados previamente por entidades interesadas en el tema, indican que son posibles alternativas que pueden llegar a reducir el efecto corrosivo, brindando un aumento en su vida útil. Teniendo en cuenta esto, y debido a las limitaciones presentadas por la emergencia sanitaria Covid-19, este estudio será netamente teórico, es decir la caracterización de las materias primas está basada trabajos y ensayos realizados, los cuales serán descritos a continuación.

2.1 ÁNODOS DE SACRIFICIO

Teniendo en cuenta la tabla 1 de serie galvánica se describirán los materiales más anódicos que el acero, pues este, es generalmente el material más usado para la elaboración de tuberías.

2.1.1 Ánodo de magnesio. Este material es el más noble según la serie galvánica, por lo tanto, es el ánodo que presenta menor potencial electroquímico y conlleva a que presente un bajo rendimiento de corriente. No obstante, este material no es comúnmente utilizado debido a su alta capacidad de auto corrosión, además de que eleva en gran cantidad el potencial corrosivo de la estructura a proteger, es decir el desgaste es de forma exponencial³⁷.

Adicionalmente, este se considera un material como ánodo de sacrificio, ya que, por medio de pruebas de comportamiento en suelos de diferentes resistividades, demostrados en la literatura, se puede evidenciar que el magnesio tiene un buen funcionamiento en suelos con alta resistividad, arenosos, y por el contrario un bajo rendimiento en suelos de baja resistividad, ambientes marinos como se muestra en la tabla 2; este factor es utilizado para el posterior cálculo de resistividad del medio, y por ende el de intensidad del ánodo³⁸.

³⁷ GUIDICE, Carlos y PEREYRA, Andrea. Protección catódica con ánodos galvánicos [en línea]Universidad tecnológica Nacional. Facultad regional la plata, 27 p.

³⁸ *Ibíd.*, p. 28.

Tabla 2. Recomendación de ánodos de sacrificio según la resistividad del medio.

Material	Medio	Resistividad $\Omega \cdot \text{cm}$
Al	Agua	hasta 150
Zn		hasta 500
Mg (-1.5V)		mayor de 500
Zn con backfill	Suelo	hasta 1500
Mg (-1.5V) con backfill		hasta 4000
Mg (-1.7V) con backfill		4000-6000

Fuente: GUIDICE, Carlos y PEREYRA, Andrea. Protección catódica con ánodos galvánicos [en línea]Universidad tecnológica Nacional. Facultad regional la plata, 27 p.

2.1.2 Ánodo de Zinc. Este por su parte, es el ánodo predominante entre los otros ya mencionados, pues además de presentar un buen rendimiento, se conoce que fue el primer metal con el cual se experimentó la protección catódica. Es importante mencionar que este ánodo no resulta ser satisfactorio en todos los suelos. Por ejemplo, en aguas dulces puede llegar a tener cambios en su polaridad al sobrepasar los límites de temperatura, es decir, en vez de actuar como ánodo, este pasaría a actuar como cátodo al igual que el material que se quiere proteger, en este caso el acero. Por último, este ánodo al contrario que el de magnesio, no presenta altas resistividades, por lo cual puede llegar a implementarse en medios marítimos que sufran ataques corrosivos³⁹.

2.1.3 Ánodo de aluminio. El aluminio por su parte, es muy utilizado en la industria como ánodo de sacrificio y se puede llegar a considerar como el más idóneo en este tipo de protección, puesto que, tiene aplicaciones similares al ánodo de zinc, sin embargo, este presenta mejores comportamientos en aguas saladas. Estos ánodos entonces, se considera una mejor opción tanto económica como eficientemente hablando⁴⁰.

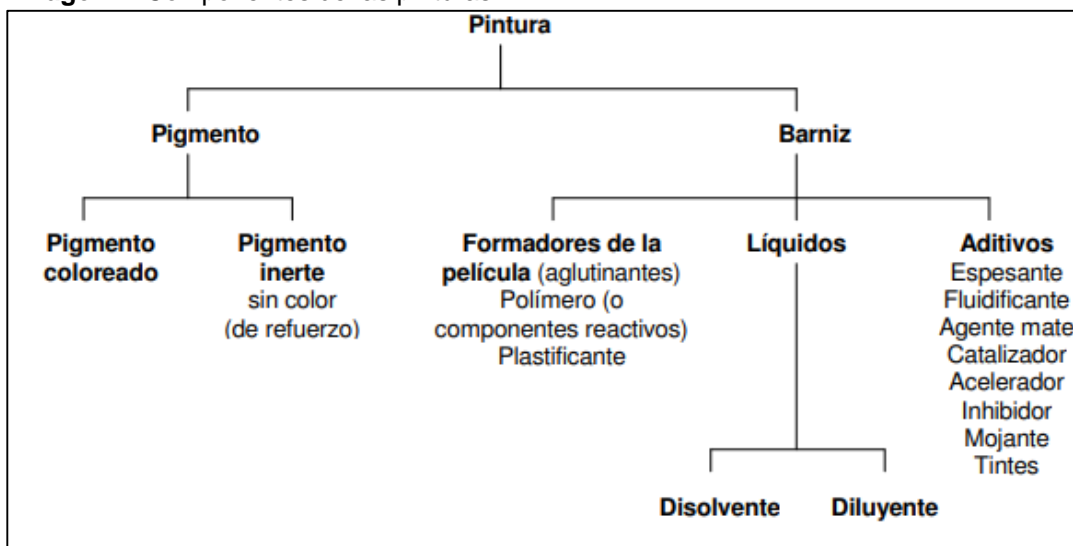
2.2 RECUBRIMIENTOS

2.2.1 Pinturas. Como se evidencia en la imagen 7, las pinturas dependen de diferentes componentes y factores que le permiten servir como recubrimientos para la inhibición de la corrosión. En este caso se explican tres tipos de pintura las cuales están diferenciadas según su componente anticorrosivo. Estos métodos beneficiarían la reducción de este ataque en estructuras tales como tuberías, y de la misma forma permitir un aumento en su vida útil.

³⁹GUIDICE, Carlos y PEREYRA, Andrea. Protección catódica con ánodos galvánicos [en línea]Universidad tecnológica Nacional. Facultad regional la plata, 27 p.

⁴⁰ Ibíd., p. 26.

Imagen 7. Componentes de las pinturas.



Fuente: GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 15 p.

En general, las pinturas se componen de vehículo fijo que en este caso viene siendo la resina, el pigmento que cumple la función de dar el color a la pintura y un vehículo volátil el cual se agrega dependiendo de las propiedades que se requieren para dicha pintura; es decir, si se requiere líquida o viscosa; por lo cual estas sustancias permiten que la pintura se “adelgace” según los requerimientos especificados para su utilización; generalmente el solvente más utilizado es el barniz o tiner⁴¹. Así mismo, este vehículo, es considerado como una solución líquida que forma el aglutinante, este cumple la función junto con el solvente de la creación de la película. La resina será el aglutinante, y esta será la encargada de la resistencia química en la pintura, y así lograr la adherencia de la película entre pintura y estructura.

Por otra parte, los pigmentos poseen diferentes funciones tales como la protección anticorrosiva, dar color, disminuir la permeabilidad, entre otros. Al igual que en los morteros, los aditivos son sustancias que son añadidas a la mezcla en pequeñas proporciones (0.01 a 10% en composición peso/peso) que modifican significativamente sus propiedades en beneficio a la finalidad. Es por esto que su clasificación es diversa, y dependerá directamente del propósito establecido⁴².

2.2.1.1 Pinturas epoxi. Como se hizo referencia anterior, las pinturas se componen de un material aglomerante y un endurecedor. En el caso de las pinturas epoxi el compuesto aglutinante se denomina resina epóxi y como endurecedor se pueden llegar a utilizar aminas, poliamidas, u otros. Este proceso de endurecimiento se

⁴¹ GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

⁴² GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 15-17 p.

denomina curado⁴³. No obstante, para la profunda caracterización de este tipo de pintura, se explican sus propiedades por medio del cuadro 2.

Cuadro 2. Composición pinturas epóxi.

PINTURAS EPÓXI	
Resina epóxi	Amina y Poliamida
<p>Monómeros termoestables compuestos por 2 o más grupos epóxi, los cuales reaccionan con hidrógenos activos para formar polímeros. Se establece su viscosidad dependiendo del peso molecular y su funcionalidad es muy diversa, ya que son utilizadas como adhesivos y refuerzos estructurales, aditivos en el proceso de fraguado de masillas y cementos, recubrimientos, entre otros.</p>	<p>La amina es un derivado del amoniaco o puede obtenerse por medio de la reducción de otros compuestos que contengan nitrógeno. Para lograr el eficaz proceso de curado se utilizan aminas terciarias. Por otro lado, las poliamidas, son polímeros que contienen el grupo amida y un grupo alifático, los cuales determinan su comportamiento. Pueden ser naturales (globulares y fibrilares) o sintéticas (nylon o polipéptidos) y estos difieren en su finalidad</p>

Fuente: Elaboración propia con base en BERMUDEZ, Martha. Estudio estructural de nylon N, 2/N, Y N, N+2 [en línea]Universidad Politécnica de Catalunya, 1998.

2.2.1.2 Pigmentos derivados de fosfatos. Los pigmentos a base de fosfato han ido evolucionando a través de la historia, ya que estos han sido el reemplazo de los cromatos, con la finalidad de erradicar este último por su alto impacto ambiental y toxicidad. Existen varios derivados de fosfato tales como trifosfato de aluminio, fosfato de magnesio, entre otros; esto se evidencia en el cuadro 3. Sin embargo, el fosfato con mayor utilidad actualmente han sido las variedades de fosfatos de zinc y sus aleaciones con metales como el hierro, aluminio y molibdeno.

Por otro lado, la superficie del acero según el medio de exposición, es pasivada por una capa fina de óxidos, y la actuación de los fosfatos en el pigmento es reparar la capa anteriormente mencionada por medio de una re-pasivacion. Debido a que los fosfatos no presentan valores altos en relación a la solubilidad, promueve el efecto anticorrosivo, y a diferencia de los cromatos evita el fenómeno de osmosis entre las capas y el ambiente. Adicionalmente, los fosfatos de zinc son altamente beneficiosos, pues estos presentan propiedades de barrera, al formar jabones de zinc derivados de hidroxifosfito de zinc⁴⁴.

⁴³ GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 21 p.

⁴⁴ GUIDICE, Carlos y PEREYRA, Andrea. Tecnología de pinturas y recubrimientos. Argentina: Editorial de la universidad tecnológica Nacional - Argentina, 2009. 155-156 p.

Cuadro 3. Pigmentos anticorrosivos.

Pigmentos anticorrosivos	Mecanismos de actuación
	EFEECTO BERRERA
	Aluminio en láminas Óxido de hierro micáceo
A base de ...	QUIMICO
FOSFATOS	Fosfato de cromo CrPO ₄ Fosfato de zinc Zn ₃ (PO ₄) ₂ Fosfato de zinc y aluminio Trifosfato de aluminio Fosfato de hierro y zinc Zn ₃ (PO ₄) ₂ + Fe ₃ (PO) ₄
	Ferritas
	Pigmentos de intercambio iónico
	Polvo de zinc

Fuente: Elaboración propia, con base en RODRIGUEZ, Teresa. Formulación y evaluación de imprimaciones epoxi anticorrosivas curables a temperatura ambiente [en línea] Universitat Jaume I, 2004.

2.2.2 Recubrimiento con mortero. Este efecto corrosivo, puede controlarse con diversos recubrimientos, sin embargo, en este caso, se describen recubrimientos con diferentes materias primas tales como cemento, yeso, cal, etc., que cumplen el factor determinante para suplir necesidades en relación al desgaste por parte de la corrosión u otras condiciones⁴⁵.

Así pues, el mortero se define como una mezcla plástica obtenida de un aglomerante, arena y agua, destinado para la unión de piedras, ladrillos o incluso como revestimiento de algún material que se desee proteger del medio externo agresivo que puede atentar por medio del desgaste.

Esta mezcla por su parte, se clasifica según su aglomerante, por lo que se tiene que estos se pueden ser morteros de yeso, de cal o de cemento. A su vez estos pueden ser catalogados como morteros bastardos, donde se encuentran mezclados dos aglomerantes, por ejemplo, cal y yeso, cemento y cal, u otras combinaciones.

Por último, se tiene que la mezcla entre el aglomerante y agua se designa como pasta, y esta logra una buena consistencia cuando la cantidad de agua es proporcional a los huecos del aglomerante suelto, en otro escenario, si esta es

⁴⁵ CALLE, Marco. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y EL TIPO DE CEMENTO EN LA CONTRACCIÓN POR SECADO DE MORTEROS ESTRUCTURALES [en línea]Universidad de Piura, 21018. 4 p.

menor tendrá una textura seca y con mayor fluidez, siendo un amasado lechada por su gran contenido de agua⁴⁶.

2.2.2.1 Agua. Esta sustancia cumple una función principal en la preparación de la mezcla del mortero, pues, es la encargada de hidratar el cemento permitiendo que la mezcla pueda manejarse fácilmente, por lo cual se requiere un porcentaje de agua respecto a la masa del cemento de aproximadamente 40%. No obstante, el porcentaje ideal de hidratación para la mezcla de mortero varía entre 25 y 30%⁴⁷, sin embargo, estos porcentajes no permiten un buen manejo del cemento, por lo cual el valor del porcentaje se incrementa.

Teniendo en cuenta lo anterior, el exceso de agua puede repercutir en propiedades fundamentales del mortero, como la resistencia a la compresión y durabilidad, debido a que el agua no destinada para la hidratación del cemento posteriormente se evapora, generando vacíos en la mezcla.

Por otro lado, el agua destinada para la mezcla de mortero según norma puede ser apta para el consumo humano o no, en ese caso, no es imprescindible que esta hubiera tenido que someterse a un tratamiento a priori; por lo cual, puede provenir de fuentes naturales, sin embargo debe tenerse en cuenta que los valores máximos de impurezas o materia en suspensión que pueda contener el agua establecidos en la tabla 3, pues, estas generan afectaciones en el tiempo de fraguado inicial del cemento y la resistencia del hormigón, tal como se evidencia en el cuadro 4⁴⁸.

Además, los iones que presentan el agua generalmente son calcio, sodio, potasio, magnesio, sulfato, nitrato, cloruro y en poca cantidad carbonato, los cuales deben estar presentes en valores que no superen las 2000 ppm, ya que generan retardos en el proceso de fraguado⁴⁹. Es muy importante resaltar que la presencia de cloruros ya sea del agua de la mezcla o de fuentes externas provocan daños, pues, al estar en contacto con otros metales generan efectos corrosivos, por lo cual, es recomendable no exceder este contenido de iones cloruro a un 0,5g/L⁵⁰.

⁴⁶ LOPEZ, Jesús. Resistencia de materiales. Tema 9: Morteros. [En línea]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. [En línea]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. [Consultado: marzo 3 de 2020]. Disponible en: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf

⁴⁷ RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca: 2015. 77 p

⁴⁸ *Ibíd.*, p. 77.

⁴⁹ *Ibíd.*, p. 78-79.

⁵⁰ *Ibíd.*, p. 78.

Tabla 3. Requisitos permitidos para el agua de mezcla.

Tipo de impureza	Valor máximo recomendado
Ácidos orgánicos (ácido sulfúrico)	10000 ppm
Aceite mineral (por masa de cemento)	2%
Agua con algas	no recomendable
Agua de mar:	
*para concreto no reforzado	35000 ppm
*para concreto reforzado o pretensado	no recomendable
Aguas sanitarias	20 ppm
Azúcar	500 ppm
Carbonato de calcio y magnesio	400 ppm
Carbonatos y bicarbonatos de Na y K	1000 ppm
Cloruro de calcio	30000 ppm
Cloruro de magnesio	40000 ppm
Cloruros:	
*estructuras con bajo potencial de corrosión y condiciones secas	20000 ppm
*concreto pretensado	500 ppm
*estruct. con elementos galvaniz. y de Al	1000 ppm
KOH (por masa de cemento)	1,20%
NaOH (por masa de cemento)	0,50%
Partículas en suspensión	2000 ppm
pH	6 a 8
Sales de hierro	40000 ppm
sales de Mg, Sn, Zn, Cu y Pb	500 ppm
Sulfato de magnesio	25000 ppm
Sulfato de sodio	1000 ppm
Sulfito de sodio	100 ppm

El contenido máximo de iones combinados de Mg, Na, K, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato y carbonato es 20000 ppm

Fuente: RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca: 2015. 79 p.

Finalmente, como requisitos generales se espera que este fluido cumpla con los parámetros establecidos según lo anteriormente mencionado, sin embargo, según Rivera⁵¹, es oportuno realizar una comparación y análisis entre el agua a utilizar y

⁵¹ LOPEZ, Jesús. Resistencia de materiales. Tema 9: Morteros. [En línea]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. [En línea]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. [Consultado: marzo 3 de 2020]. Disponible en: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf

el agua de referencia, es decir un comportamiento conocido; por ejemplo, el agua destilada.

En el caso de incumplir con alguno de los requisitos anteriormente expuestos, puede llegar a generar alteraciones o efectos negativos en la mezcla como se muestra en el cuadro 4, siendo la x un efecto negativo y --- lo que no causa efecto.

Cuadro 4. Efectos negativos en la mezcla de mortero por efecto de los valores permisibles.

Impurezas	Fraguado	Endurecimiento	Corrosión	Adherencia	Hidratación
pH	X	X	---	---	---
Sustancias solubles	X	X	X	X	---
Sulfatos	X	X	X	X	---
Cloruros	X	X	X	---	---

Fuente: RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca 2015. 80 p.

En secuencia, como lo especifica la norma NTC 118 y 220, el agua no tendrá alguna afectación significativa en los tiempos de fraguado y resistencia a la compresión siempre y cuando entre el agua analizada y la muestra de agua testigo no presente una diferencia mayor a 30 minutos y que la resistencia a la compresión promedio, evaluada a los cubos de agua a utilizar a edad de 7 y 28 días, deberá ser mayor o igual al 90% frente al agua testigo⁵².

2.2.2.2 Arena. Este material también cumple como función principal en la preparación de la mezcla de mortero la mitigación del agrietamiento por las contracciones al disminuir el agua de amasado. Esto se debe a que, al igual que el agua debe cumplir con especificaciones y además una proporción dependiendo del mortero que se quiera obtener. Esta por su parte, es obtenida por la desintegración natural y/o artificial por abrasión de las rocas y debido a su análisis granulométrico se considera como un agregado fino⁵³.

La tabla 4 muestra las diferentes dosificaciones y usos de mortero en Colombia⁵⁴.

⁵² RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca: 2015. 80 p.

⁵³ GUTIERREZ DE LOPEZ, Libia. El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción. En: ARANGO, Roberto ALONSO, Nelson, ed. Agregados. Manizales: Sede Manizales, 2003. pp. 9

⁵⁴ *Ibíd.*, p. 118.

Tabla 4. Uso de los morteros de cemento y dosificación cemento/arena.

DOSIFICACION MORTERO	CARACTERISTICAS	USOS
1:1	Gran resistencia y deben hacerse con arena limpia	Mortero muy rico para impermeabilizantes. Rellenos
1:2	Gran resistencia y deben hacerse con arena limpia	Para impermeabilizantes y pañetes de tanques subterráneos. Rellenos.
1:3	Gran resistencia y deben hacerse con arena limpia	Impermeabilizantes menores. Pisos.
1:4	Se deben hacer con arena limpia o semilavada.	Para pegar ladrillos en muros y baldosines. Pañetes finos.
1:5	Se deben hacer con arena limpia o semilavada.	Pañetes exteriores. Pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos
1:6 y 1:7	Baja resistencia. Se puede usar arena sucia.	Pañetes interiores. Pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos
1:8 y 1:9	Baja resistencia. Se puede usar arena sucia	Pegas para construcciones que se van a demoler pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones.

Fuente: GUTIERREZ DE LOPEZ, Libia. El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción. En: ARANGO, Roberto ALONSO, Nelson, ed. Agregados. Manizales: Sede Manizales, 2003. pp. 118.

2.2.2.3 Cemento. El cemento es un elemento con propiedades conglomerantes y/o adhesivas, que es formado por diferentes materiales como lo son la arcilla (cal, alúmina y sílice) en su mayoría, yeso, minerales de hierro y arena en una menor proporción y dependiendo la finalidad del mismo; algunos contienen aditivos⁵⁵. Es

⁵⁵ LEONE, Diego y GIORDANI, Claudio. CEMENTOS. [En línea]. Universidad tecnológica nacional. Facultad regional el Rosario. [Consultado: junio 12 2019]. Disponible en: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Cementos\(1\).pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Cementos(1).pdf)

importante resaltar que la granulometría del cemento puede llegar afectar propiedades como la resistencia a la compresión y la tracción en el cemento y por tanto en el mortero, por lo cual el proceso de triturado y tamizado se debe llevar a cabo hasta lograr la granulometría requerida o especificada⁵⁶.

