

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN POLIURETANO PRODUCIDO A
PARTIR DE ACEITE DE RICINO MODIFICADO CON GLICEROL COMO
RECUBRIMIENTO INDUSTRIAL.**

PAOLA KATHERINE CIFUENTES VÉLEZ

FERNANDO SARMIENTO SOTO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA CORROSIÓN CIC

BUCARAMANGA

2012

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN POLIURETANO PRODUCIDO A
PARTIR DE ACEITE DE RICINO MODIFICADO CON GLICEROL COMO
RECUBRIMIENTO INDUSTRIAL.**

PAOLA KATHERINE CIFUENTES VÉLEZ

FERNANDO SARMIENTO SOTO

Trabajo presentado como requisito para
optar al título de Ingeniero Químico

Director

ÁLVARO RAMÍREZ GARCÍA

Ingeniero Químico, PhD

Codirector

LUIS ENRIQUE FUENTES PEREA

Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA CORROSIÓN CIC
BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander y a la Corporación para la Investigación de la Corrosión CIC por brindarnos la oportunidad de formarnos personal y profesionalmente.

Al director Álvaro Ramírez García, al codirector Luis Enrique Fuentes Perea, por su colaboración y orientación durante el desarrollo de este proyecto.

Al personal de la corporación para la investigación de la corrosión (CIC), a la UEN de Corrosión Externa en la línea tecnológica de recubrimientos y especialmente al Mg. Luis Carlos Rojas Laurens, al Mg Luis Ferney Vezga, al Ing. Mecánico Reinaldo Villalba y al Físico Robinson Almir Salamanca. Por brindarnos su asesoría técnica que permitió la correcta ejecución de este proyecto.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi padre mi guía mi camino y mi verdad durante toda mi vida.

A mi madre Alix Vélez por brindarme todo el apoyo la fe y la confianza que no solo necesite sino que necesitare hasta el final de mis días.

A mis hermanos José Miguel y Jesús Miguel que aunque pequeños siempre me dan la seguridad el amor y la paz de cualquier gigante.

A mi novio John Smith Barrios por ser mi inspiración, mi alegría, mi apoyo, mi consejero y mi calma en los momentos más difíciles.

A mi compañero de trabajo por estar siempre en el lugar correcto, corrigiéndome y alegrando los momentos más difíciles.

A Gladis Alfaro por ser mi amiga incondicional y más que una amiga ser una madre.

Este proyecto está dedicado a todas las personas que siempre dieron lo mejor de sí para que yo pudiera surgir día a día a pesar de todas las tormentas. Por esto y mucho más

GRACIAS A TODOS.

Paola Katherine Cifuentes Vélez.

DEDICATORIA

Dedicado al gran imperio de conciencia y disciplina,
Originado en los filiales afectos que fundamentan la crianza
Y que proviene de dos seres maravillosos, padre y madre,
Sobre los hombros de los cuales descansan las bases del hogar.

Dedicado a la eterna luz de esperanza,
Que brilla dentro de todos nosotros y que deslumbra
Cuando se espera el sueño de un mejor vivir.

Dedicado a los perseguidores de mi amistad,
Porque cada día lo disfrazan de las mejores cosas que pueden ser
Y por las cuales nos hemos unido para construir un mejor porvenir, una mejor patria,
una mejor vida.

Dedicado al amor que motivado desde mi yo interno ha forjado
La estabilidad sublime de un mejor yo para que dentro de mi amada
Se construya el lugar de los mejores sentimientos que miran juntos
La misma dirección, el mismo camino.

Dedicado a los potenciadores de esta tesis
Porque juntos hemos encontrado un mejor saber
Y finalmente hemos descubierto que por encima de los proyectos están en primer lugar
las personas.

Fernando Sarmiento Soto.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción

1.	Marco teórico.	20
2.	Metodología experimental.	23
3.	Resultados.	27
4.	Comparación PUAG3K vs recubrimientos comerciales.	36
5.	Conclusiones.	39
6.	Recomendaciones.	40
7.	Bibliografía.	41
8.	Anexos	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ficha técnica para la aplicación del poliuretano.....	27
Tabla 2. Resultado de ensayo de resistencia al impacto.	32
Tabla 3. Resultado ensayo de elongación.	33
Tabla 4. Resultado ensayo de resistencia a la abrasión.	33
Tabla 5. Resultado de ensayo de adherencia pull-off (mecánico).	34
Tabla 6. Resultado ensayo de permeabilidad al vapor de agua.	35
Tabla 7. Análisis del desempeño en ambientes simulados.....	36
Tabla 8. Análisis de la caracterización básica y físico mecánica	37
Tabla 9. Condiciones de ensayo cámara salina.....	45
Tabla 10. Condiciones del equipo cámara salina atlas CSF 850.....	45
Tabla 11. Tiempo de exposición vs factor Kiv promedio.....	46
Tabla 12. Tiempo de exposición vs Rpo	47
Tabla 13. Condiciones de ensayo cámara a Humedad Relativa 100%	48
Tabla 14. Condiciones de equipo para cámara a humedad relativa 100%.Atlas CSF 850.....	48
Tabla 15. Tiempo de exposición vs factor Kiv promedio.....	50
Tabla 16. Tiempo de exposición vs Rpo.	50
Tabla 17. Determinación Kiv factor zona.	51
Tabla 18. Determinación del Kiv factor tamaño.	52
Tabla 19. Determinación Kiv factor de densidad.....	52
Tabla 20. Condiciones de ensayo cámara de envejecimiento.	53
Tabla 21. Condiciones de equipo cámara de envejecimiento. Equipo Atlas Ci 4000	54
Tabla 22. Tiempo de exposición vs porcentaje de brillo (%).....	55
Tabla 23. Tiempo de exposición vs Rpo.	55
Tabla 24. Condiciones de ensayo prueba de resistencia al impacto.	57
Tabla 25. Valores de elongación por diámetro del mandril.	59