Es relevante la aclaración del termino fraguado, pues, este hace referencia al tiempo en el cual la mezcla de cemento sufre un cambio de estado fluido a sólido rígido sin resistencia mecánica. Por otro lado, los factores que pueden llegar a perjudicar este tiempo son la temperatura del ambiente, la finura del cemento, relación agua/cemento y la inclusión de aditivos. El tiempo de este proceso está estimado entre 1 y 4 horas⁵⁷.

2.2.2.4 Cal. La cal puede ser obtenida por diferentes medios (natural o por reacción química), dependiendo de la parte del proceso, se denomina, cal aérea, viva o apagada. No obstante, durante este proyecto se utilizan cales naturales, las cuales no son cal en su totalidad, sino que contienen trazas de hierro, magnesio, álcalis, arcilla, entre otros.

Las cales naturales se dividen en tres tipos, grasas, hidráulicas y áridas. Las grasas son obtenidas por medio de la calcinación de la caliza primitiva con un porcentaje hasta el 5% de arcillas, que al estar apagadas ocupan un gran volumen, produciendo una pasta fina de color blanco. Adicionalmente, en ambientes húmedos, se disuelven fácilmente en el agua⁵⁸.

Por otro lado, la obtención de las cales áridas se lleva a cabo por medio del proceso de calcinación de caliza primitiva con un porcentaje menor al 5% de arcillas y 10% (o más) en proporción de magnesio. A diferencia de las grasas, tienen un color gris (como el cemento), que al secarse se vuelve polvo y al ponerse en contacto con el agua se disuelven. Debido a que las cales anteriores no presentan un endurecimiento en un tiempo definido y al contacto con el agua son disueltas, la cal más utilizada para la preparación es la hidráulica.

En el caso de las cales hidráulicas, se obtienen de la calcinación de caliza primitiva con un contenido de arcilla superior al 5%. Al apagarse, tiene las características de la cal grasa y, además, la propiedad de endurecerse y/o fraguarse en ambientes húmedos, secos o bajo el agua. Estas cales se constituyen de silicatos y aluminatos de calcio⁵⁹.

⁵⁶ CALLE, Marco. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA Y EL TIPO DE CEMENTO EN LA CONTRACCIÓN POR SECADO DE MORTEROS ESTRUCTURALES [en línea]Universidad de Piura, 21018. 20 p.

⁵⁷ CARVAJAL, Camila CORTES, Gabriela. Evaluación del uso de aditivos sobre la mezcla convencional de concreto en morteros de cemento ART para el aumento de su resistencia. [en línea]Universidad de América, 2019. 46 p.

⁵⁸ RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca: 2015. 14-15 p.

⁵⁹ *Ibíd.*, p 14-15.

2.2.2.5 Yeso. El yeso debido a sus propiedades, puede agregarse en pequeñas proporciones, pues disminuye la velocidad del fraguado del cemento. Además, se presenta de dos formas: anhidrita o algez (piedra de yeso).

La anhidrita en su forma pura es de color blanca o incolora, sin embargo, puede llegar a tomar colores dependiendo del mineral que contenga la arcilla que lo compone. Tiene una densidad aproximada de 2.46 g/cm^3 , absorbe el agua con gran facilidad, en estado puro está compuesto por SO_3 (58.82%) y CaO (4.18%) y cristaliza en el sistema rómbico⁶⁰.

Por otra parte, la piedra de yeso o algez cristaliza en el sistema mono cíclico, es incoloro o blanco en su mayoría, pero al igual que la anhidrita, puede tomar colores (amarillo, rojo, gris) según su contenido de arcilla o impurezas. Este tipo de yeso se puede dividir o clasificar según su nivel de hidratación o su estructura, son muy abundantes, pues por su forma de cristalización forman rocas muy comunes.

Para la finalización de este capítulo, se procede a definir su proceso de caracterización teniendo en cuenta los análisis que se deben realizar. Cabe aclarar, que esta caracterización en este caso es netamente conceptual, pues no se realiza ningún análisis experimental, por lo cual son bases que pueden ser empleadas por futuras investigaciones relacionadas con el tema de protección ante la corrosión.

2.3 PRUEBAS Y ENSAYOS

En este caso se desarrolla una descripción teórica de cada uno de los ensayos o pruebas requeridas en las alternativas propuestas anteriormente. Cabe aclarar que la caracterización de estos materiales dependiendo de las pruebas no fue realizada de forma experimental, sino que será netamente conceptual, basada en información obtenida de previos estudios realizados.

2.3.1 Especificaciones de los ánodos y el medio. Para lograr un adecuado funcionamiento como barrera protectora por parte de la protección catódica es importante tener en cuenta datos teóricos como capacidad de corriente [$A \cdot \text{Año}/\text{kg}$] y la geometría que se proponga⁶¹. Del mismo modo, no es correcto incluir otro tipo de barreras o pantallas aislantes entre el ánodo y la superficie a proteger, impregnar de agua el ánodo antes de ser enterrado, y no menos importante tener en cuenta sus factores económicos e ítems descritos en el cuadro 5, pues, son factores que deben ser considerados en el momento de la instalación de esta técnica⁶².

⁶⁰ RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca: 2015. p. 16-17

⁶¹ PEREZ, José, et al. Evaluación del desempeño de ánodos de sacrificio localizados y empleados en la rehabilitación de estructuras de concreto: Resultados preliminares. México: Sanfandila, 2017. pp. 12.

⁶² RAMIREZ, Carlos. Protección catódica contra la corrosión del gasoducto Lumbier-Beraian-Urroz [en línea]Escuela técnica superior de Ingenieros industriales y de telecomunicación, 2014. 119 p.

Cuadro 5. Pruebas y ensayos de protección catódica.

Resistividad del medio	Resistencia eléctrica	Potencial de disolución	Intensidad de corriente
Las condiciones de resistividad del electrolito. Representa la resistencia del suelo a cierta profundidad. Se estima por medio del método de Wenner.	Este valor se mide entre el ánodo y el extremo del cable, y no debe exceder los 0,01 ohm, con un paso de corriente de 10 A. Se utiliza un multímetro para realizar esta medida.	Debe polarizar la estructura, y este valor puede estar comprendido entre -0,95 y -1,7. La cual se obtiene a partir de la ecuación de Nerst y con ayuda de un voltímetro	Cantidad de carga eléctrica que pasa a través del conductor. Este valor se estima por medio de un amperímetro o galvanómetro. Por lo cual este valor es imprescindible para el cálculo total de número de ánodos.

Fuente: Elaboración propia con base en RAMIREZ, Carlos. Protección catódica contra la corrosión del gasoducto Lumbier - Beraiaín - Urroz [en línea] Escuela técnica superior de Ingenieros industriales y de telecomunicación, 2014. 119 p.

2.3.1.1. Limitaciones protección catódica con ánodos de sacrificio. Además, es importante resaltar las limitaciones de esta alternativa, pues son factores que pueden afectar notoriamente la implementación de esta técnica como lo son la limitación de la corriente suministrada, su bajo rendimiento en ambientes de alta resistividad, elevado costo de inversión y alto consumo de ánodos destinados para tuberías enterradas que no disponen de un buen revestimiento expuestas en ambientes marino⁶³.

2.3.2 Limpieza de superficie para recubrimiento. Este proceso es realizado en todas las superficies antes de la aplicación de la pintura como recubrimiento, con el fin de lograr una buena adherencia entre la pintura y la estructura. Esta limpieza, se rige bajo diferentes normas, sin embargo, las más utilizadas son las SSPC, las cuales se clasifican según el tipo de superficie y método de limpieza requerido.

En este caso, se recomienda realizar una previa limpieza con solventes (SP-1) la cual busca eliminar agentes en la superficie tales como manchas, grasa, aceite, y otras contaminaciones de la superficie del acero. Adicionalmente, esta limpieza puede ser complementada con otro método como el de chorro abrasivo (SP-10), el cual se basa en el uso de un abrasivo a altas presiones y velocidades, eliminando óxidos, restos de pinturas, laminación y cualquier material incrustante⁶⁴. Esta última técnica es usualmente las más utilizada, puesto que, reúne todas las características

⁶³ PEREZ, José, et al. Evaluación del desempeño de ánodos de sacrificio localizados y empleados en la rehabilitación de estructuras de concreto: Resultados preliminares. México: Sanfandilla, 2017. pp. 12-13.

⁶⁴ SIKA. Preparación de superficies metálicas. Colombia: Elaborado por Sika, 2015. pp. 5-8.

para una buena y rápida limpieza en condiciones expuestas tanto regulares como severas⁶⁵.

2.3.3 Ensayo del aspa. Para el análisis de la evaluación y comportamiento de probetas destinadas como recubrimiento con pintura se utilizó el ensayo del aspa. Este por su parte consiste inicialmente en someter la probeta a cortes longitudinales (generalmente en forma de x) para luego exponerla en un medio agresivo, con el fin de observar y analizar el comportamiento tanto del acero como de la pintura, pues según Girón, puede llegar a presentar un crecimiento en los cortes, o en algunos casos el desgaste de la misma pintura⁶⁶. Estas medidas se determinan por medio de una regla milimetrada la cual permite establecer el grado de desgaste en milímetros [mm] tal como se evidencia en la tabla 5, la cual se rige bajo la norma D-1654-79A⁶⁷.

Tabla 5. Número asignado según grado de corrosión por método del aspa.

Milímetros [mm]	Número asignado
0	10
0-0,5	9
0,5-1,0	8
1,0-2,0	7
2,0-3,0	6
3,0-5,0	5
5,0-7,0	4
7,0-10,0	3
10,0-13,0	2
13,0-16,0	1
>16	0

Fuente: PALACIOS, Mercedes. Características y ensayos de corrosión de pinturas modificadas con polímeros conductores [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 91 p.

Además, este método es comúnmente utilizado en la industria de las pinturas, en el cual también se evalúa la adhesión de la pintura en el aspa, por medio de un lavado de la probeta con agua destilada a 40°C, seguidamente de un secado, se raspan con una espátula vertical y perpendicularmente respecto a la superficie de la probeta⁶⁸.

⁶⁵ CYM Materiales -SA. Preparación de superficie - Norma SSPC. Argentina: CYM, 2015. pp. 5.

⁶⁶ GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 75 p.

⁶⁷ PALACIOS, Mercedes. Características y ensayos de corrosión de pinturas modificadas con polímeros conductores [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 91 p.

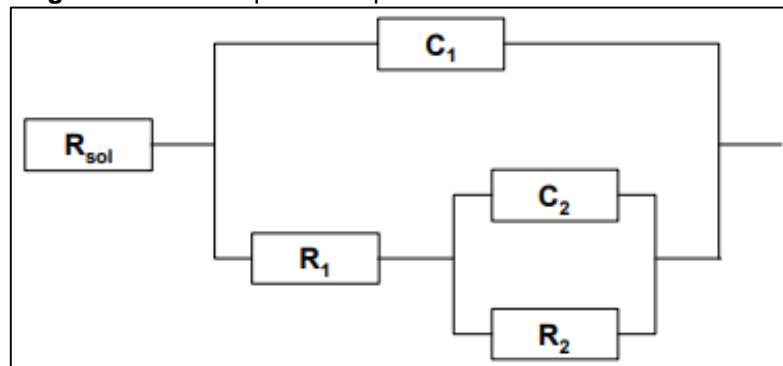
⁶⁸ *Ibíd.*, p. 91-92.

2.3.3.1 Limitaciones en prueba del aspa. En este caso, los factores que pueden alterar la obtención de los datos brindados por esta prueba, pueden llegar a ser errores manuales, como la desigual profundidad del corte de la probeta. Por otro lado, al carecer de maquinaria como microscopios para la lectura de estos datos en la probeta, se ejecuta una inspección visual la cual perjudica el análisis de la información obtenida por la carencia de detalles.

2.3.4 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Para este caso en específico, esta técnica según la información adquirida por los estudios analizados es utilizada para los revestimientos con pintura al igual que el recubrimiento con mortero. Así pues, se considera un método electroquímico para evaluar la corrosión en diferentes materiales, el cual está basado en la impresión de una señal de corriente alterna (potencial, E) a un electrodo, el cual permite determinar su corriente de salida como respuesta.

En relación a los estudios de corrosión, los datos son analizados mediante circuitos eléctricos, compuestos por inductancias, resistencias, y otros elementos; estos a su vez son denominados “circuitos eléctricos equivalentes”⁶⁹, mostrado en la imagen 8, pues son considerados configuraciones que describen los espectros de impedancia obtenidos en metales con recubrimientos⁷⁰.

Imagen 8. Circuito equivalente para metales con recubrimiento.



Fuente: MENDOZA, Juan; DURAN, Rubén y GENESCA, Joan. Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión. México: 2012. pp. 26.

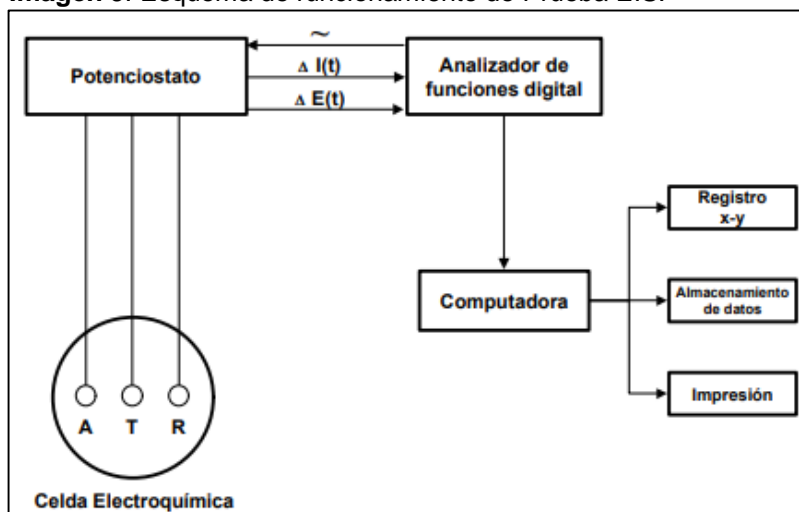
Por lo anterior es necesario la disposición de diferentes equipos como un generador o analizador de funciones, el cual se encarga de aplicar o analizar señales en diferentes frecuencias a un potenciostato de alta sensibilidad, con el fin de que este, aplique la señal anteriormente recibida al electrodo de la celda. Posteriormente el mismo analizador recibe la respuesta del potenciostato en corriente, para determinar diferentes datos a cada frecuencia. Por último, estos datos son almacenados en una computadora, la cual se encarga del almacenamiento de

⁶⁹ MENDOZA, Juan; DURAN, Rubén y GENESCA, Joan. Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión. México: 2012. pp. 3

⁷⁰ *Ibíd.*, p. 26.

datos, para su seguido análisis según se requiera⁷¹. Este procedimiento es evidenciado en la imagen 9.

Imagen 9. Esquema de funcionamiento de Prueba EIS.



Fuente: MENDOZA, Juan; DURAN, Rubén y GENESCA, Joan. Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión. México: 2012. pp. 30.

2.3.4.1 Limitaciones en la prueba EIS. Estas limitaciones están directamente relacionadas en principio con los factores de corrosión en la interface, pues estos afectan la elección del adecuado circuito eléctrico que se adapte al fenómeno físico que ocurre en la superficie. Además, otra de las limitaciones está relacionada con la baja reproductibilidad de los datos de las medidas, y esto se debe a la heterogeneidad de la película que actúa como recubrimiento. Por otro lado, esta prueba no puede utilizarse cuando existen varios recubrimientos, pues esta no los distingue. Por último, los costos económicos en referencia a los equipos electroquímicos son de alto valor para la obtención de datos⁷².

Por otro lado, es importante resaltar las pruebas y ensayos que se deben realizar a las materias primas empleadas en cada una de las alternativas; para ello se define conceptualmente el procedimiento a llevar a cabo para el análisis de las pinturas antes de su aplicación, como el del recubrimiento con mortero para su posterior implementación en tuberías.

2.3.5 Pruebas y análisis para las pinturas. Es importante tener en cuenta las pruebas realizadas a los materiales que se disponen como recubrimiento. En este caso para las pinturas se encuentra que propiedades tales como viscosidad, espesor de película húmeda y espesor de película seca se consideran pruebas que

⁷¹ MENDOZA, Juan; DURAN, Rubén y GENESCA, Joan. Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión. México: 2012. pp. 30.

⁷² GUZMAN, Andrés. Evaluación de la resistencia a la corrosión de sistemas de recubrimientos con altos sólidos por medio de espectroscopia de impedancia electro química [en línea]Universidad Nacional de Colombia, 2011. 6 p.

abarcan aspectos físicos y químicos; y para el caso de aspectos mecánicos, se tiene la adherencia y porosidad de la pintura. Estos ensayos por su parte, son importantes a tener en cuenta, pues son factores que afectan significativamente la funcionalidad de la pintura y para este caso en específico, el de brindar recubrimiento que actúe como barrera protectora entre la superficie, es decir la tubería y el medio donde se encuentra expuesta.

Por otro lado, según análisis y experimentaciones realizados por otros estudios, se establece que los equipos requeridos para los ensayos son sencillos y los resultados son muy claros, además y no menos importante, que los datos pueden ser obtenidos con base a patrones de comparación o incluso por apreciación⁷³.

Finalmente, según el aporte por el estudio de Laforgia hecho en Ecuador, estas pruebas se estandarizan bajo las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) y por el Estándar Federal del Método de Prueba (FTMS), las cuales se establecen en el cuadro 6 según la prueba a analizar⁷⁴.

Cuadro 6. Pruebas control de calidad de la pintura.

Propiedad	Federal Standard 141	ASTM
Adherencia	6303,1	D 2197
Viscosidad Brookfield	-----	D2196*
Viscosidad Stormer	-----	D 562
Densidad: Peso/Galón	4184,1	D 1475*
Tiempo de secado	4061,1	D 1640
Contenido de pigmentos	4021,1	D 2698
Contenido de agua	4081	-----
Corrosión Acelerada	6151	D 822
*Test de norma ASTM similar pero no idéntico al método del FTMS.		

Fuente: Elaboración propia con base en LAFORGIA, Juan. Control de procedimiento de pintado de tanques de almacenamiento de combustible. Capítulo 2. [en línea]Escuela superior politécnica del Litoral, 1998. 23 p.

⁷³ LAFORGIA, Juan. Control de procedimiento de pintado de tanques de almacenamiento de combustible. Capítulo 2. [en línea]Escuela superior politécnica del Litoral, 1998. 23 p.

⁷⁴ *Ibíd.*, p. 21-23.

2.3.6 Pruebas y análisis para mortero.

2.3.6.1 Granulometría de la arena. En este caso, se debe tener el previo análisis de granulometría, pues es de gran importancia dentro de las pruebas que se deben realizar para la materia prima que constituye el mortero; así pues, se establece que está directamente ligado a la densidad de la mezcla, ya que, a mayor tamaño de grano, mayor densidad y, por ende, menor manejabilidad; para ello, se recomienda que entre dos mallas seguidas no haya una retención de masa superior al 45% para considerar una mezcla manejable y con mejor adherencia, además para que presente un buen acabado, un porcentaje superior a 15% debe pasar por la malla No. 50, y por la malla No. 100 un porcentaje superior al 4%⁷⁵.

Este análisis se basa en dividir una muestra representativa y aleatoria de arena y someterla a una serie de tamices regidos por la norma NTC 32. Por otro lado, la norma NTC 77 rige el tamaño de la muestra y el procedimiento necesario para el análisis granulométrico. Adicionalmente, existen dos normas en específico que determinan la granulometría de agregados tanto finos como gruesos, las cuales muestran detalladamente cada uno de estos agregados, estas son la NTC 174 y NTC 2240, para concretos y morteros, respectivamente. No obstante, su tamaño de partícula varía entre 0,74 y 4,76 mm, pasando por la malla #4 y siendo retenida en la #200⁷⁶.

2.3.6.2 Propiedades Cemento Portland. El cemento es una de las materias primas principales para la elaboración de la mezcla de mortero o concreto, por lo cual es importante su caracterización, sin embargo, debido a la gran diversidad de cementos, este trabajo según requerimientos de la empresa Tubos SDI tendrá en cuenta únicamente las propiedades más relevantes del cemento Portland tipo ART, tabla 6, pues este es utilizado para el recubrimiento como protección frente al efecto corrosivo.

Tabla 6. Características generales Cemento Portland.

Cemento Portland		
Composición		Densidad
Óxido	Contenido %	
CaO	60 a 67	
SiO ₂	17 a 25	
Al ₂ O ₃	3 a 8	2,9 a 3,2 g/cm ³ .
Fe ₂ O ₃	0,6 a 6,0	
MgO	0,1 a 4,0	
Álcalis	0,2 a 1,3	Frasco Le Chatelier
SO ₃	11 a 3	NTC 221

Fuente: Elaboración propia con base en RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca: 2015. p. 56-58.

⁷⁵ RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca: 2015. p. 56-58.

⁷⁶ *Ibíd.*, p. 56-61.

2.4 DIAGNOSTICO DE LA CARACTERIZACION

Finalmente, al estudiar y analizar conceptualmente las materias primas se logró caracterizar cada una de ellas, teniendo en cuenta las pruebas y ensayos relevantes que intervienen en la obtención de los resultados finales, pues al no realizarlos adecuadamente pueden llegar afectar el comportamiento del método a implementar. Posteriormente, con base a la información obtenida, se procede a realizar un análisis con el fin de evaluar y escoger la mejor alternativa que brinde beneficios técnicos y económicos a empresas que lo deseen ejecutar.

3. ANÁLISIS PARA LA COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

En el siguiente capítulo se realiza una evaluación entre las diferentes alternativas previamente escogidas, para ello y por medio de la información obtenida de diferentes estudios relacionados a la mitigación del efecto corrosivo, se establece una comparación con el fin de elegir la más alternativa apropiada tanto técnica como económicamente hablando, y así, poder ofrecer un beneficio útil.

3.1 DISEÑO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

Para la implementación de esta técnica es importante tener en cuenta parámetros de diseño los cuales permitan lograr su correcto funcionamiento, por ello, se describen detalladamente a continuación estos factores.

Cabe resaltar, que para el efectivo desarrollo del diseño del ánodo, se debe tener en cuenta el cálculo de la resistencia y corriente de salida, así como el número de ánodos empleados en dicho método⁷⁷. Por su parte, para el buen desempeño de los ánodos es de gran importancia tener en cuenta el cumplimiento de ciertos requerimientos, como su peso, material, forma geométrica, entre otros⁷⁸.

En el caso, el número de ánodos junto con su duración, se considera un criterio crucial en el momento de la implementación de este método como mitigación del efecto corrosivo, además de la intensidad de corriente, que es un parámetro relevante en la vida útil del ánodo, y será directamente proporcional a su geometría y densidad de corriente⁷⁹.

El número de ánodos destinados para la protección en diferentes estructuras está dado por la ecuación 1.

Ecuación 1. Número de ánodos.

$$N = \frac{I_t}{I_a}$$

Fuente: FRANCIA, Samuel. Protección catódica - Diseño de ánodos de sacrificio. Revista del instituto de investigación FIGMMG. 2004, vol. 7, nro. 13. pp. 39 – 40.

⁷⁷ FRANCIA, Samuel. Protección catódica - Diseño de ánodos de sacrificio. Revista del instituto de investigación FIGMMG. 2004, vol. 7, nro. 13. pp. 39 – 40.

⁷⁸ *Ibíd.*, p. 37

⁷⁹ *Ibíd.*, p.1

Donde, N hace referencia al número de ánodos, I_t a la intensidad de corriente total [mA] y, por último, I_a la intensidad de corriente del ánodo [mA]⁸⁰. Posteriormente, se describirán cada uno de los términos de la ecuación 1, la cual desglosara en las ecuaciones 2 y ecuación 3.

Ecuación 2. Intensidad de corriente.

$$I_t = d \cdot A$$

Fuente: FRANCIA, Samuel. Protección catódica. Diseño de ánodos de sacrificio. Revista del instituto de investigación FIGMMG. 2004, vol. 7, no. 13. pp. 41.

Donde, d es la densidad de corriente [mA/m²], valores que se muestran en la tabla 7 y A es el área [m²] que se desea proteger de cualquier estructura⁸¹.

Tabla 7. Densidad de corriente para las tuberías.

Estructuras	Medio agresivo	Características específicas	Densidad de corriente (mA*m⁻²)
		Zona hincada	10 a 30
	Agua de mar	Zona sumergida	50 a 80
	Agua de mar	Acero desnudo	50 a 100
		Acero revestido	0,2
Tuberías	Agua	Estancada	50
		En movimiento	50 a 150
		Suelo muy húmedo	30 a 70
	Terrenos	Suelo muy ácido	50 a 170
		Acero pintado	0,1 a 0,2

Fuente: Elaboración propia con base en HERNANDEZ, Angélica. Evaluación del desempeño de ánodos galvánicos Zn-22Al con 2, 4, 6% en peso de Ag para protección catódica [en línea]Universidad autónoma de San Luis Potosí, 2008. 18 p.

⁸⁰ FRANCIA, Samuel. Protección catódica - Diseño de ánodos de sacrificio. Revista del instituto de investigación FIGMMG. 2004, vol. 7, nro. 13. pp. 41.

⁸¹ *Ibíd.*, p. 41.

Por otro lado, la intensidad de corriente (I_a) del ánodo está definida de la siguiente forma⁸².

Ecuación 3. Intensidad de corriente del ánodo.

$$I_a = \frac{\Delta E}{R}$$

Fuente: TERRAZAS, Miriam. Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor [en línea]Centro de investigación en materiales avanzados, 2021. 40 p.

Donde, ΔE es la diferencia entre el potencial de protección del acero y R hace referencia a la resistencia del ánodo⁸³, parámetro que puede calcularse por medio de la ecuación 4.

Ecuación 4. Resistencia del ánodo para geometrías desconocidas.

$$R = \frac{0,315 * p}{\sqrt{A}}$$

Fuente: TERRAZAS, Miriam. Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor [en línea]Centro de investigación en materiales avanzados, 2021. 41 p.

Esta ecuación permite calcular la resistencia del ánodo a partir de p , que hace referencia a la resistividad del medio [$\Omega \cdot \text{cm}$], valores atribuidos en la tabla 2, y A , valor atribuido al área del ánodo⁸⁴, la cual según Hernández⁸⁵, es 20 veces menor que el área expuesta total de la tubería.

⁸² TERRAZAS, Miriam. Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor [en línea]Centro de investigación en materiales avanzados, 2021. 40 p.

⁸³ *Ibíd.*, p. 46.

⁸⁴ FRANCIA, Samuel. Protección catódica - Diseño de ánodos de sacrificio. *Revista del instituto de investigación FIGMMG*. 2004, vol. 7, nro. 13. pp. 40

⁸⁵ HERNANDEZ, Angélica. Evaluación del desempeño de ánodos galvánicos Zn-22Al con 2, 4, 6% en peso de Ag para protección catódica [en línea]Universidad autónoma de San Luis Potosí, 2008. 29 p.

Tabla 8. Resistividad en función de la temperatura y clorinidad.

Clorinidad p.p.m	Temperatura °C					
	0	5	10	15	20	25
19	35,1	30,4	26,7	23,7	21,3	19,2
19,5	34,3	29,7	26,1	23,2	20,8	18,75
20	33,5	29	25,5	22,7	20,3	18,3

Fuente. Elaboración propia con base en FRANCIA, Samuel. Protección catódica - Diseño de ánodos de sacrificio. *Revista del instituto de investigación FIGMMG*. 2004, vol. 7, nro. 13. pp. 40

3.1.1 Vida útil. El tiempo de vida del ánodo, ecuación 5 puede llegar a ser el factor más determinante para este tipo de protección, pues es aquel va a establecer la efectividad del método a largo plazo, y está determinado por una secuencia de parámetros de la siguiente forma.

Ecuación 5. Vida útil del ánodo.

$$L = \frac{MU}{IV}$$

Fuente: TERRAZAS, Miriam. Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor [en línea]Centro de investigación en materiales avanzados, 2021. 42 p.

Donde, L se identifica como la vida útil del ánodo en años; M como la masa de un ánodo [kg], U como el factor de utilización, I la corriente de salida [A] y por último, V como la velocidad de consumo del ánodo [kg/A⁻¹*año⁻¹]⁸⁶.

Por otro lado, el factor de utilización puede variar entre 0,7 – 0,8; valor que hace referencia al desgaste del ánodo, y según Hernández cuando este, alcanza un valor del 85% debe ser sustituido, pues, el material remanente del mismo no puede suministrar la corriente requerida, plasmado para cada uno de los materiales en la tabla 9⁸⁷.

⁸⁶ HERNANDEZ, Angélica. Evaluación del desempeño de ánodos galvánicos Zn-22Al con 2, 4, 6% en peso de Ag para protección catódica [en línea]Universidad autónoma de San Luis Potosí, 2008. 16 p.

⁸⁷ *Ibíd.*, p. 16.

Tabla 9. Valores para el cálculo vida de los ánodos.

Metal anódico	Capacidad corriente teórica (A*Año/kg)	Rendimiento %	Factor Utilización %
Zinc (Zn)	0,094	90	85
Aluminio (Al)	0,34	90	85
Magnesio (Mg)	0,251	50	85

Fuente: GUIDICE, Carlos y PEREYRA, Andrea. Protección catódica con ánodos galvánicos [en línea]Universidad tecnológica Nacional. Facultad regional la plata, 12 p.

3.1.2 Sistema de protección catódica. Según Martínez y Ruano, la implementación de la protección catódica llegar a aumentar la vida útil de la tubería de 15 a 20 años buscando consigo que sea una alternativa económica y efectiva frente a otras técnicas como pueden llegar a ser, el revestimiento o implementación de materiales más resistentes a este fenómeno corrosivo⁸⁸, debido a que entre los años 1999 a 2001, Colombia ha indagado sobre posibles soluciones que permitan reducir la pérdida por corrosión en diferentes industrias, puesto que este costo anualmente representa el 3% del PIB, valores que impactan en el ámbito económico y de producción⁸⁹.

Por otra parte, se tiene que esta protección permite suplir las necesidades relacionadas con la sostenibilidad ambiental, puesto que se llega a obtener productos tales como el agua de mejor calidad. En este caso, al no tener un recubrimiento como la pintura, se discriminan residuos de esta en el interior y exterior que no afecta el medio donde se encuentra.

Teniendo en cuenta la implementación de este método, se deben tener en cuenta criterios que permitan un control de la misma, por lo cual, el más frecuente es la medición de voltaje entre el material metálico y el suelo, esta medición se realiza entre la estructura y una celda de referencia o electrodo que se encuentra ubicada justamente sobre la tubería o tanque (generalmente este electrodo de referencia es cobre-sulfato de cobre)⁹⁰.

Finalmente, según el estudio realizado por la universidad Piloto de Colombia, indica que esta técnica reduce el 60% del uso de material en producción, debido a que mitiga notablemente la posibilidad de derrames por factores de desgaste y consigo el paro en la producción que traen consigo altas pérdidas económicas. Además, este estudio indica que, al no ejecutar esta alternativa en dicha estructura, puede obtener una vida útil de seis años aproximadamente, causando pérdidas

⁸⁸ MARTINEZ, Jaime y RUANO, José. Implementación del sistema de protección catódica para el fondo de los tanques de la ampliación en la refinera de Barrancabermeja. Bogotá: 2014. pp. 50.

⁸⁹ *Ibíd.*, p. 12-13.

⁹⁰ *Ibíd.*, p. 29.

económicas que conllevan a su vez, problemáticas ambientales por derrames y desgaste del suelo por parte de probables explosiones⁹¹.

3.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE PROTECCIÓN CON PINTURAS EPÓXI

Este tipo de recubrimiento se basa en la aplicación de la pintura en el acero al desnudo, con el fin de evitar la penetración de diferentes iones que puedan llegar a causar desgastes en la estructura de acero. Cabe resaltar, que, para el estudio realizado por Palacios, se emplean probetas, a las cuales se les realizan sus respectivos análisis en laboratorios. Previamente a la aplicación de la pintura, el material se debe desengrasar con acetona y posteriormente dejar secar hasta su utilización; por otro lado, su aplicación se realiza por inmersión implementando dos capas de pintura en la probeta para garantizar un total cubrimiento en la superficie. Estas probetas, son expuestas a un medio salino semejante al agua del mar, con una concentración de 3,5 de cloruro de sodio y un pH de 6,6, las cuales se analizan por medio sal ensayo del aspa⁹².

La imagen 10 hace referencia a los resultados obtenidos por inspección visual a las probetas de acero pintadas previamente con pintura epoxi a los cinco, diez, veinte y treinta días respectivamente de izquierda a derecha. Adicionalmente, se realiza un registro a nivel microscópico a las mismas probetas obteniendo los siguientes resultados en los tiempos ya mencionados⁹³.

Imagen 10. Resultados del ensayo aspa en probetas de acero cubiertas con pintura epoxi.



Fuente: PALACIOS, Mercedes. Características y ensayos de corrosión de pinturas modificadas con polímeros conductores [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 84 p.

Por otro lado, según el estudio y comparación realizado por la escuela técnica superior de ingeniería en Barcelona entre la pintura epoxi y otras, se concluye que las probetas recubiertas con pintura epoxi no presentan un buen comportamiento en relación a las otras pinturas o modificaciones de la misma, pues en un corto

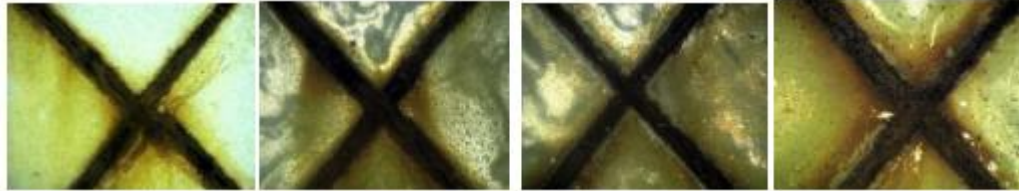
⁹¹ MARTINEZ, Jaime y RUANO, José. Implementación del sistema de protección catódica para el fondo de los tanques de la ampliación en la refinería de Barrancabermeja. Bogotá: 2014. pp. 50.

⁹² PALACIOS, Mercedes. Características y ensayos de corrosión de pinturas modificadas con polímeros conductores [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 80-81 p.

⁹³ *Ibíd.*, p. 88.

periodo de tiempo se observa un alto nivel de corrosión en el área analizada tendiendo a la formación de huecos en la estructura, como se evidencia en la imagen 11⁹⁴.

Imagen 11. Resultados con microscopio óptico Olympus BX-51 para probetas de acero recubiertas con pintura epoxi.



Fuente: GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. p 81.

Además, con base a las especificaciones de la pintura epóxi poliamida, se considera que este revestimiento está diseñado como protección de superficies metálicas tales como tanques, tuberías, puentes o demás estructuras. Adicionalmente, puede llegar a utilizarse en madera, concreto y demás materiales como recubrimiento. A nivel, de composición este cuenta con dos componentes, uno de ellos es la pintura epóxi y el otro que actúa como catalizador. Por otro lado, el rendimiento de estas pinturas en cuanto al área cubierta por volumen oscila entre los 20 y 25 m² por galón, y a su vez se puede establecer que su vida útil aproximada en la estructura a recubrir es de 15 años⁹⁵.

3.3 MECANISMO DE ACCIÓN DE LOS PIGMENTOS ANTICORROSIVOS

La incorporación de pigmentos a lo largo de la historia ha ido en avance en la industria, pues se considera un proceso innovador y eficiente, dado que estos compuestos pueden presentar una actuación doble, es decir, pueden ejercer un efecto de barrera reteniendo los iones agresivos del ambiente tales como cloruros, sulfuros y otros presentes en el medio que son capaces de perforar el recubrimiento hasta el metal causando daños por corrosión; además, pueden liberar iones de carácter anticorrosivo los cuales mitigan el proceso de corrosión en la superficie metálica, sin dejar de lado el brindar color a la pintura⁹⁶.

En relación a la influencia del efecto de concentración en volumen de pigmento (PVC), realizado por la Universidad de la Plata, imagen 12, sobre las propiedades del recubrimiento, se tiene que al presentar un aumento de este factor, el ampollamiento tiende a disminuir cuando la película de la pintura entra en contacto

⁹⁴ PALACIOS, Mercedes. Características y ensayos de corrosión de pinturas modificadas con polímeros conductores [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 84 p.

⁹⁵ Sistema de pintado y protección del acero. [En línea]. Sistemas de pintado. [Consultado: Julio 20 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn103.html>

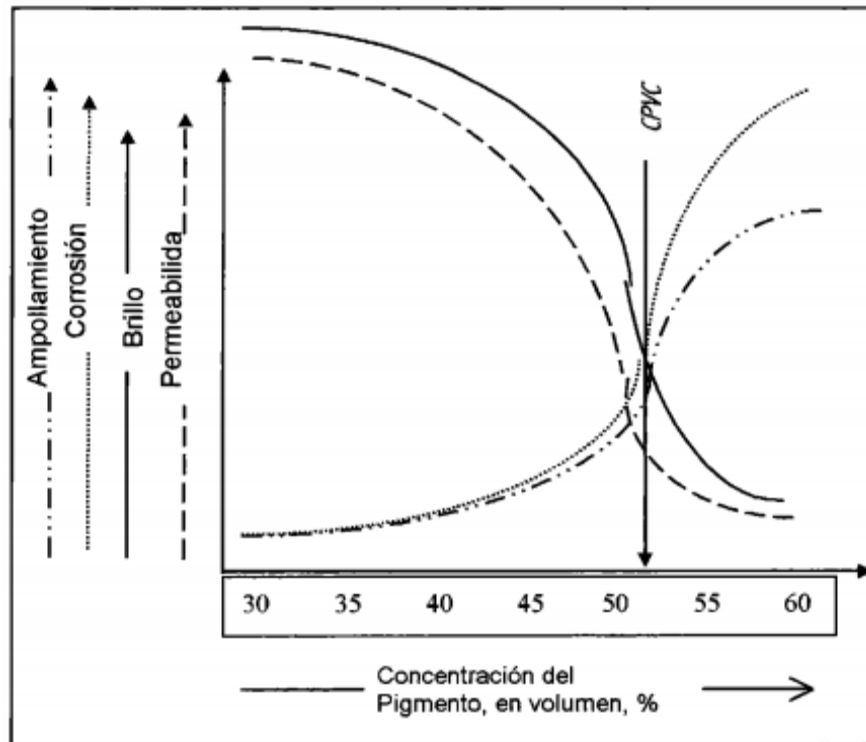
⁹⁶ Mecanismos de protección anticorrosiva del aluminio mediante recubrimientos de pintura formuladas con pigmentos de intercambio iónico. [en línea]Universidad Complutense de Madrid, 2011. 14 p.

con el electrolito, provocando que el brillo se reduzca, pero se vea favorecida la adhesión entre las capas⁹⁷.

Teniendo en cuenta la imagen 12, se evidencia un valor crítico de PVC denominado como la concentración crítica de pigmento en volumen (CPVC), el cual establece que aumentar el contenido de pigmento no se observan efectos drásticos en la protección anticorrosiva; así mismo, incrementa la permeabilidad del recubrimiento, pero disminuye su poder protector.

En este caso, el CPVC presenta un valor del 43% donde las curvas de permeabilidad, corrosión, ampollamiento y brillo tienen un cambio perceptible en su pendiente que depende de la combinación pigmento/ligante. Cabe aclarar que, según los resultados obtenidos por este estudio, en este punto específico, los huecos entre las partículas de pigmentos se encuentran ocupados en su totalidad por el ligante⁹⁸.

Imagen 12. Propiedades de la pintura en función del PVC.



Fuente: CABELLO, Gabriela. Desarrollo de pinturas anticorrosivas de bajo impacto ambiental. [en línea]Universidad Nacional de la Plata, 1998. 11 p.

De la misma manera, se tiene que con base a esta concentración crítica las propiedades por encima de esta sufren cambios drásticos, debido a la existencia de

⁹⁷ CABELLO, Gabriela. Desarrollo de pinturas anticorrosivas de bajo impacto ambiental. [en línea]Universidad Nacional de la Plata, 1998. 10-11 p.

⁹⁸ *Ibíd.*, p. 11-12.

huecos que el ligante no puede rellenar. Es por esto, que es importante resaltar la relación entre PVC y CPVC, pues a partir de esta razón, se pueden inferir varias propiedades de la protección. Como, por ejemplo, cuando esta razón es mayor a uno (1), las propiedades físicas y cohesión son reducidas; cuando esta razón es igual a uno (1), no se observa brillo en la pintura y el ligante es suficiente para cubrir todos los vacíos; y, por último, cuando esta razón es menor a uno (1), se tiene que la película presenta alto brillo y es permeable. Cabe aclarar que cada sistema presenta un valor óptimo, sin embargo, el valor más común de esta relación es 0,8 a 0,9 frente a la resistencia a la corrosión⁹⁹.