Tabla 26. Condiciones de ensayo prueba de elongación.	59
Tabla 27. Condiciones de ensayo prueba de abrasión.	60
Tabla 28. Condiciones de ensayo prueba de resistencia al desprendimiento catódico.....	62
Tabla 29. Criterios de aceptación prueba de resistencia al desprendimiento catódico.....	63
Tabla 30. Condiciones de ensayo impedancia electroquímica (EIS)	66
Tabla 31. Condiciones de ensayo prueba de adherencia pull-off	68
Tabla 32. Condiciones de ensayo prueba de permeabilidad al vapor de agua.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química del aceite de ricino.	20
Figura 2. Batería experimental.....	23
Figura 3. Comportamiento del factor Kiv en cupones fisurados.....	28
Figura 4. Comportamiento del logaritmo de la resistencia de poro rpo en cupones no fisurados.....	28
Figura 5. Comportamiento del factor Kiv en cupones fisurados.....	29
Figura 6. Comportamiento del logaritmo de la resistencia de poro Rpo en cupones no fisurados.....	29
Figura 7. Porcentaje de brillo en cupones no fisurados.	30
Figura 8. Comportamiento del logaritmo de la resistencia de poro Rpo en cupones no fisurados.....	31
Figura 9. Resultado de ensayo de resistencia al desprendimiento catódico.....	34
Figura 10. Cámara salina exterior e interior.....	46
Figura 11. Cámara a Humedad Relativa 100% exterior e interior.....	49
Figura 12. Cámara de envejecimiento exterior e interior.	55
Figura 13. Ensayo de resistencia al impacto.	57
Figura 14. Ensayo de elongación.....	59
Figura 15. Ensayo de resistencia a la abrasión.	61
Figura 16. Ensayo de resistencia al desprendimiento catódico.	63
Figura 17. Equipo detector de porosidades (Holiday).....	64
Figura 18. Equipo IM6, para ensayo de impedancia electroquímica (EIS).....	66
Figura 19. Celda de trabajo para impedancia electroquímica (EIS).....	66
Figura 20. Equipo medidor de espesores Positector 6000.....	67
Figura 21. Equipo de adherencia pull-off mecánico.....	68
Figura 22. Cámara a humedad relativa adecuada para ensayo de permeabilidad al vapor de agua.....	70

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	42
Anexo B	44
Anexo C	56
Anexo D	62
Anexo E	64

RESUMEN

TITULO

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN POLIURETANO PRODUCIDO A PARTIR DE ACEITE DE RICINO MODIFICADO CON GLICEROL COMO RECUBRIMIENTO INDUSTRIAL ** .

AUTORES

CIFUENTES VÉLEZ PAOLA KATHERINE**

SARMIENTO SOTO FERNANDO***

PALABRAS CLAVES:

Aceite de ricino, glicerol, poliuretano, recubrimiento.

RESUMEN.

En este proyecto se preparó un poliuretano producido a partir de aceite de ricino modificado por transesterificación con glicerol y se aplicó sobre sustratos de acero al carbono.

La limpieza del sustrato se realizó bajo los lineamientos de la norma SSPC-SP5 (limpieza abrasiva a grado metal blanco) y la aplicación del poliuretano fue hecha mediante brocha. Las probetas fueron expuestas a diferentes técnicas de evaluación y caracterización; para la evaluación se usó la cámara salina, cámara a Humedad Relativa 100% y Cámara de envejecimiento (Weather-o-Meter), la caracterización se llevo a cabo mediante los ensayos de elongación, resistencia al impacto, resistencia a la abrasión, permeabilidad al vapor de agua y adherencia. Cada uno de los ensayos se hizo utilizando el procedimiento descrito por las normas ASTM.

Los resultados obtenidos fueron comparados con la base de datos del sistema de gestión de conocimiento SHIREC de la Corporación para la Investigación de la Corrosión CIC, para validar su viabilidad técnica como recubrimiento anticorrosivo.

Mediante este estudio se encontró excelentes propiedades físico –mecánicas en el material propuesto, se determino la habilidad que tiene el poliuretano de mantenerse adherido a la superficie así como de ser una barrera eficiente al paso del vapor de agua.