3.3.1 Comportamiento de pigmentos a base de fosfato en pinturas. Tomando como base el estudio realizado por Del Amo, se logró evidenciar una comparación significativa entre diferentes pigmentos anticorrosivos utilizados en pinturas. En este estudio se utilizó el fosfato de zinc (1), fosfato de zinc y hierro (2), fosfato de zinc y aluminio (3), fosfato de zinc molibdeno (4) y fosfato de zinc básico (5); cada uno con un valor del 5,8% del total de partículas sólidas presentes en la pintura, relacionados con los pigmentos anticorrosivos adicionados¹⁰⁰.

Para aumentar la absorción, se adiciono agua al endurecedor debido a su alto valor de viscosidad y posteriormente fueron agregados los pigmentos. Este pigmento fue añadido directamente al endurecedor mas no a la resina, con el fin de mejorar la propiedad anteriormente mencionada. Por otro lado, el test utilizado fue espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), en una solución de electrolito NaCl al 3%. Los resultados obtenidos, indican un buen comportamiento de las pinturas y los cambios significativos fueron observados aproximadamente después de 10 meses posterior a su aplicación¹⁰¹.

Los resultados de este estudio se plasman en la tabla 10, donde se evidencia el comportamiento de cada una de las pinturas a los 83 días (2000 horas) y 175 días (4200 horas), obteniendo que todos los pigmentos añadidos muestran un buen desempeño, sin embargo, las pinturas que se destacaron fueron las pinturas 2, 3 y 4. Además, para este experimento se llevó a cabo un pelado del revestimiento para observar la superficie del acero y su desgaste a lo largo del tiempo, el cual fue menor del 0,1% (puntaje 8 en tabla 10), indicando bajos niveles de corrosión durante el tiempo de análisis; este test, se realiza con el fin de representar la exposición del acero en ambientes marinos¹⁰².

⁹⁹ CABELLO, Gabriela. Desarrollo de pinturas anticorrosivas de bajo impacto ambiental. [en línea]Universidad Nacional de la Plata, 1998. 13 p

¹⁰⁰ DEL AMO, B., et al. High performance water-based paints with non-toxic anticorrosive pigments. Progress in Organic Coatings. 2002, vol. 45, nro. 4. pp. 390.

¹⁰¹ Ibid., p. 390.

¹⁰² Ibid., p. 391.

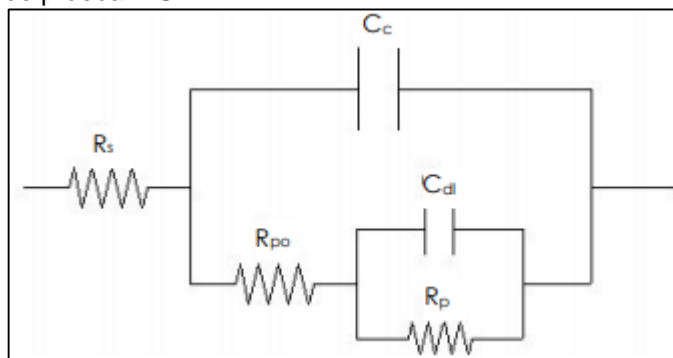
Tabla 10. Grado de corrosión del acero en pinturas expuestas en cámara de niebla salina.

Pinturas	2000 Horas	4000 Horas	Debajo de pintura
1	8	8	8
2	9	9	8
3	10	9	8
4	10	9	8
5	10	8	8

Fuente: Elaboración propia con base en DEL AMO, B., et al. High performance water-based paints with non-toxic anticorrosive pigments. Progress in Organic Coatings. 2002, vol. 45, nro. 4. pp. 391.

Por otro lado, los resultados de la prueba EIS según el circuito equivalente mostrado en la imagen 13, rectifica lo anteriormente mencionado, pues en relación a la resistencia iónica y capacitancia, las pinturas 2 y 4 presentan los mejores comportamientos anticorrosivos, según los parámetros resistencia al poro, R_{po} y capacidad del recubrimiento, C_c ¹⁰³.

Imagen 13. Modelo de circuito para análisis de resultados de prueba EIS.



Fuente: RODIRGUEZ, Teresa. Formulación y evaluación de imprimaciones epoxi anticorrosivas curables a temperatura ambiente [en línea] Universitat Jaume I, 2004. p. 114.

Teniendo en cuenta la imagen anterior, se tiene que este circuito es una herramienta para la medición de resultados del recubrimiento en la prueba EIS, donde R_s hace referencia a la resistencia asociada al electrolito¹⁰⁴. Por su parte, este comportamiento es eléctricamente equivalente a C_c , capacidad del recubrimiento y

¹⁰³ DEL AMO, B., et al. High performance water-based paints with non-toxic anticorrosive pigments. Progress in Organic Coatings. 2002, vol. 45, nro. 4. pp. 395.

¹⁰⁴ GUZMAN, Andrés. Evaluación de la resistencia a la corrosión de sistemas de recubrimientos con altos sólidos por medio de espectroscopia de impedancia electro química [en línea] Universidad Nacional de Colombia, 2011. 32 p.

a su vez paralelo a R_{po} , que es equivalente a un circuito de C_{dl} capacidad de doble capa y R_p resistencia a la polarización, que son paralelos entre sí¹⁰⁵.

Finalmente, al añadir los pigmentos a las pinturas, estos no aumentan su vida útil, sin embargo, brindan un refuerzo a la pintura. Aproximadamente, su durabilidad al igual que las pinturas epóxi es de 15 años, expuestos en ambientes similares al agua de mar, que hoy en día se consideran corrosivos¹⁰⁶.

3.4 COMPORTAMIENTO Y EVALUACIÓN DE MORTEROS CON ADITIVOS

Los morteros han sido de gran impacto en la historia de la construcción e ingeniería, pues han demostrado ser un efectivo recubrimiento contra la corrosión. De igual forma, esto ha sido evidenciado por diversos estudios, ya sea con la inclusión de aditivos en la mezcla de mortero o sin ellos buscando una posterior comparación en relación a su comportamiento expuestos en distintos ambientes. Por lo cual, a lo largo de este capítulo, se abarcan diferentes investigaciones en las cuales se corroboran dichos hechos.

Por ejemplo, en la investigación realizada por estudiantes de la Universidad del Valle, se analiza el efecto de la inclusión de dos aditivos, metakaolin (MK) y silica fume (SF) en la mezcla de concreto, tabla 11, donde se evalúa la tasa de corrosión por medio de tres pruebas, potencial de circuito abierto (OCP), espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y resistencia lineal a la polarización (LPR), sometidas a ambientes agresivos como la carbonatación, medios con presencia de cloruros y mixtos (CO_2 y Cl^-), en un tiempo de exposición de 365 días para su análisis¹⁰⁷.

Tabla 11. Composición de mezcla.

Material (kg/m ³)	Concreto		
	OPC	MK (10%)	SF (10%)
Cemento	389	350	350
Metakaolin	-	38,9	-
Silica Fume	-	-	38,9
Agua	214	214	214
Agregado grueso	900	900	900
Arena	900	900	900
Superplastificante	-	-	0,19

Fuente: Elaboración propia con base en AGUIRRE, Ana; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby y RIBEIRO, María. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. *Elsevier*. 2016, pp. 706.

¹⁰⁵ RODIRGUEZ, Teresa. Formulación y evaluación de imprimaciones epoxi anticorrosivas curables a temperatura ambiente [en línea] Universitat Jaume I, 2004. p. 114.

¹⁰⁶ GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

¹⁰⁷ AGUIRRE, Ana; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby y RIBEIRO, María. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. *Elsevier*. 2016, pp. 704-706

Teniendo en cuenta lo anterior, los tres ambientes agresivos a los cuales se expusieron las muestras fueron, agua potable como ambiente de referencia; cámara de carbonatación concentración 1% de CO₂; una celda electroquímica con corriente externa constante de 5V aplicada entre el ánodo y el cátodo, y siguiendo un proceso de “wet/dry” que consiste en el secado de las muestras a temperatura ambiente por 15 días, y posteriormente las mismas son inmersas por otros 15 días en una solución de 3,5% de NaCl, hasta cumplir 12 ciclos. Por último, se establece un ambiente mixto que combina la carbonatación y los cloruros, y así mismo se mezclan los dos procesos, iniciando con el proceso de carbonatación con una duración aproximada de 4 meses, para posteriormente cumplir 10 ciclos con solución de NaCl¹⁰⁸.

Seguido de la obtención de resultados, se realiza el análisis de los mismos con la ayuda de la prueba OCP, la cual infiere que estos, no precisan una información certera, por lo cual se considera información cualitativa¹⁰⁹, expresando las medidas como una probabilidad de corrosión tal como se evidencia en la imagen 14.

En relación a la imagen 14, se pretende demostrar el área de probabilidad de corrosión, por tanto, la gráfica se divide en tres áreas. La primera donde la probabilidad de corrosión es menor al 10%; un área media donde dicha probabilidad es incierta, y, por último, una alta probabilidad de corrosión que es mayor al 90%¹¹⁰.

¹⁰⁸ AGUIRRE, Ana; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby y RIBEIRO, María. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. Elsevier. 2016, p. 706.

¹⁰⁹ *Ibid.*, p. 707.

¹¹⁰ *Ibid.*, p. 707-708.

Imagen 14. Prueba OCP. a. Ambiente de referencia. B. Carbonatación. C.

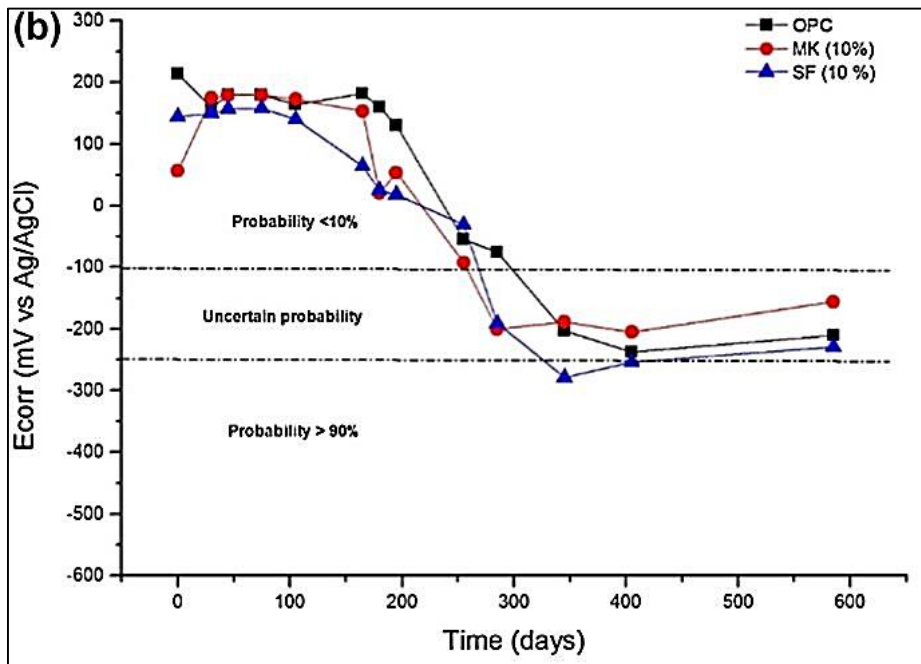
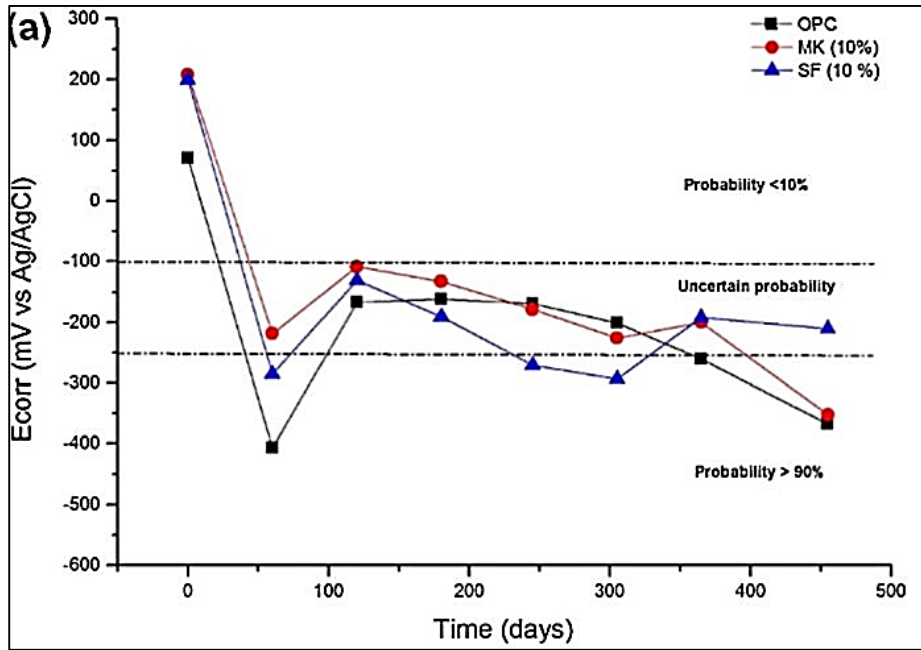
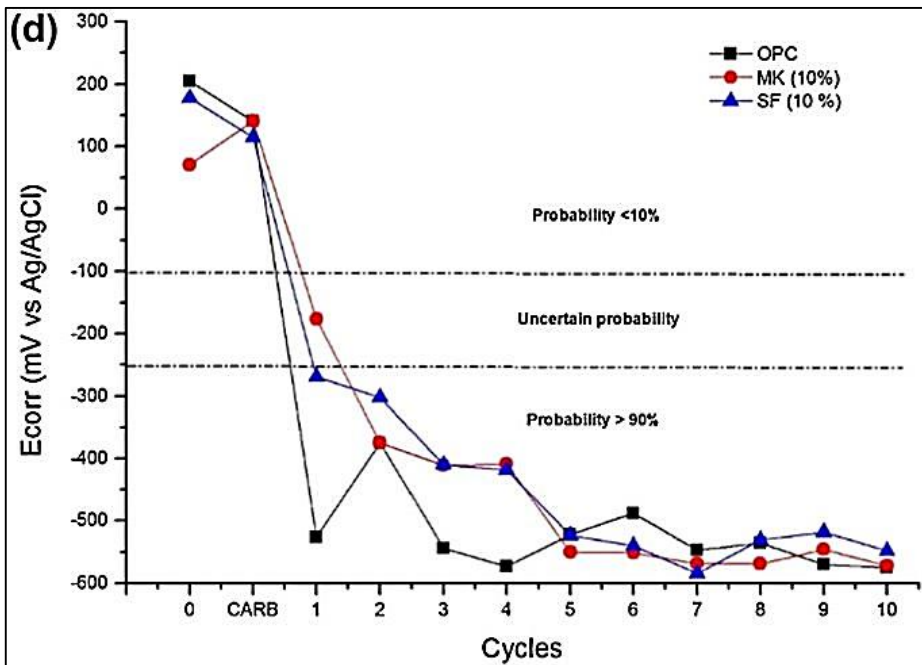
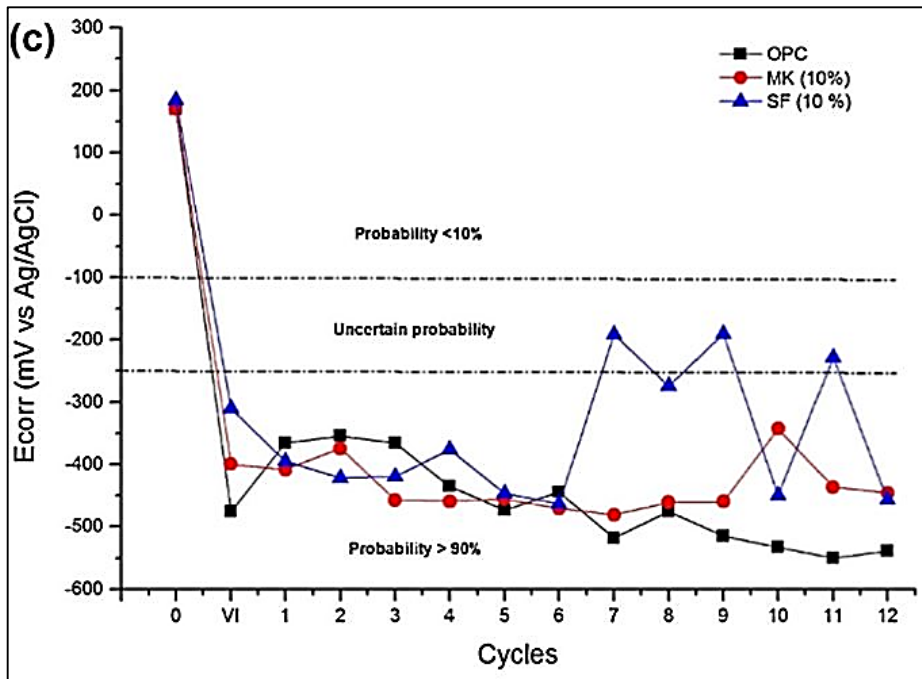


Imagen 14. (Continuación).



Fuente: AGUIRRE, Ana; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby y RIBEIRO, María. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. *Elsevier*. 2016, pp. 708.

3.4.1 Ambiente de carbonatación. En este caso, las propiedades de resistencia al electrolito y la resistencia a la transferencia de carga se ven afectados. En el caso de la resistencia al electrolito, se tiene que para la muestra de referencia a base del cemento portland (OPC) fue evidenciada una disminución en un 52%, mientras que para las muestras con MK y SF este valor decreció en un 57 y 63% respectivamente, causa que se deben a la avanzada fase de carbonatación, donde los electrolitos disminuyen por el efecto de difusión de CO₂, sin embargo este estudio denoto que los concretos con la inclusión de aditivos presentan una baja alteración al acero según pruebas y valores denotados en la imagen 15¹¹¹.

Por otro lado, la resistencia a la transferencia de carga es una propiedad inversamente proporcional a la tasa de corrosión (icorr), lo cual indica un incremento de la velocidad de corrosión, y en el caso de las muestras se evidencia que para la OPC se tienen mayores valores de esta variable en relación a las muestras de MK (25%) y SF (10%), por lo cual se llega a inferir, que la muestra referencia en ambiente de carbonatación sufre un mayor desgaste corrosivo en determinado lapso de tiempo.

Finalmente, para la resistencia de la capa pasiva o capa de óxidos formados por el deterioro del acero, se identifica según el estudio realizado, que este efecto es más pronunciado en la mezcla con aditivos, aumentando la velocidad de corrosión, puesto que la degradación es un efecto acelerado en estas muestras¹¹².

3.4.2 Ambiente con cloruros. En este caso, según el estudio realizado por Aguirre, se logra identificar que en relación a la resistencia al electrolito en todas las muestras esta propiedad disminuye respecto a los valores iniciales; sin embargo, los valores de MK y SF aumentan después de la exposición a cloruros en relación a la muestra de OPC. No obstante, el valor de MK resalta, puesto que durante el proceso se evidencia una formación de una sal que precipita en los poros del concreto, disminuyendo consigo el efecto corrosivo por los cloruros¹¹³.

Por otro lado, la resistencia de la capa pasiva en este ambiente agresivo al igual que los valores de resistencia al electrolito se reducen en las tres muestras analizadas, y al igual que en el ambiente de carbonatación, el valor más alto de la resistencia a la capa pasiva se acredita a la mezcla de MK, determinando una buena resistencia en la interface acero/recubrimiento. Por último, los datos obtenidos en relación a la resistencia de transferencia de carga son cambiantes respecto a los valores iniciales; no obstante, estos aumentan en las mezclas que incluyen aditivos con respecto al valor del concreto sin mezclar, demostrando que el valor más bajo (concreto sin mezclar) está agresivamente contaminado por cloruros.

¹¹¹ AGUIRRE, Ana; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby y RIBEIRO, María. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. Elsevier. 2016, p. 712.

¹¹² *Ibid.*, p. 712.

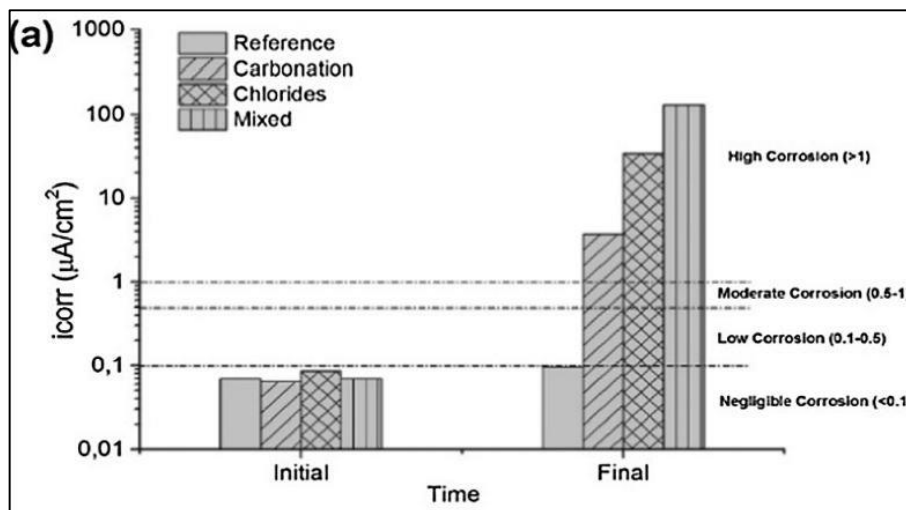
¹¹³ *Ibid.*, p. 713.

Adicionalmente, el MK muestra el mejor comportamiento durante esta prueba al ion cloruro. Este ambiente es de gran importancia, pues tiene como fin replicar el ambiente marino real, buscando mejorar el comportamiento de los materiales en el mismo, pues ha demostrado ser uno de los medios más agresivos¹¹⁴.

3.4.3 Ambiente mixto. La combinación de estos dos medios conlleva a que este ambiente sea altamente agresivo debido a la combinación de estas dos técnicas aceleradas. En el caso de la resistencia al electrolito al igual que en los ambientes analizados anteriormente MK presenta los valores finales más altos respecto a la muestra OPC, sin embargo, es importante recalcar que aun después de obtener este valor, se evidencia un decrecimiento de este en relación a sus valores iniciales; esto mismo sucede con la variable que representa la resistencia a la capa pasiva por el deterioro del acero.

Por otro lado, el dato final de la resistencia a la transferencia de carga es mayor para la mezcla SF con respecto al OPC, no obstante, esta al igual que las anteriores propiedades disminuye en relación al su valor inicial. Lo cual indica que, como se menciona anteriormente, la tasa corrosión aumenta. Debido a que esta última propiedad se considera la más importante, se sugiere el uso de SF para este tipo de ambientes¹¹⁵.

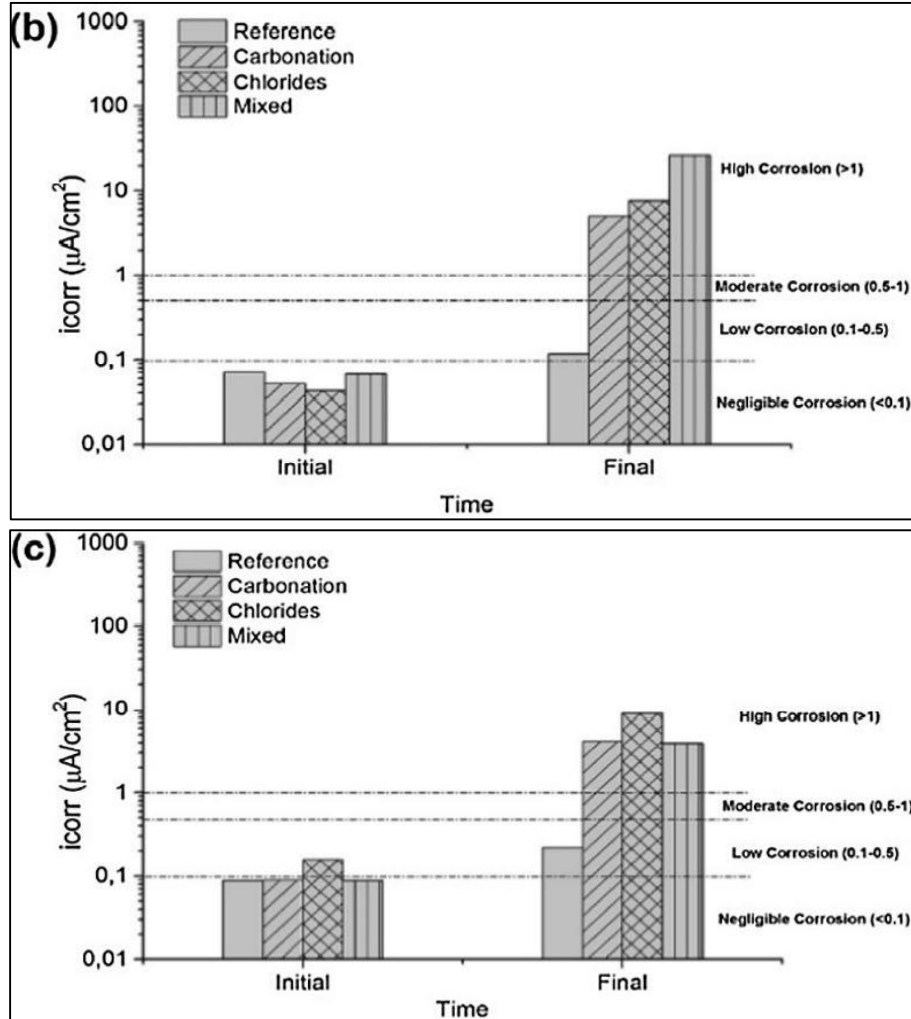
Imagen 15. Comparación de ambientes según tasa de corrosión (i_{corr}). a. OPC. b. MK. C. SF.



¹¹⁴ AGUIRRE, Ana; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby y RIBEIRO, María. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. Elsevier. 2016, p. 712-714.

¹¹⁵ *Ibid.*, p. 713.

Imagen 15. (Continuación).



Fuente: AGUIRRE, Ana; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby y RIBEIRO, María. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. *Elsevier*. 2016, pp. 713.

Por lo anteriormente mencionado, se ha demostrado que la inclusión de aditivos mejora las características resistivas del concreto en diferentes ambientes agresivos, esto conlleva al aumento de la vida útil tanto del concreto o mortero, como de la tubería. En un mortero convencional (sin aditivos), el tiempo aproximado de duración se estima entre diez y treinta años¹¹⁶. Sin embargo, es evidente que, según estudios, el concreto sin mezclar, dependiendo del ambiente, es más permeable a

¹¹⁶ IERE. Análisis del ciclo de vida de las tuberías de agua y alcantarillado de PVC y análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales de la tubería. [En línea]. Sustainable solutions. (abril). [Consultado: Julio 30 de 2020]. Disponible en: https://www.uni-bell.org/portals/0/resourcefile/Analisis_del_Ciclo_de_Vida_de_las_Tuberias_de_Agua_y_Alcantarillado_de_PVC_y_Analisis_Comparativo_de_la_Sustentabilidad_de_los_Materiales_de_las_Tuberias.pdf

los iones cloruro, dando lugar a que su velocidad de corrosión aumente y disminuya su vida útil; de la misma manera, este comportamiento también es aplicado y evidenciado para las mezclas de mortero según el estudio realizado por Batis¹¹⁷, en el cual se establece que al añadir una concentración de MK en una concentración 10% p/p de este aditivo en la mezcla de mortero convencional mejora propiedades como la resistencia a la compresión. Además, este autor permite evidenciar que al sugerir la adición de estos compuestos, se debe tener en cuenta la demanda de agua, puesto que, al reemplazar el cemento o la arena por estas sustancias, las mismas al ser más finas, requerirán mayor cantidad de agua para la elaboración de la mezcla¹¹⁸.

Finalmente, este estudio se logró establecer que la proporción de aditivo que se puede llegar a añadir está entre el 20 y 30% p/p, debido a que valores superiores pueden no lograr obtener resultados beneficiosos en la mezcla, puesto que esto reduce la resistencia a la corrosión de los especímenes, fenómeno que se atribuye al decrecimiento del pH de los poros, debido a la reacción presente entre los iones y la estructura¹¹⁹.

3.5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Por último, se establece una comparación de vida útil entre las alternativas analizadas, y se logra demostrar por medio de literatura cual es el mejor método a implementar con el fin de mitigar el efecto corrosivo. Además, con base a esta información se establece el tiempo aproximado en que la corrosión inicia a ser evidenciada según las pruebas realizadas. La información recopilada se plasma en el cuadro 7, por el cual se puede concluir en primera instancia que la mejor alternativa a nivel de durabilidad es el recubrimiento con mortero, pues independientemente de su pronta evidencia de corrosión, su proceso de deterioro es más lento en comparación con los otros métodos observados, lo cual beneficia la vida útil de la tubería, y por ende los costos de mantenimiento, sin afectar los tiempos de producción en la industria. No obstante, en cuanto a la información necesaria para la elaboración del proyecto, se desarrolla un análisis financiero de las tres posibles alternativas contra el efecto de la corrosión, mencionado en el capítulo 4.

Adicionalmente, por medio del cuadro 7 se describen las ventajas y desventajas para cada método, con el fin de establecer una comparación más detallada y lograr una visión más amplia de las alternativas plasmadas, ya que, la elección de alguna de ellas varía directamente con los requerimientos de cada empresa y se muestra en los datos demostrados por este trabajo de grado.

¹¹⁷ BATIS, G., et al. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement and Concrete Composites*. 2005, vol. 27, nro. 1. pp. 1.

¹¹⁸ *Ibid.*, pp. 129.

¹¹⁹ *Ibid.*, p. 129-130.

Cuadro 7. Ventajas y desventajas de las alternativas de protección y su vida útil.

Método	Ventajas	Desventajas	Evidencias por corrosión	Vida útil (años)
Protección catódica	No requiere una fuente de corriente continua. Se puede aumentar el número de ánodos con el sistema.	· Difícil control y/o mantenimiento.	-	15 a 20 ¹²⁰
		· Mantenimiento cada 10 años.		
		· Se requiere de bastante información para tener un estudio previo acertado.		
Pinturas epoxi	Recubrimiento estéticamente agradable a la vista.	· Se evidencia corrosión a una edad muy temprana.	Máximo 30 días ¹²¹	15 ¹²²
		· Alta complejidad en aplicación, aumentando error humano.		
		· Requieren de una limpieza de superficie exhaustiva para lograr adherencia en la superficie.		
Pinturas con pigmentos	Actúa como refuerzo e impide la temprana corrosión. Puede brindar color específico a la pintura.	· No aumenta la vida útil del recubrimiento.	10 meses ¹²³	15 ¹²⁴

¹²⁰ MARTINEZ, Jaime y RUANO, José. Implementación del sistema de protección catódica para el fondo de los tanques de la ampliación en la refinería de Barrancabermeja. Bogotá: 2014. pp. 50.

¹²¹ GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 75 p

¹²² INGEMECANICA. Sistema de pintado y protección del acero. [En línea]. Sistemas de pintado. [Consultado: Julio 20 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn103.html>

¹²³ DEL AMO, B., et al. High performance water-based paints with non-toxic anticorrosive pigments. Progress in Organic Coatings. 2002, vol. 45, nro. 4. pp. 39.

¹²⁴ GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

Cuadro 7. (Continuación).

Mortero y concreto	Su mantenimiento es cada 30 años	· Utilización de máquinas para aplicación y así, disminuir error humano.	8 meses ¹²⁵	10 a 30 ¹²⁶
--------------------	----------------------------------	--	------------------------	------------------------

Fuente. Elaboración propia por evidencia.

¹²⁵ BATIS, G., et al. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement and Concrete Composites*. 2005, vol. 27, nro. 1. pp. 130.

¹²⁶ IERE. Análisis del ciclo de vida de las tuberías de agua y alcantarillado de PVC y análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales de la tubería. [En línea]. *Sustainable solutions*. (abril).

4. ANÁLISIS FINANCIERO

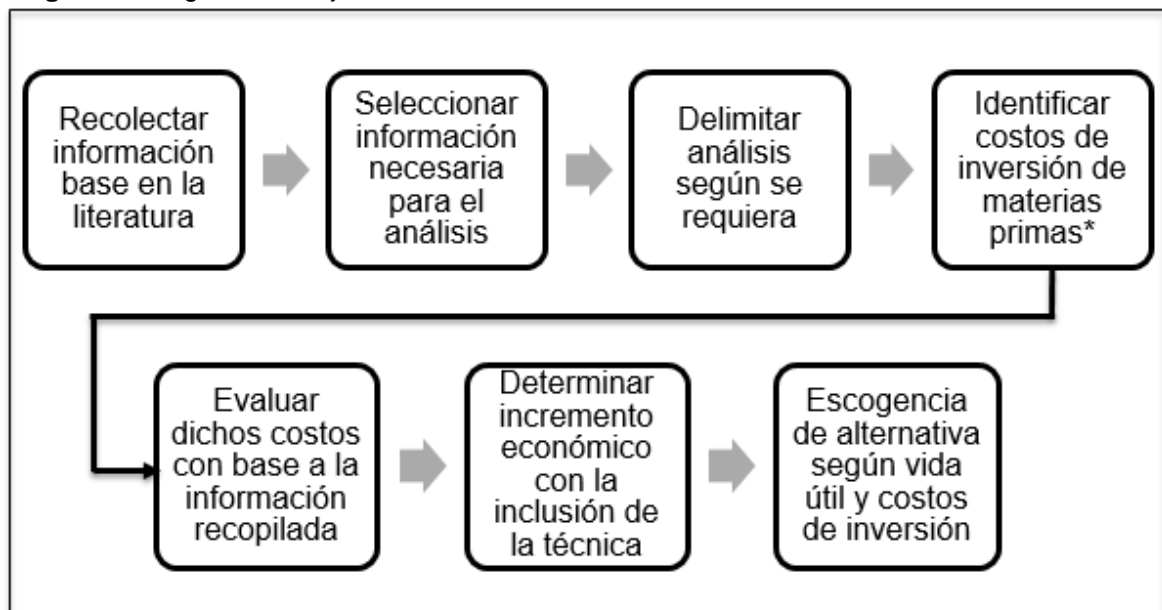
El siguiente análisis financiero se realiza con base en la literatura e información brindada por Sika S.A y TUBOS SDI, la cual permite establecer precios de inversión en materiales y/o productos necesarios para la inclusión de las alternativas.

4.1 PROCESO DE ANÁLISIS DE COSTOS

Por medio de la imagen 17, se plasma el proceso correspondiente para la realización de un análisis financiero, en el cual se establece cada uno de los pasos a tener en cuenta para implementación de un análisis de costos de inversión, teniendo en cuenta que es únicamente para evaluar el incremento de la inclusión, más no, de los costos de operación, producción o mano de obra.

4.1.1 Diagrama de flujo del análisis de costos.

Imagen 16. Diagrama de flujo del análisis de costos.



Fuente: Elaboración propia. *Inversión únicamente en materias primas, excluyendo valores de maquinaria y mano de obra.

4.2 NÚMERO DE ÁNODOS EN PROTECCIÓN CATÓDICA

Al tener la información necesaria disponible puede llegar a ser calculado por medio de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

De igual forma, es importante tener en cuenta los requerimientos necesarios para lograr estimar dichos factores. En este caso, es imprescindible conocer la vida útil estimada para el sistema, información específica sobre la superficie y material que se desea proteger, la resistividad del electrolito, el rango de tiempo en el que el

cátodo estará en contacto con el electrolito, y no menos importante, la intensidad de corriente del ánodo; este último, puede ser calculado tanto experimental como teóricamente.

En este caso, para el desarrollo del trabajo no se logra calcular un valor exacto por falta de información relacionada con las características del ánodo, tales como su geometría y dimensiones¹²⁷, no obstante, por medio de las ecuaciones encontradas en la literatura se logra calcular un número de ánodos aproximados, teniendo como referencia las dimensiones de la tubería, información brindada por empresa Tubos SID, indicando que según ellos, las tuberías que presentan una mayor demanda en el mercado son de 6 m de largo y 24" de diámetro¹²⁸. Seguidamente, se procede a calcular la intensidad de corriente, partiendo de la ecuación 2 y con valores para densidad de corriente de acero al desnudo presentes en la tabla 7 y el área a proteger calculada a partir de los datos anteriormente mencionados.

Ecuación 6. Área de un cilindro sin bases.

$$A = \pi DL$$

Fuente: SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 170

$$A = 2\pi * (0,3048m) * (6m)$$

$$A = 11,49 m^2$$

$$I_t = 75 mA/m^2 \cdot 11,49m^2$$

$$I_t = 861,75 mA = 0,862 A$$

Posteriormente, con base en las ecuaciones 4 y 3 se calcula la resistencia del ánodo (R) y la intensidad del ánodo (I_a) respectivamente. Debido a que no se tiene una especificación de geometría del ánodo, el cálculo de su área se calcula con base a la norma noruega "Recommended Practice for Accelerated Laboratory Testing of Sacrificial Anode Materials with the Objective of Quality Control", en la que menciona que el área de la tubería es aproximadamente veinte veces mayor que la del ánodo, por tanto, el área total de la tubería a proteger se divide en 20, obteniendo como resultado para el área del ánodo 0,57 m².

¹²⁷ AGUIRRE, Luis. Programa de computadora para el diseño de un sistema de protección catódica en tanques de almacenamiento, de petróleo utilizando ánodos de zinc. [en línea]Centro de investigaciones en corrosión, 1991. 220 p.

¹²⁸ VERGARA, Wilson. <> "Medidas de tubería " [Correo Electrónico]. Agosto 2019.

$$R = \frac{0,315 \cdot 20,8\Omega \cdot cm}{\sqrt{5700cm^2}}$$

$$R = 0,086 \Omega$$

$$I_a = \frac{-0,8V - (-1,1V)}{0,086 \Omega}$$

$$I_a = 3,49 A$$

El desarrollo de estas ecuaciones se realizó con el fin de obtener el número de ánodos anteriormente descrita, a partir de la ecuación 1.

$$N = \frac{0,863 A}{3,49 A}$$

$$N = 0,25 \text{ ánodos.}$$

4.2.1 Resultados y análisis. Para la utilización de la práctica de protección catódica en estructuras como tuberías expuestas a medios agresivos con un diámetro de 24" y 6 metros de largo, se requiere $\frac{1}{4}$ de ánodo aproximadamente. Sin embargo, con base a la información brindada por el estudio de Martínez¹²⁹, se logra identificar que, el incremento del costo de mantenimiento en estructuras sin protección catódica frente a las que si la implementa un adecuado mantenimiento y control, en un lapso de 20 años tiene un costo aproximado de 200.000.000 millones de pesos, mientras que estructuras sin este método infieren un valor de 1.600.000.000 millones de pesos; valores monetarios que difieren entre sí en casi un 800% de incremento, es por esto, que se puede concluir que una de las alternativas para reducir los gastos por mantenimiento puede ser este método de protección catódica, no obstante, para empresas que deseen realizar dichos estudios y análisis deben tener a disposición algoritmos que reproduzcan la geometría del ánodo a utilizar y estimar la vida útil deseada según sus requerimientos¹³⁰.

Finalmente, para próximos trabajos interesados en continuar con esta investigación referente a la protección catódica, se tiene que, al conocer la masa total del ánodo y la capacidad de corriente, se puede calcular la intensidad por año del mismo, factor importante para el estudio financiero, pues según Hernández¹³¹, el costo de la implementación de la protección catódica depende de la cantidad de amperios

¹²⁹ MARTINEZ, Jaime y RUANO, José. Implementación del sistema de protección catódica para el fondo de los tanques de la ampliación en la refinera de Barrancabermeja. Bogotá: 2014. pp. 50.

¹³⁰ AGUIRRE, Luis. Programa de computadora para el diseño de un sistema de protección catódica en tanques de almacenamiento, de petróleo utilizando ánodos de zinc. [en línea]Centro de investigaciones en corrosión, 1991. 220 p.

¹³¹ HERNANDEZ, Angélica. Evaluación del desempeño de ánodos galvánicos Zn-22Al con 2, 4, 6% en peso de Ag para protección catódica [en línea]Universidad autónoma de San Luis Potosí, 2008. 14 p.

por hora requeridos en la estructura, sin dejar de lado que la masa requerida también puede ser calculada y así mismo su valor monetario.

4.3 USO DE PINTURAS EPOXI Y PINTURAS CON PIGMENTOS COMO RECUBRIMIENTO

A lo largo del trabajo se ha demostrado que la utilización de pinturas puede llegar a ser una barrera protectora capaz de evitar la corrosión. A continuación, se establecen parámetros como el espesor de película (en seco y húmedo), rendimiento (teórico y práctico) y costos, los cuales afectan la determinación del factor económico¹³².

4.3.1 Incidencia del espesor. Además, es importante resaltar que el espesor llega a ser el factor más determinante, pues a partir del mismo se puede establecer el número de capas necesarias, el cual está relacionado directamente a su durabilidad dependiendo al ambiente al que encuentra expuesto, como en este caso, en ambientes agresivos (medio salino, Im3)¹³³. Por lo cual, en la tabla 13 se especifica el número de capas, junto con su espesor recomendados para la aplicación del recubrimiento según la norma ISO 12944, basada en el tipo de ambiente corrosivo y los sistemas de pintura a utilizar. Posteriormente, se plasma el precio por volumen de pintura epoxi y pintura con pigmentos anticorrosivos, junto con su rendimiento, los cuales se calculan más adelante con base a información brindada por Sika en las ecuaciones 7, 8, 9 y 10.

Tabla 12. Espesor de película seca para ambientes marítimos de pinturas epoxi.

Categoría de corrosión IM3	
Tipo de pintura	Espesor de película seca [μm]
Capa 1: Imprimación epoxi rica en Zinc.	100
Espesor total opción 1:	100
Capa 1: Coaltar epóxico.	300
Espesor total opción 2:	300

Fuente: Elaboración propia con base en INGEMECANICA. Sistema de pintado y protección del acero. [En línea]. Sistemas de pintado. [Consultado: Julio 20 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn103.html> y GONZALES, Juan.<> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

¹³² SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf>

¹³³ INGEMECANICA. Sistema de pintado y protección del acero. [En línea]. Sistemas de pintado. [Consultado: Julio 20 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn103.html>

Por lo anteriormente mencionado, las fichas técnicas mostradas en el anexo A y B hacen referencia a las propiedades de la pintura imprimante epoxi rica en zinc y coaltar epóxico, respectivamente, en las cuales se recomienda una única capa de recubrimiento, pues presenta un efecto auto imprimante y de barrera, con el espesor especificado en la tabla 13 (opción 1 y 2).

4.3.2 Cálculos de espesor de película húmeda, rendimiento teórico y práctico para pintura epoxi. En este caso, según la información brindada por el ingeniero Gonzales¹³⁴, se estableció que el sistema tricapa no es conveniente usarlo, pues al implementar este tipo de recubrimiento frente a la corrosión, genera más gastos de inversión, por lo cual se recomienda que el espesor de la capa de pintura a aplicar en la tubería fuera mayor, con el fin de que proporcionara una barrera entre la tubería y el medio agresivo en la que se encuentra expuesta. Este método se aplicó en los dos sistemas de pintura planteados en la tabla 13.

Ecuación 7. Cálculo espesor de película húmeda.

$$\text{Espesor de película húmeda} = \frac{\text{Espesor de película seca}}{\text{sólidos de volumen}}$$

Fuente: SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 50.

Este espesor de película húmeda (EPH) se calcula con el fin de realizar una medición precisa del grosor de la capa de la pintura al momento de la aplicación, pues este valor garantiza que se obtenga el espesor de película en seco que se requiere para dicha protección.

$$\text{Espesor de película húmeda, opción 1} = \frac{100\mu\text{m}}{0,65} = 153,85\mu\text{m}$$

$$\text{Espesor de película húmeda, opción 2} = \frac{300\mu\text{m}}{0,74} = 405,41\mu\text{m}$$

Esta medición se corrobora con un instrumento denominado galga mostrado en la imagen 18¹³⁵.

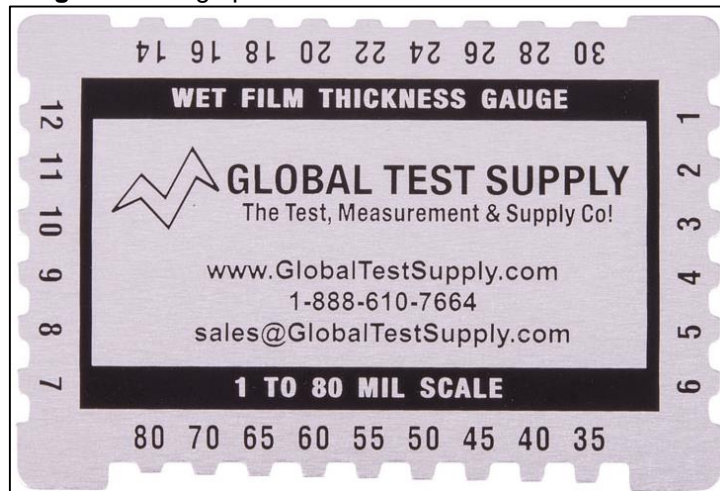
En el caso de la medición requerida para la protección del espesor de película seca (EPS) se utiliza un instrumento digital, el cual garantiza el valor de grosor de la capa de la película deseado. En el mercado existen actualmente diversos instrumentos digitales para su medición, sin embargo, estos difieren del tipo de superficie en la

¹³⁴ GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

¹³⁵ *Ibíd.*, GONZALES.

que se vaya a realizar dicha medición; por ejemplo, existen medidores para superficies metálicas, plásticas, madera, etc¹³⁶.

Imagen 17. Galga para medición de EPH.



Fuente: GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas" [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

Por otro lado, se realizó la estimación del rendimiento teórico de las pinturas según la ecuación 8, para posteriormente obtener el valor del rendimiento práctico de la pintura¹³⁷ con la ecuación 9, también teniendo como base el espesor mencionado en la tabla 13.

Ecuación 8. Rendimiento teórico (RT) de pinturas.

$$RT \text{ de pinturas} = 1,5 * \%sólidos \text{ en volumen}$$

Fuente: SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 169.

¹³⁶ NEURTEK INSTRUMENTS. Medidor de espesores de capa seca y capa húmeda. [En línea]. NEURTEK INSTRUMENTS. [Consultado: agosto 10 de 2020]. Disponible en: <https://www.neurtek.com/es/pintura-recubrimientos/medidor-espesores-pintura>

¹³⁷ Fuente. SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 169.

Donde la constante de rendimiento teórico de las pinturas es 1,5 y el porcentaje (%) de sólidos se encuentra en las especificaciones plasmadas en los anexos A y B el cual está definido en la ecuación 8, obteniendo como unidades [m²/gal], al espesor de película de 1 mils que equivalen a 25μm¹³⁸.

$$RT, \text{ opción 1} = 1,5 * 65 = \mathbf{97,5} \frac{m^2}{gal}$$

$$RT, \text{ opción 2} = 1,5 * 74 = \mathbf{111} \frac{m^2}{gal}$$

Partiendo de los valores de RT obtenidos anteriormente, se realiza el cálculo del rendimiento practico para cada una de las pinturas teniendo como factor primordial el espesor de película seca para cada una de las pinturas¹³⁹. En el caso de la pintura imprimante epoxi rica en zinc, estese calcula con base a 4 mils de espesor (100μm), mientras que para el coaltar epoxi se realiza con 12 mils (300 μm) de espesor. Es importante recalcar que el rendimiento práctico de cada una de las

pinturas debe considerar un porcentaje de desperdicios, que generalmente se estima ser el 20%. Este valor es multiplicado por el RP¹⁴⁰.

Ecuación 9. Rendimiento práctico de las pinturas.

$$RP = \frac{RT}{EPS} \cdot \%DESPERDICIO(0,8)$$

Fuente: GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

$$RP, \text{ opción 1} = \frac{97,5 \frac{m^2}{gal}}{4} = 24,38 \frac{m^2}{gal} \cdot 0,8 = \mathbf{19,50} \frac{m^2}{gal}$$

$$RP, \text{ opción 2} = \frac{111 \frac{m^2}{gal}}{12} = 9,25 \frac{m^2}{gal} \cdot 0,8 = \mathbf{7,4} \frac{m^2}{gal}$$

¹³⁸ Fuente. SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 169.

¹³⁹ GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

¹⁴⁰ Ibíd., GONZALES.

Finalmente, al tener el valor del área a proteger de la tubería estimado en la ecuación 6, se procede a calcular el volumen total de la pintura a utilizar para el recubrimiento.

Ecuación 10. Calculo de volumen de pintura [gal]

$$Volumen\ de\ pintura\ [gal] = \frac{\text{Área a proteger}}{RP}$$

Fuente: Elaboración propia.

$$Volumen\ de\ pintura,\ opción\ 1 = \frac{11,49m^2}{19,50 \frac{m^2}{gal}} = 0,59\ gal$$

$$Volumen\ de\ pintura,\ opción\ 2 = \frac{11,49m^2}{7,4 \frac{m^2}{gal}} = 1,55\ gal$$

Según los datos calculados anteriormente, se realiza una tabla resumen con los valores de espesor de película húmeda (EPH), rendimiento teórico y práctico, con el fin de obtener el volumen total de pintura para la tubería de 24" de diámetro y 6 m de longitud plasmados en la tabla 14. Posteriormente, en la tabla 15 se expone el costo por galón de cada una de las pinturas según el volumen requerido para el recubrimiento con pinturas.

Tabla 13. Rendimientos y volumen de pinturas epóxi.

Tipo de pintura	EPH [μm]	RT [m2/Gal]	RP [m2/Gal]	Volumen [Gal]
Imprimante epoxi rica en zinc	153,85	97,5	19,5	0,59
Coaltar epóxico	405,41	111	7,4	1,55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Costo total para recubrimiento de pintura epoxi según volumen requerido.

Tipo de pintura	Costo [COP]/Gal	Costo total [COP]
Imprimante epoxi rica en zinc	\$ 409.727,8	\$ 241.739,4
Coaltar epoxi	\$ 134.495,0	\$ 208.467,3

Fuente: Elaboración propia con base en GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas" [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

Teniendo en cuenta los anteriores cálculos realizados para dichas opciones de pinturas epoxi, se procede a realizar el mismo procedimiento para los pigmentos anticorrosivos, datos los cuales se plasmarán en la tabla 16.

Tabla 15. Espesor de película para ambientes marítimos de pinturas con pigmentos anticorrosivos.

Categoría de corrosión IM3		
Tipo de pintura	EPS [μm]	% Sólidos en volumen
Imprimante epóxico fosfato de cinc	80	60 ¹⁴¹
Espesor total:	80	

Fuente: Elaboración propia con base en DEL AMO, B., et al. High performance water-based paints with non-toxic anticorrosive pigments. Progress in Organic Coatings. 2002, vol. 45, nro. 4. pp. 390.

En este caso, el estudio realizado por Del Amo¹⁴², propone que el espesor de película seca para el recubrimiento con pinturas que en su composición contienen pigmentos anticorrosivos, sea de 80 μm la cual en principio garantiza la barrera ante la corrosión entre la tubería y los compuestos externos del ambiente agresivo, el pigmento que contiene esta pintura es el imprimante epóxico fosfato de zinc; en el anexo C, se pueden evidenciar sus características más relevantes.

4.3.3 Cálculos de espesor de película húmeda, rendimiento teórico y práctico para pintura que contiene pigmentos anticorrosivos. A partir de los datos establecidos en la tabla 16, se realizan los cálculos pertinentes con base en las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 con el fin de obtener el costo total de esta alternativa como recubrimiento en tuberías y realizar una posterior comparación.

$$\text{Espesor de película húmeda} = \frac{80\mu\text{m}}{0,60} = \mathbf{133,33\mu\text{m}}$$

$$RT = 1,5 * 60 = \mathbf{90 \frac{m^2}{gal}}$$

En este caso particular, al tener 80 μm de espesor para esta pintura con pigmentos, este valor equivale a 3,2 mils, valor que se utilizara para el cálculo del rendimiento práctico (RP).

¹⁴¹ Fuente. SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 45.

¹⁴² DEL AMO, B., et al. High performance water-based paints with non-toxic anticorrosive pigments. Progress in Organic Coatings. 2002, vol. 45, nro. 4. pp. 389-397.

$$RP = \frac{90 \frac{m^2}{gal}}{3,2} = 28,13 \frac{m^2}{gal} \cdot 0,8 = 22,5 \frac{m^2}{gal}$$

Con base a lo anterior, se calcula el volumen de pintura requerida para la tubería de área 11,49 m² y teniendo el rendimiento practico anteriormente calculado con adición de pigmentos anticorrosivos, se procede a plasmar todos los datos obtenidos en la tabla 17.

$$\text{Volumen de pintura, opción 1} = \frac{11,49m^2}{22,5 \frac{m^2}{gal}} = 0,51 \text{ gal}$$

Tabla 16. Rendimientos y volumen de pintura que contiene pigmentos anticorrosivos.

Tipo de pintura	EPH [μm]	RT [m2/Gal]	RP [m2/Gal]	Volumen [Gal]
Imprimante epóxico fosfato de cinc	133,33	90	22,5	0,51

Fuente. Elaboración propia.

Por último, teniendo como base los datos obtenidos a partir de los cálculos y ecuaciones anteriormente descritas, se determina el costo total de la inclusión de esta pintura que contiene pigmentos inhibidores como alternativa contra el efecto corrosivo, datos que son especificados en la tabla 18.

Tabla 17. Costo total para recubrimiento de pintura epoxi según volumen requerido.

Tipo de pintura	Costo [COP]/Gal	Costo total [COP]
Imprimante epóxico fosfato de cinc.	\$ 134.990,5	\$ 68845,2

Fuente. Elaboración propia con base en GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

Por otro lado, cabe resaltar que solo se tendrá en cuenta el recubrimiento exterior, ya que éste es el que se encuentra sometido a medios que contienen iones que pueden perjudicar la tubería, a diferencia del interior de la tubería, donde se transporta agua potable que presenta un potencial de hidrogeno neutro lo cual no causara perjuicios significativos en el material a nivel corrosivo¹⁴³. Cabe considerar también, que el mantenimiento de este tipo de protección es de gran complejidad en el momento que su vida útil se culmina, pues en este caso, se debe extraer totalmente la tubería de la superficie donde se encuentra enterrada, retirar las impurezas con base en distintos métodos de pulido y limpieza y luego aplicar

¹⁴³ VERGARA, Wilson. <> "Medidas de tubería " [Correo Electrónico]. Agosto 2019.

nuevamente la(s) capa(s) de pintura necesaria para su protección, lo cual conlleva a un pare total del transporte del fluido y perdidas en la producción¹⁴⁴.

4.4 RECUBRIMIENTO CON MORTERO COMO ALTERNATIVA DE PROTECCIÓN

Para esta alternativa, se establecen cálculos los cuales buscan evidenciar el incremento monetario con respecto a la inclusión del aditivo y, además, plasmar la cantidad cemento reemplazado por aditivo. Este análisis se ejecuta con base a la información obtenida en el capítulo 3, donde se menciona la utilización del Metakaolin (MK) y silica fume (SF) como aditivos en la mezcla de mortero de cemento. La información obtenida en relación a estos aditivos y recubrimiento, puede estar sujeta a cambios, pues, la información fue brindada directamente por las empresas Tubos SDI y SIKA S.A.

La dosificación utilizada para una tubería de 24" de diámetro, se plasma en la tabla 19, la cual se elabora con base al anexo D, teniendo en cuenta que un bulto de cemento equivale a 42,5 Kg.

Tabla 18. Dosificación de mortero para tubería.

Diámetro [in]	Longitud [m]	Bultos de cemento	Kg de cemento	Agua [L]
24"	6	4 1/2	191,25	50

Fuente: Elaboración propia con base en Anexo D.

Por otro lado, para el cálculo del volumen de mortero, es necesario tener en cuenta el valor de la densidad del cemento, pues este, varía dependiendo del tipo de cemento. La densidad teórica del cemento se estima con un valor de 3 kg/m³, sin embargo, para obtener un cálculo exacto de esta propiedad, se recomienda la experimentación necesaria para determinar su valor práctico, y así poder calcular su volumen.

Teniendo en cuenta la información plasmada anteriormente, se procede a realizar el cálculo del volumen a partir de la ecuación 11.

¹⁴⁴ GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

Ecuación 11. Calculo volumen del cemento.

$$\rho_{Cemento} = \frac{Masa_{Cemento}}{Volumen_{Cemento}}$$

Fuente. Elaboración propia.

$$V_{Cemento} = \frac{191,25 \text{ kg}}{3 \text{ Kg}/m^3} = 63,75 \text{ m}^3$$

El volumen anteriormente mencionado, hace referencia a la muestra sin la inclusión de aditivos, que se denomina como muestra patrón (MP).

Ahora se lleva a cabo el mismo proceso, sin embargo, en este, se contempla el porcentaje peso/peso por la inclusión de cada aditivo, especificado en capítulo 3 con un valor de 10% como sustituto del cemento.

$$Masa_{Aditivo} = 191,25 \text{ kg} \cdot 0,1 = 19,13 \text{ kg}$$

$$Masa_{Cemento} = 191,25 \text{ kg} - 19,13 \text{ kg} = 172,12 \text{ kg}$$

Por consiguiente, para concluir con el análisis financiero de esta alternativa, se estima el precio por kilogramo de aditivo los cuales son comparados con el costo de la muestra patrón de mortero, tabla 20 y así evidenciar el incremento de la inclusión de cada uno de los aditivos, tabla 21.

Tabla 19. Precio mezcla de mortero muestra patrón.

Muestra patrón				
Cemento [Kg]	Precio Bulto [COP]	Precio/Kg [COP]	Total [COP]	
191,25	\$ 26.000	\$ 611,76	\$ 117.000	

Fuente: Elaboración propia con base en VERGARA, Wilson. <> "Medidas de tubería" [Correo Electrónico]. Agosto 2019.

Tabla 20. Precio total mezcla de mortero con aditivos.

Aditivo	Precio [COP]	Masa Cemento [kg]	Masa Aditivo [kg]	Total
MK	\$ 2.500	172,13	19,13	\$ 153.128,06
SF	\$ 2.600	172,13	19,13	\$ 155.041,06

Fuente. Elaboración propia con base en SPOT, Michael y WOJTAROWICZ, Maggie. Metakaolin Study. *Eco Smart Concrete Project*. 2003, pp. 12.

Seguidamente, se establece que el incremento para el uso del aditivo MK es del 30,88% (\$36.128,06), mientras que para el SF es de 32,51% (\$38.041,06) respecto al costo de la muestra patrón.

Finalmente, en la tabla 22 se presenta la recopilación de la información en relación al análisis financiero para cada una de los métodos que permiten mitigar el efecto corrosivo en las tuberías.

Tabla 21. Precio total por alternativa.

Método de recubrimiento	Sistema recomendado	Precio total por alternativa [COP]
Pinturas	Resina epóxi, opción 1	\$ 241.739,40
	Resina epóxi, opción 2	\$ 208.467,30
	Pigmentos	\$ 68.845,20
Mortero	Muestra patrón	\$ 117.000,00
	Aditivo MK	\$ 153.128,06
	Aditivo SF	\$ 155.041,06

Fuente: Elaboración propia por evidencia.

5. CONCLUSIONES

1. Como se evidenció en los capítulos 1 y 2, se lograron establecer diferentes propiedades de los materiales utilizados y ensayos necesarios para cada una de las alternativas escogidas para la prevención de la corrosión. Pues esta caracterización de cada método permitió plantear el punto de partida para los posteriores análisis. Además, es importante recalcar que las propiedades de la materia prima son factores primordiales a tener en cuenta, ya que estos pueden llegar afectar significativamente el comportamiento y efectividad de dicha alternativa.
2. Dentro del capítulo 3 que da respuesta al segundo objetivo, se abordaron cuatro posibles métodos ante el efecto corrosivo, tales como protección catódica, recubrimientos con pintura epoxi con y sin pigmentos, y, por último, revestimiento con mortero de cemento y la inclusión de aditivos. En el caso de la protección catódica, se pudo evidenciar que el uso de esta técnica es dependiente de una densidad corriente que ha sido especificada en el capítulo 3 las cuales fueron determinadas para un medio y área en específico. Además, se concluyó que este método con ánodos de zinc presenta una vida útil aproximada de 10-20 años. Por otro lado, la durabilidad de los recubrimientos con pinturas depende del tipo de pintura y su composición. Para la investigación analizada, se estableció que la vida útil de una pintura epóxi con poliamida como sustancia de curado es de aproximadamente 15 años. Adicionalmente, las mismas pueden contener pigmentos anticorrosivos a base de fosfatos, los cuales demostraron la misma durabilidad, pues estos pigmentos al ser adicionados a la pintura aparte de brindarle color, actúa como refuerzo. Finalmente, para el revestimiento se puede concluir que en este estudio de concretos y morteros dependiendo el ambiente se seleccionó la mejor mezcla, OPC para carbonatación, MK para cloruros y SF para ambiente mixto, por lo cual, según literatura se evidencio que este método en comparación con los anteriores presenta un mejor desempeño en cuanto a vida útil, con una duración de 10 a 30 años.
3. Concluyendo el tercer objetivo desarrollado en el capítulo 4, se logró establecer y corroborar que la mejor alternativa como inhibidor frente al efecto corrosivo para tuberías es el revestimiento con mortero, ya sea con o sin la inclusión de aditivos, pues se evidenció, que la relación precio/vida útil es aproximadamente menor en un 58%, pues en promedio la inversión en pintura es de \$225.103,35 y para el mortero es de \$141.714,04 con respecto a las otras alternativas. En el caso de la inclusión de aditivos, estos al ser compuestos más finos que el material cementante, generan una malla menos porosa, es decir, reduce su permeabilidad en un lapso aproximado de 30 años.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para posteriores estudios se realice la experimentación o el uso de algoritmos que permitan verificar y establecer los datos requeridos para el análisis de la implementación de la protección catódica, para así poder realizar la evaluación de corrosión, en relación al número de ánodos, masa, vida útil y su costo total de inversión.
- Se sugiere que se comparen otros tipos de pinturas que contengan o no pigmentos, u otros componentes que actúen como agentes anticorrosivos en el recubrimiento; de igual forma se puede evaluar el comportamiento de las pinturas analizadas variando el valor del espesor y además incrementar y/o disminuir el porcentaje de pigmentos (5,8%), con el fin de analizar la influencia de su concentración en la pintura, y así obtener datos de dosificaciones que permitan el aumento en la vida útil.
- Finalmente, en el caso de los recubrimientos con mortero, se aconseja realizar la previa experimentación de la mezcla, es decir la caracterización de las materias primas como la arena y su granulometría, el cemento y su densidad y el agua y su materias en suspensión, para posteriormente realizar la inclusión de aditivo en el porcentaje recomendado en este trabajo (10%-20%), con el fin de poder ejecutar pruebas que permitan observar el comportamiento de los mismos en la mezcla y adicionalmente, se recomienda desarrollar un estudio de la influencia del porcentaje de cada uno a nivel de las propiedades del mortero, tales como absorción, resistencia a la compresión, penetración de iones, permeabilidad, vida útil y otros.

BIBLIOGRAFÍA.

- ADATEC S.A. Medidor a la penetración del ion cloruro. [En línea]. [Consultado: 29/03/202]. Disponible en: <http://www.adatec.co.cr/route.php?url=medidordepenetracionioncloruro>
- AGUILAR, Erick y RIGAIL, Andrés. Propiedades Anticorrosivas de un recubrimiento nano compuesto de epóxica / amina / nano arcillas. *Revista tecnológica ESPOC*. 2006, pp. 125-126
- AGUIRRE, Ana; MEJIA DE GUTIEREZ, Ruby y RIBEIRO, María. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. *Elsevier*. 2016, pp. 704-707
- AGUIRRE, Luis. Programa de computadora para el diseño de un sistema de protección catódica en tanques de almacenamiento, de petróleo utilizando ánodos de zinc. [en línea]Centro de investigaciones en corrosión, 1991. 220 p.
- ÁVILA, Javier y GENESCA, Joan. Protección catódica con ánodos galvánicos. [En línea]. La lucha contra la corrosión. [Consultado: Julio 30 de 2020]. Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/mas_ala2.htm
- AYALA, Sandra JIMENEZ, Teresa. Protección catódica y anódica de electrodos. [En línea]. Academia. (agosto 21). [Consultado: junio 19 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/27924270/PROTECCION_CATODICA_Y_ANODICA_DE_ELECTRODOS_1
- BATIS, G., *et al.* The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement and Concrete Composites*. 2005, vol. 27, nro. 1. pp. 125-130
- BERMUDEZ, Martha. Estudio estructural de nylons N, 2/N, Y N, N+2 [en línea]Universidad Politécnica de Catalunya, 1998.
- BRUCE, Nausha y Marko Oystein. La corrosión: La lucha más extensa. [En línea]. (mayo). [Consultado: junio 12 2019]. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/03-corrosion-spanish>
- CABELLO, Gabriela. Desarrollo de pinturas anticorrosivas de bajo impacto ambiental. [en línea]Universidad Nacional de la Plata, 1998. 11 p.
- CALLE, Marco. Influencia de la granulometría y el tipo de cemento en la contracción por secado de morteros estructurales [en línea]Universidad de Piura, 2018. 20 p.
- CARVAJAL, Camila CORTES, Gabriela. Evaluación del uso de aditivos sobre la mezcla convencional de concreto en morteros de cemento ART para el aumento de su resistencia. [en línea]Universidad de América, 2019. 46 p.

CARVAJAL, María y CORTES, Gabriela. Evaluación del uso de aditivos sobre la mezcla convencional de concreto en morteros de cemento art para el aumento de su resistencia [en línea] Fundación universidad de América, 2019.

CUERVO, Joaquín; DELGADO Juan y HERRERA Francisco. Inhibidores de los costos de la corrosión en Colombia. [En línea]. Universidad de Antioquia. [Consultado: junio 19 2020]. Disponible en: http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/5327/1/CuervoJoaquin_1998_IndicadoresCostosCorrosi%C3%B3n.pdf

CYM Materiales -SA. Preparación de superficie - Norma SSPC. Argentina: CYM, 2015. pp. 1-7.

CYMPER. Morteros de reparación con inhibidores de corrosión. [En línea]. [Consultado: 30/03/2020]. Disponible en: <https://www.cymper.com/blog/morteros-de-reparacion-con-inhibidores-de-corrosion/>

DEL AMO, B., *et al.* High performance water-based paints with non-toxic anticorrosive pigments. *Progress in Organic Coatings*. 2002, vol. 45, nro. 4. pp. 389-397

FRANCIA, Samuel. Protección catódica - Diseño de ánodos de sacrificio. *Revista del instituto de investigación FIGMMG*. 2004, vol. 7, nro. 13. pp. 40

GIRON, Rosa. Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería - Barcelona, 2006. 15 p.

GONZALES, Juan. <> "Propiedades de las pinturas " [Correo Electrónico]. Agosto 10 de 2020.

Grupo de investigación ACI de la Universidad Nacional de Trujillo. Ensayo de resistencia del concreto a la penetración del cloruro - ASTM C 1202 // ACI UNT. [<https://www.youtube.com/watch?v=DMRI-ppSyf4>]. 2018

GUERRA, Santiago. Desarrollo y caracterización de nano estructuras de TiO₂ sobre la aleación Ti6Al4V mediante el proceso de anodizado [en línea]Universidad de las fuerzas armadas, 2018. 3 p.

GUERRERO CASTRO, Cristian. Practica VI: Ensayos de resistencia a compresión, flexión y tensión de morteros. [En línea]. Universidad del Cauca. [Consultado: 29/3/2020]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/cguerrerocastro/resistencia-practica-6>

GUIDICE, Carlos y PEREYRA, Andrea. Protección catódica con ánodos galvánicos [en línea]Universidad tecnológica Nacional. Facultad regional la plata, 25 p.

GUIDICE, Carlos y PEREYRA, Andrea. Tecnología de pinturas y recubrimientos. Argentina: Editorial de la universidad tecnológica Nacional - Argentina, 2009. 2-12 p.

GUTIERREZ DE LOPEZ, Libia. El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción. En: ARANGO, Roberto ALONSO, Nelson, ed. *Agregados*. Manizales: Sede Manizales, 2003a. pp. 9

GUTIERREZ DE LOPEZ, Libia. El concreto y otros materiales para la construcción. 2nd ed. Centro de publicaciones, 2003b.

GUZMAN, Andrés. Evaluación de la resistencia a la corrosión de sistemas de recubrimientos con altos sólidos por medio de espectroscopia de impedancia electro química [en línea]Universidad Nacional de Colombia, 2011. 32 p.

HERNANDEZ, Angélica. Evaluación del desempeño de ánodos galvánicos Zn-22Al con 2, 4, 6% en peso de Ag para protección catódica [en línea]Universidad autónoma de San Luis Potosí, 2008. 18 p.

ICONTEC. Norma técnica colombiana 6166. ICONTEC. [en línea]. Colombia. 2016., [Consultado Agosto, 2020].

ICONTEC. Norma técnica colombiana NTC 1486. ICONTEC. [en línea]. Colombia. 2019., pp. 14. [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_15/recursos/01_general/09062014/n_icontec.pdf.

IERE. Análisis del ciclo de vida de las tuberías de agua y alcantarillado de PVC y análisis comparativo de la sustentabilidad de los materiales de la tubería. [En línea]. Sustainable solutions. (abril). [Consultado: Julio 30 de 2020]. Disponible en: https://www.unibell.org/portals/0/resourcefile/Analisis_del_Ciclo_de_Vida_de_las_Tuberias_de_Agua_y_Alcantarillado_de_PVC_y_Analisis_Comparativo_de_la_Sustentabilidad_de_los_Materiales_de_las_Tuberias.pdf

INGEMECANICA. Sistema de pintado y protección del acero. [En línea]. Sistemas de pintado. [Consultado: Julio 20 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn103.html>

J.A. Sciortino. Construcción y mantenimiento de puertos y desembarcaderos para buques pesqueros. [En línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma. [Consultado: junio 30 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/v5270s/V5270S00.htm#TOC>

JARVIS, Fernando. El cemento y sus tipos. [En línea]. Instituto de promocio Cerámica. (octubre 31). [Consultado: junio 19 2020]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/JarvisFernando/cemento-y-sustipos>

LAFORGIA, Juan. Control de procedimiento de pintado de tanques de almacenamiento de combustible. Capítulo 2. [en línea]Escuela superior politécnica del Litoral, 1998. 23 p.

LEONE, Diego y GIORDANI, Claudio. CEMENTOS. [En línea]. Universidad tecnológica nacional. Facultad regional el Rosario. [Consultado: junio 12 2019]. Disponible

en: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_ano/civil1/files/IC%20I-Cementos\(1\).pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_ano/civil1/files/IC%20I-Cementos(1).pdf)

LOACHAMIN, Jefferson. Diseño y simulación de protección catódica en la industria petrolera [en línea]Universidad Politécnica Salesiana. Sede Quito, 2019. 5 p.

LOPEZ PERALES, Jesús. Resistencia de materiales. Tema 9: Morteros. [En línea]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. (junio). [Consultado: 22/3/2020]. Disponible

en: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf

LOPEZ, Jesús. Resistencia de materiales. Tema 9: Morteros. [En línea]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. [En línea]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. [Consultado: marzo 3 de 2020]. Disponible

en: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf

MARTINEZ, Jaime y RUANO, José. Implementación del sistema de protección catódica para el fondo de los tanques de la ampliación en la refinería de Barrancabermeja. Bogotá: 2014. pp. 50.

MATTIO, María. La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón - Parte I. Córdoba: 2014. pp. 9-40.

Mecanismos de protección anticorrosiva del aluminio mediante recubrimientos de pintura formuladas con pigmentos de intercambio iónico. [en línea]Universidad Complutense de Madrid, 2011. 14 p.

MENDOZA, Juan; DURAN, Rubén y GENESCA, Joan. Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión. México: 2012. pp. 30.

NEURTEK INSTRUMENTS. Medidor de espesores de capa seca y capa húmeda. [En línea]. NEURTEK INSTRUMENTS. [Consultado: agosto 10 de 2020]. Disponible en: <https://www.neurtek.com/es/pintura-recubrimientos/medidor-espesores-pintura>

NORIEGA, María; FLORES, Santiago y CAPRIERA, Juan. Formulación y comportamiento de pinturas anticorrosivas acrílicas a base de agua. *Revista de química*. 2004, vol. 18, nro. 1. pp. 5-6

NUÑEZ, Eduardo. Recubrimiento epóxico para combatir la corrosión. *Mundo HVCAC&R*.

OROZCO, Ricardo. Recubrimientos anticorrosivos. [En línea]. Unidad anticorrosión. [Consultado: Julio 01 2020]. Disponible

en: <https://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/05/6-UNIDAD-4-RECUBRIMIENTOS-ANTICORROSIVOS-INICIO.pdf>

PALACIOS, Mercedes. Características y ensayos de corrosión de pinturas modificadas con polímeros conductores [en línea]Escuela técnica superior de ingeniería-Barcelona, 2006. 80 p.

PEREZ, José, *et al.* Evaluación del desempeño de ánodos de sacrificio localizados y empleados en la rehabilitación de estructuras de concreto: Resultados preliminares. México: Sanfandila, 2017. pp. 12.

RAMIREZ, Carlos. Protección catódica contra la corrosión del gasoducto Lumbier - Beraian - Urroz [en línea]Escuela técnica superior de Ingenieros industriales y de telecomunicación, 2014. 119 p.

RENDON, José. Protección contra la corrosión en tuberías. [En línea]. (febrero 13). [Consultado: junio 19 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/13987860/PROTECCI%C3%93N_CONTRA_LA_CORROSI%C3%93N_EN_TUBER%C3%8DAS

RIVERA, Gerardo. Tecnología de concreto y mortero. Unicauca: 2015. 77 p.

RODIRGUEZ, Teresa. Formulación y evaluación de imprimaciones epoxi anticorrosivas curables a temperatura ambiente [en línea] Universitat Jaume I, 2004.

RODRIGUEZ, Cesar del Olmo. Los morteros. Control de calidad. España: 67-68, 1994.

SALAZAR, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Scielo*. 2015, vol. 28, nro. 3. pp. 128-134

SARMIENTO, Carlos y ARENAS, Julián. Evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con cenizas de localizaciones petroleras. [en línea] Universidad Pontificia Bolivariana, 2012.

SIKA. Manual de recubrimientos para metal. Colombia: Elaborado por Sika, 2015a. pp. 1-172.

SIKA. Preparación de superficies metálicas. Colombia: Elaborado por Sika, 2015b. pp. 1-16.

SOSA, Adrián. Administración de la corrosión externa en ductos: Estudio en laboratorio [en línea]Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, 2013.

SPOT, Michael y WOJTAROWICZ, Maggie. Metakaolin Study. *Eco Smart Concrete Project*. 2003, pp. 12

TERRAZAS, Miriam. Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor [en línea]Centro de investigación en materiales avanzados, 2021. 26 p.

RUIZ, Pedro. Universidad Nacional. Absorción y peso específico de agregados. [En línea]. Mecánica de suelos. Ingeniería civil. [Consultado: 29/03/2020]. Disponible en: <https://www.studocu.com/es/document/universidad-nacional-pedro-ruiz-gallo/mecanica-de-suelos/informe/absorcion-y-peso-especifico-del-agregado/5203298/view>

VASQUEZ, José. Empleo de la técnica de Espectroscopía de impedancias electroquímicas para la caracterización de biomateriales. Aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo [en línea]Universidad Politécnica de Valencia, 2007. 9 p.

VERGARA, Wilson. <> "Medidas de tubería " [Correo Electrónico]. Agosto 2020.

WADE, L. Química orgánica III. [En línea]. Universidad Autónoma metropolitana unidad Iztapalapa. [Consultado: Julio 3 de 2020]. Disponible en: http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/cfmc/Quimica_Organica_III/Aminas_QO3.pdf

ANEXOS.

ANEXO A. INFORMACION IMPRIMANTE RICO EN CINCO.

Imagen 18. Hoja técnica imprimante rico en cinc.



HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO Imprimante Epóxico Fosfato de Cinc

137057

DESCRIPCIÓN	Imprimante Epóxico Fosfato de Cinc es un recubrimiento de dos componentes con base en resinas epóxicas y endurecedor poliamida, no contiene pigmentos con base de cromato de cinc ni minio.
USOS	Como imprimante para estructuras metálicas, expuestas a ambientes agresivos industriales y marinos.
VENTAJAS	Buena adherencia al soporte, resistencia química y resistencia a la abrasión. Ecológico y Atóxico
MODO DE EMPLEO	Preparación de la superficie La superficie debe estar limpia, seca, libre de óxido, cascarilla de laminación, pinturas en mal estado y demás contaminantes que puedan interferir con la adherencia del producto. Método de limpieza Realizar limpieza mecánica según norma SSPC-SP3 ó con chorro abrasivo hasta obtener grado comercial (SPC-SP6) de acuerdo con las normas internacionales. Para interior de tanques ó tuberías enterradas se requiere limpieza agrado metal blanco (SSPC-SP5). El perfil de anclaje recomendado debe estar entre 1.5 y 3.0 mils (38 y 75 micrones). Preparación del producto Agitar cada componente en su empaque. Verter el componente B (Catalizador Ref. 138007) sobre el componente A (13-70-57) en relación de 1:1 (A:B). Mezclar manualmente o con agitador de bajas revoluciones (400 rpm) hasta obtener una mezcla homogénea. Evitar usar espátulas o paletas contaminadas con el componente B o con la mezcla, para agitar o mezclar el componente A que no esté usando. Aplicación Aplicar con brocha o pistola convencional o airless. Aplicar con brocha de cerda animal y no de Nylon. Aspersión convencional: Se requiere pistola De Vilbiss JGA-510 con paso de fluido "E" y copa de aire No. 704, No. 765. Aspersión sin aire: Utilizar toberas con orificios de 15 a 27 mils, dependiendo de la presión de la bomba. El tiempo de aplicación entre capas debe ser de 12 a 18 horas a una temperatura de 25°C.

Imagen 18. (Continuación).

	<p>Rendimiento Teórico 90 m²/galón a un espesor de película seca de 25,4 micrones (1,0 mils). El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etc.</p>																																												
DATOS TÉCNICOS	<table> <tr> <td>Color</td> <td>Marrón</td> </tr> <tr> <td>Densidad (ASTM D1475):</td> <td>5,3 ± 0,2 kg/gal</td> </tr> <tr> <td>Viscosidad (ASTM D562)</td> <td>97 ± 4 Unidades Krebs 25°C</td> </tr> <tr> <td>Relación de mezcla:</td> <td>1:1 en volumen</td> </tr> <tr> <td>Disolvente recomendado</td> <td>Colmasolvente Epóxico ref. 958025</td> </tr> <tr> <td>Espesor de película seca recomendado por capa (SSPC-PA2):</td> <td>3,5 a 4,0 mils (88,9 a 102 micrones)</td> </tr> <tr> <td>% Sólidos en volumen (ASTM D2697)</td> <td>60 ± 2</td> </tr> <tr> <td>Vehículo</td> <td>Resina epóxica y poliámidas</td> </tr> <tr> <td>Pigmentos de cinc</td> <td>Oxido de hierro e inertes, Fosfato molibdato</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Límites de aplicación</td> </tr> <tr> <td>Humedad relativa máx.</td> <td>90%</td> </tr> <tr> <td>Temp. ambiente mín. de aplicación:</td> <td>11°C</td> </tr> <tr> <td>Temp. mín. del soporte:</td> <td>10°C y 3°C por encima de la temp de rocío</td> </tr> <tr> <td>Temperatura máxima del soporte</td> <td>50°C</td> </tr> <tr> <td>Temperatura máxima de servicio</td> <td>Calor húmedo 90°C Calor seco 110°C</td> </tr> <tr> <td>Tiempo de secado a 25°C (ASTM D1640)</td> <td>Al tacto 1 hora Repinte 12 a 18 horas</td> </tr> <tr> <td>Tiempo de vida de la mezcla</td> <td>8 horas a 25°C</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Resistencias químicas</td> </tr> <tr> <td>Álcalis, Ácidos, Petróleo:</td> <td>Excelente</td> </tr> <tr> <td>Agua dulce/salada:</td> <td>Excelente</td> </tr> <tr> <td>VOC (ASTM D3960):</td> <td>< 400 g/l</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Otras sustancias consultar con nuestros asesores técnicos.</td> </tr> </table>	Color	Marrón	Densidad (ASTM D1475):	5,3 ± 0,2 kg/gal	Viscosidad (ASTM D562)	97 ± 4 Unidades Krebs 25°C	Relación de mezcla:	1:1 en volumen	Disolvente recomendado	Colmasolvente Epóxico ref. 958025	Espesor de película seca recomendado por capa (SSPC-PA2):	3,5 a 4,0 mils (88,9 a 102 micrones)	% Sólidos en volumen (ASTM D2697)	60 ± 2	Vehículo	Resina epóxica y poliámidas	Pigmentos de cinc	Oxido de hierro e inertes, Fosfato molibdato	Límites de aplicación		Humedad relativa máx.	90%	Temp. ambiente mín. de aplicación:	11°C	Temp. mín. del soporte:	10°C y 3°C por encima de la temp de rocío	Temperatura máxima del soporte	50°C	Temperatura máxima de servicio	Calor húmedo 90°C Calor seco 110°C	Tiempo de secado a 25°C (ASTM D1640)	Al tacto 1 hora Repinte 12 a 18 horas	Tiempo de vida de la mezcla	8 horas a 25°C	Resistencias químicas		Álcalis, Ácidos, Petróleo:	Excelente	Agua dulce/salada:	Excelente	VOC (ASTM D3960):	< 400 g/l	Otras sustancias consultar con nuestros asesores técnicos.	
Color	Marrón																																												
Densidad (ASTM D1475):	5,3 ± 0,2 kg/gal																																												
Viscosidad (ASTM D562)	97 ± 4 Unidades Krebs 25°C																																												
Relación de mezcla:	1:1 en volumen																																												
Disolvente recomendado	Colmasolvente Epóxico ref. 958025																																												
Espesor de película seca recomendado por capa (SSPC-PA2):	3,5 a 4,0 mils (88,9 a 102 micrones)																																												
% Sólidos en volumen (ASTM D2697)	60 ± 2																																												
Vehículo	Resina epóxica y poliámidas																																												
Pigmentos de cinc	Oxido de hierro e inertes, Fosfato molibdato																																												
Límites de aplicación																																													
Humedad relativa máx.	90%																																												
Temp. ambiente mín. de aplicación:	11°C																																												
Temp. mín. del soporte:	10°C y 3°C por encima de la temp de rocío																																												
Temperatura máxima del soporte	50°C																																												
Temperatura máxima de servicio	Calor húmedo 90°C Calor seco 110°C																																												
Tiempo de secado a 25°C (ASTM D1640)	Al tacto 1 hora Repinte 12 a 18 horas																																												
Tiempo de vida de la mezcla	8 horas a 25°C																																												
Resistencias químicas																																													
Álcalis, Ácidos, Petróleo:	Excelente																																												
Agua dulce/salada:	Excelente																																												
VOC (ASTM D3960):	< 400 g/l																																												
Otras sustancias consultar con nuestros asesores técnicos.																																													
PRECAUCIONES	<p>Una vez mezclados los dos componentes, el producto resultante debe usarse dentro de las 8 horas siguientes. Este tiempo puede disminuir si la temperatura ambiente es mayor a 25°C.</p> <p>Notas: Entre lote y lote se pueden presentar ligeras diferencias de color. Cuando está en contacto con algunas sustancias químicas agresivas puede cambiar de color dependiendo de las características del agente agresor. Todos los sistemas epóxicos cuando se encuentran a la intemperie sufren el fenómeno de degradación de color y entizamiento, el cual no afecta las propiedades químicas de estos. Cuando los epóxicos se exponen a los rayos UV se pueden generar cambios de color, siendo especialmente notorio en los tonos intensos. Para evitar este fenómeno, se debe aplicar una capa de acabado con Esmalte Uretano, Serie 36. Proteger de la lluvia durante 6 horas después de aplicado.</p>																																												
MEDIDAS DE SEGURIDAD	<p>Manténgase fuera del alcance de los niños. Aplicar en sitios con buena ventilación o proveer ventilación forzada cuando se aplique en áreas encerradas. Contiene vapores orgánicos, utilizar máscara de protección para gases y vapores. El equipo de aplicación debe ser a prueba de explosión. En caso de contacto con la piel, limpiarse con una estopa humedecida en Colmasolvente Epóxico referencia 958025 y luego lavarse con abundante agua y jabón. Consultar hoja de seguridad del producto. Cuando se aplique en áreas cerradas, se recomienda usar equipos de aplicación a prueba de explosión.</p>																																												
PRESENTACIÓN	Comp. A: 1 galón (Ref. 137057) Comp. B: 1 galón (Ref. 138007)																																												
ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE	El tiempo de almacenamiento es de 12 meses, en sitio fresco y bajo techo, en el envase original bien cerrado. Transportar con las precauciones normales para productos químicos.																																												

Fuente: SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 121.

ANEXO B. INFORMACION COALTAR EPÓXICO.

Imagen 19. Hoja técnica coaltar epóxico.



HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO Coaltar Epóxico

786502

DESCRIPCIÓN	El Coaltar Epóxico es un recubrimiento de dos componentes con base en resinas epóxicas y alquitrán de hulla y curador tipo amina alifática. Contiene solventes.
USOS	<p>Como recubrimiento de alto desempeño para superficies que van a estar en inmersión permanente o continua en aguas residuales, aguas de mar o suelos altamente agresivos.</p> <p>Para la protección de cascos de buques, tuberías, torres de enfriamiento.</p> <p>Para el interior y el exterior de tanques, tuberías y pilotes de plataforma submarina.</p> <p>Para inmersión en agua dulce y salada.</p> <p>Para el interior de tanques metálicos que contienen crudo de petróleo.</p> <p>Para la protección del exterior de tuberías metálicas enterradas.</p>
VENTAJAS	<p>Buena resistencia química y mecánica.</p> <p>Permite aplicarse como auto imprimante.</p>
MODO DE EMPLEO	<p>Preparación de la Superficie</p> <p>Todas las superficies deben estar libres de polvo, mugre, humedad, grasa, partículas sueltas y otros contaminantes que puedan interferir con la adherencia del recubrimiento.</p> <p>Empleado como auto imprimante debe aplicarse sobre acero limpio preparado con chorro abrasivo hasta mínimo grado comercial según la norma americana SSPC-SP6 con un perfil de anclaje entre 1.5 y 2.5 mils.</p> <p>Preparación del Producto</p> <p>La relación en volumen de la mezcla es de 4:1. Homogeneizar previamente cada componente en su envase.</p> <p>Verter completamente el componente B (Catalizador GRUPO 2), sobre el componente A, mezclar manualmente o con un taladro de bajas revoluciones (máximo 400 rpm) hasta obtener una mezcla homogénea y de color uniforme.</p> <p>Una vez mezclados los componentes, el producto resultante debe usarse dentro de las 8 horas siguientes: este tiempo disminuye si la temperatura ambiente es superior a 25°C.</p> <p>Aplicación</p> <p>El producto se aplica con brocha, rodillo, con equipo convencional o airless.</p> <p>Cuando se aplique con brocha, ésta debe ser de cerda animal y no de nylon.</p> <p>Para la aplicación con pistola convencional, se puede diluir como máximo con 1/8 de Colmasolvente Epóxico referencia 958025.</p> <p>El tiempo entre capas debe ser de 6 a 12 horas y antes de 48 horas; pasado este tiempo debe promoverse el perfil de anclaje mediante lijado, Brush-Off y activación con Colmasolvente Epóxico, referencia 958025. El curado completo se logra después de</p>

Imagen 19. (Continuación).

4 días a 25°C y 50% de humedad relativa. Las herramientas y equipos se limpian con **Colmasolvente Epóxico** referencia 958025, antes de que el producto haya secado.

Rendimiento Teórico

111 m²/galón a un espesor de película seca de 25,4 micrones (1,0 mils).

El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etc.

DATOS TÉCNICOS

Color:	Negro
Acabado:	Brillante
Densidad (ASTM D1475):	4.95 ± 0,2 kg/gal
Espesor de película seca recomendado por capa (SSPC-SA2):	3.5 a 4.0 mils (89 a 100 micrones)
Viscosidad a 25°C (ASTM D562):	115 ± 3 unidades Krebs
Vida útil de la mezcla:	5 horas a 20°C
Endurecimiento final:	4 días a 25°C
Solventes:	Aromáticos
Flash Point:	27°C
% Sólidos en volumen (ASTM D2697):	74 ± 2
Relación de mezcla en volumen:	4:1
Límites de aplicación	
Humedad Relativa máx.:	90%
Temperatura mín. de aplicación:	10°C
Temp. mín. del soporte:	10°C y 3°C por encima de la temp de rocío
Temp. máx. del soporte:	50°C
Temp. máx. de servicio:	Calor seco 110°C Calor húmedo 90°C
Tiempo de secado a 25°C (ASTM D1640):	Al tacto: 1a 2 horas Repinte: 16 a 24 horas
Tiempo de vida de la mezcla en el recipiente:	2 horas a 25°C
Imprimante Recomendado:	Serie 13, serie 100, serie 200, serie 300
Resistencias:	
Intemperie:	Buena (entiza)
Alcalis:	Excelente
Acidos:	Buena
Inmersión agua industrial:	Excelente
Inmersión agua salada:	Excelente
Pérdida a la abrasión(ASTM D 4060)	75 mgs, rueda CS10, 1000 ciclos, con un peso de 1 kg
Productos derivados del petróleo:	Excelente
VOC (ASTM D3960):	< 250 g/l
Consultar con nuestros asesores técnicos su caso específico.	

PRECAUCIONES

No se recomienda para el interior de tanques que van a contener agua potable. Mezcle únicamente la cantidad de producto que pueda aplicar entre 6 y 8 horas, a 25°C. Todos los sistemas epóxicos cuando se encuentran a la intemperie sufren el fenómeno de entizamiento el cual no afecta las propiedades químicas y mecánicas de éstos. Adicionalmente, el 786502 toma una coloración marrón durante el proceso de curado cuando hay presencia de alta humedad. Mantenga los productos alejados de fuente de calor, chispas o exposición de llamas abiertas. Evite el contacto con los ojos.

MEDIDAS DE SEGURIDAD

Coaltar Epóxico, contiene endurecedores nocivos antes del curado final del producto. Evitar el contacto con la piel y utilice gafas para aplicación. En caso de contacto con los ojos lavar con abundante agua tibia y acudir a un medico. **Coaltar Epóxico** contiene solventes: provea de ventilación adecuada en recintos cerrados durante la aplicación del producto. Consulte Hoja de Seguridad del Producto. Cuando se aplique en áreas cerradas, se recomienda usar equipos de aplicación a prueba de explosión.

Fuente: SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 125.

ANEXO C. INFORMACION IMPRIMANTE FOSFATO DE CINC.

Imagen 20. Hoja técnica imprimante epoxi fosfato de cinc.



HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO

Imprimante Epóxico Fosfato de Cinc

137057

DESCRIPCIÓN	Imprimante Epóxico Fosfato de Cinc es un recubrimiento de dos componentes con base en resinas epóxicas y endurecedor poliamida, no contiene pigmentos con base de cromato de cinc ni minio.
USOS	Como imprimante para estructuras metálicas, expuestas a ambientes agresivos industriales y marinos.
VENTAJAS	Buena adherencia al soporte, resistencia química y resistencia a la abrasión. Ecológico y Atóxico
MODO DE EMPLEO	<p>Preparación de la superficie La superficie debe estar limpia, seca, libre de óxido, cascarilla de laminación, pinturas en mal estado y demás contaminantes que puedan interferir con la adherencia del producto.</p> <p>Método de limpieza Realizar limpieza mecánica según norma SSPC-SP3 ó con chorro abrasivo hasta obtener grado comercial (SPC-SP6) de acuerdo con las normas internacionales. Para interior de tanques ó tuberías enterradas se requiere limpieza agrado metal blanco (SSPC-SP5). El perfil de anclaje recomendado debe estar entre 1.5 y 3.0 mils (38 y 75 micrones).</p> <p>Preparación del producto Agitar cada componente en su empaque. Verter el componente B (Catalizador Ref. 138007) sobre el componente A (13-70-57) en relación de 1:1 (A:B). Mezclar manualmente o con agitador de bajas revoluciones (400 rpm) hasta obtener una mezcla homogénea. Evitar usar espátulas o paletas contaminadas con el componente B o con la mezcla, para agitar o mezclar el componente A que no esté usando.</p> <p>Aplicación Aplicar con brocha o pistola convencional o airless. Aplicar con brocha de cerda animal y no de Nylon. Aspersión convencional: Se requiere pistola De Wilbiss JGA-510 con paso de fluido "E" y copa de aire No. 704, No. 765. Aspersión sin aire: Utilizar toberas con orificios de 15 a 27 mils, dependiendo de la presión de la bomba. El tiempo de aplicación entre capas debe ser de 12 a 18 horas a una temperatura de 25°C.</p> <p>Usar el Colmasolvente Epóxico, referencia 958025 para diluir si es necesario o para lavar los equipos. Aplicar el número de capas necesarias para obtener el espesor de película seca requerido de acuerdo con la recomendación dada para el caso.</p>

Imagen 20. (Continuación).

	Rendimiento Teórico 90 m ² /galón a un espesor de película seca de 25,4 micrones (1,0 mils). El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etc.																																												
DATOS TÉCNICOS	<table><tr><td>Color</td><td>Marrón</td></tr><tr><td>Densidad (ASTM D1475):</td><td>5,3 ± 0,2 kg/gal</td></tr><tr><td>Viscosidad (ASTM D562)</td><td>97 ± 4 Unidades Krebs 25°C</td></tr><tr><td>Relación de mezcla:</td><td>1:1 en volumen</td></tr><tr><td>Disolvente recomendado</td><td>Colmasolvente Epóxico ref. 958025</td></tr><tr><td>Espesor de película seca recomendado por capa (SSPC-PA2):</td><td>3,5 a 4,0 mils (88,9 a 102 micrones)</td></tr><tr><td>% Sólidos en volumen (ASTM D2697)</td><td>60 ± 2</td></tr><tr><td>Vehículo</td><td>Resina epóxica y poliámidas</td></tr><tr><td>Pigmentos</td><td>Oxido de hierro e inertes, Fosfato molibdato de cinc</td></tr><tr><td colspan="2">Límites de aplicación</td></tr><tr><td>Humedad relativa máx.</td><td>90%</td></tr><tr><td>Temp. ambiente mín. de aplicación:</td><td>11°C</td></tr><tr><td>Temp. mín. del soporte:</td><td>10°C y 3°C por encima de la temp de rocío</td></tr><tr><td>Temperatura máxima del soporte</td><td>50°C</td></tr><tr><td>Temperatura máxima de servicio</td><td>Calor húmedo 90°C Calor seco 110°C</td></tr><tr><td>Tiempo de secado a 25°C (ASTM D1640)</td><td>Al tacto 1 hora Repinte 12 a 18 horas</td></tr><tr><td>Tiempo de vida de la mezcla</td><td>8 horas a 25°C</td></tr><tr><td>Resistencias químicas</td><td></td></tr><tr><td>Alcalis, Acidos, Petróleo:</td><td>Excelente</td></tr><tr><td>Agua dulce/salada:</td><td>Excelente</td></tr><tr><td>VOC (ASTM D3960):</td><td>< 400 g/l</td></tr><tr><td>Otras sustancias consultar con nuestros asesores técnicos.</td><td></td></tr></table>	Color	Marrón	Densidad (ASTM D1475):	5,3 ± 0,2 kg/gal	Viscosidad (ASTM D562)	97 ± 4 Unidades Krebs 25°C	Relación de mezcla:	1:1 en volumen	Disolvente recomendado	Colmasolvente Epóxico ref. 958025	Espesor de película seca recomendado por capa (SSPC-PA2):	3,5 a 4,0 mils (88,9 a 102 micrones)	% Sólidos en volumen (ASTM D2697)	60 ± 2	Vehículo	Resina epóxica y poliámidas	Pigmentos	Oxido de hierro e inertes, Fosfato molibdato de cinc	Límites de aplicación		Humedad relativa máx.	90%	Temp. ambiente mín. de aplicación:	11°C	Temp. mín. del soporte:	10°C y 3°C por encima de la temp de rocío	Temperatura máxima del soporte	50°C	Temperatura máxima de servicio	Calor húmedo 90°C Calor seco 110°C	Tiempo de secado a 25°C (ASTM D1640)	Al tacto 1 hora Repinte 12 a 18 horas	Tiempo de vida de la mezcla	8 horas a 25°C	Resistencias químicas		Alcalis, Acidos, Petróleo:	Excelente	Agua dulce/salada:	Excelente	VOC (ASTM D3960):	< 400 g/l	Otras sustancias consultar con nuestros asesores técnicos.	
Color	Marrón																																												
Densidad (ASTM D1475):	5,3 ± 0,2 kg/gal																																												
Viscosidad (ASTM D562)	97 ± 4 Unidades Krebs 25°C																																												
Relación de mezcla:	1:1 en volumen																																												
Disolvente recomendado	Colmasolvente Epóxico ref. 958025																																												
Espesor de película seca recomendado por capa (SSPC-PA2):	3,5 a 4,0 mils (88,9 a 102 micrones)																																												
% Sólidos en volumen (ASTM D2697)	60 ± 2																																												
Vehículo	Resina epóxica y poliámidas																																												
Pigmentos	Oxido de hierro e inertes, Fosfato molibdato de cinc																																												
Límites de aplicación																																													
Humedad relativa máx.	90%																																												
Temp. ambiente mín. de aplicación:	11°C																																												
Temp. mín. del soporte:	10°C y 3°C por encima de la temp de rocío																																												
Temperatura máxima del soporte	50°C																																												
Temperatura máxima de servicio	Calor húmedo 90°C Calor seco 110°C																																												
Tiempo de secado a 25°C (ASTM D1640)	Al tacto 1 hora Repinte 12 a 18 horas																																												
Tiempo de vida de la mezcla	8 horas a 25°C																																												
Resistencias químicas																																													
Alcalis, Acidos, Petróleo:	Excelente																																												
Agua dulce/salada:	Excelente																																												
VOC (ASTM D3960):	< 400 g/l																																												
Otras sustancias consultar con nuestros asesores técnicos.																																													
PRECAUCIONES	Una vez mezclados los dos componentes, el producto resultante debe usarse dentro de las 8 horas siguientes. Este tiempo puede disminuir si la temperatura ambiente es mayor a 25°C. Notas: Entre lote y lote se pueden presentar ligeras diferencias de color. Cuando está en contacto con algunas sustancias químicas agresivas puede cambiar de color dependiendo de las características del agente agresor. Todos los sistemas epóxicos cuando se encuentran a la intemperie sufren el fenómeno de degradación de color y entizamiento, el cual no afecta las propiedades químicas de estos. Cuando los epóxicos se exponen a los rayos UV se pueden generar cambios de color, siendo especialmente notorio en los tonos intensos. Para evitar este fenómeno, se debe aplicar una capa de acabado con Esmalte Uretano , Serie 36. Proteger de la lluvia durante 6 horas después de aplicado.																																												
MEDIDAS DE SEGURIDAD	Manténgase fuera del alcance de los niños. Aplicar en sitios con buena ventilación o proveer ventilación forzada cuando se aplique en áreas encerradas. Contiene vapores orgánicos, utilizar máscara de protección para gases y vapores. El equipo de aplicación debe ser a prueba de explosión. En caso de contacto con la piel, limpiarse con una estopa humedecida en Colmasolvente Epóxico referencia 958025 y luego lavarse con abundante agua y jabón. Consultar hoja de seguridad del producto. Cuando se aplique en áreas cerradas, se recomienda usar equipos de aplicación a prueba de explosión.																																												
PRESENTACIÓN	Comp. A: 1 galón (Ref. 137057) Comp. B: 1 galón (Ref. 138007)																																												
ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE	El tiempo de almacenamiento es de 12 meses, en sitio fresco y bajo techo, en el envase original bien cerrado. Transportar con las precauciones normales para productos químicos.																																												

Fuente: SIKA. Manual de recubrimientos para metal. [En línea]. Construyendo confianza - SIKA. (Edición). [Consultado: Julio 24 2020]. Disponible en: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ed08f680-27a5-357c-8265-06bdc49302d7/Manual%20Recubrimientos%202012.pdf> p. 44.

**ANEXO D.
DOSIFICACIÓN DE AGUA, ARENA Y CEMENTO PARA LA EMPRESA TUBOS
SDI.**

Imagen 21. Tabla dosificación revestimiento exterior.

DOSIFICACIONES REVESTIMIENTO EXTERIOR PARA TUBOS DE LONGITUD = 6 METROS				
DIAMETRO DEL TUBO (PULGADAS)	DOSIFICADOR DE ARENA LLENO	BULTOS DE CEMENTO	AGUA LITROS	VISCOCRETE LITROS
10	3	2	23	0,4
12	3 1/2	2 1/2	27	0,5
14	4	2 1/2	30	0,6
16	4 1/2	3	34	0,7
18	5	3 1/2	39	0,7
20	5 1/2	3 1/2	43	0,8
21	6	4	44	0,9
24	6 1/2	4 1/2	50	1,0
27	7	5	56	1,1
30	8	5 1/2	61	1,2
33	9	6	67	1,3
36	9 1/2	6 1/2	73	1,4
39	10	6 1/2	78	1,5
42	11	7	84	1,6
45	12	7 1/2	89	1,7
48	12 1/2	8	95	1,8
51	13	8 1/2	101	1,9
54	14	9	106	2,1
57	14 1/2	9 1/2	112	2,2
60	15 1/2	10	117	2,3
66	17	11	129	2,5
72	18 1/2	12	140	2,7

Fuente: Empresa Tubos SDI. Soluciones en Diseño e ingeniería S.A