El material propuesto no debe ser usado en aplicaciones de inmersión o enterramiento debido a que se encontró fallas cuando este se sometió a un sistema de protección catódica-recubrimiento.

** Proyecto de grado. Modalidad investigación.

*** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director Álvaro Ramírez García. Codirector, Ingeniero Químico Luis E. Fuentes.

ABSTRACT

TITLE:

PERFORMANCE EVALUATION OF POLYURETHANE MADE FROM CASTOR OIL MODIFIED BY GLYCEROL AS INDUSTRIAL COATING*.

Authors:

CIFUENTES VÉLEZ PAOLA KATHERINE**

SARMIENTO SOTO FERNANDO**

Keywords:

Castor oil, glycerol, polyurethane, coating.

ABSTRACT

In this project was prepared a polyurethane produced from modified castor oil by transesterification with glycerol and was applied on carbon steel substrates. The cleaning of the substrate was performed under the guidelines of SSPC-SP5 (abrasive cleaning to white metal grade) and the application of the polyurethane was done by brush. The specimens were exposed to different techniques of evaluation and characterization; was used to evaluate the camera salt spray, camera to relative humidity 100% and camera aging (Weather-o-Meter), the characterization was carried out by trials elongation, impact resistance, abrasion resistance, water vapor permeability and adhesion. Each test was made using the procedure described by ASTM standards.

The results obtained were compared with the database management system SHIREC knowledge of the Corporation for Research of Corrosion CIC, to validate the technical feasibility as anti-corrosive coating.

Through this study we found excellent physical and mechanical properties in the proposed material, it was determined the ability of the polyurethane to remain adhered to the surface as well as being an efficient barrier to the passage of water vapor.

The proposed material should not be used in immersion or burial applications because they are found failures when subjected to a cathodic protection system-coating.

* Degree Project. Research Mode.

**Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director Álvaro Ramírez García.

Co-director Luis E. Fuentes.

INTRODUCCIÓN

Para prevenir los problemas debidos a la corrosión es necesario utilizar recubrimientos resistentes a los diferentes ambientes a los cuales estarán expuestos; además de la resistencia al ambiente, deberán tener propiedades físico-mecánicas que los hagan resistentes a las diferentes cargas mecánicas y térmicas que se puedan presentar en su vida útil; además es necesario que estas sustancias se adhieran a superficies metálicas y que sean barreras eficaces al paso del vapor de agua. En este proyecto se evalúan y caracterizan las propiedades anteriormente enunciadas para un poliuretano producido a partir de aceite de ricino, con el fin de validar la viabilidad técnica para usarlo como recubrimiento anticorrosivo.

Trabajos anteriores en el grupo de polímeros UIS han desarrollado métodos de laboratorio para producir poliuretanos a partir de aceite de ricino modificado con glicerol; esta modificación se realiza con el objetivo de aumentar el índice de hidroxilo y por ende aumentar la funcionalidad del aceite de ricino. Al aumentar esta funcionalidad se modifican las propiedades físico-mecánicas y físico-químicas de los poliuretanos obtenidos, debido a que se produce un aumento en la densidad de entrecruzamiento del polímero [1,3]. El poliuretano en estudio se hace reaccionar con Isoforona Diisocianato y se forma una red de poliuretano PUAG3K.

El PUAG3K posee propiedades como baja reactividad debido a que sus grupos funcionales ya han reaccionado, es resistente a la abrasión, al impacto y posee altos niveles de elongación, además su permeabilidad al vapor de agua es baja y se adhiere a sustratos metálicos. De acuerdo con dichas propiedades el PUAG3K podría ser un recubrimiento que compita a nivel comercial.

En este proyecto se aplicó PUAG3K sobre sustratos de acero al carbono y se evaluaron las características del material como recubrimiento; el comportamiento básico se definió a partir de los registros cualitativos y cuantitativos de nivelación de película, espesor de película húmeda, tiempo de secado al tacto y tiempo de curado, bajo condiciones monitoreadas de humedad relativa y temperatura ambiente. Posteriormente se realizaron ensayos de adherencia, permeabilidad al vapor de agua, medición de espesor de película seca y determinación de discontinuidades en el material. La caracterización físico-mecánica se basó en los ensayos de resistencia al impacto, resistencia a la abrasión y ensayo de elongación. Los ensayos bajo ambientes simulados fueron llevados a cabo en cámara de niebla salina, cámara de humedad relativa al 100%, y cámara de envejecimiento (Weather-o-Meter), El monitoreo al desempeño del recubrimiento en los ambientes simulados se basó en la metodología de la Corporación para la Investigación de la Corrosión, CIC, con ensayos de inspección visual y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). La evaluación y caracterización del recubrimiento PUAG3K aplicado al sustrato se basó en la utilización de tres paquetes de ensayos enfocados a determinar las características intrínsecas básicas para actuar como barrera de vapor, el comportamiento físico-mecánico y el desempeño en ambientes simulados de tipo salino, húmedo y atmosférico con ciclos día-noche. Los ensayos de resistencia al desprendimiento catódico, ver anexo D, se realizó como ensayo complementario según la metodología de la CIC.

Con base en la experimentación y el posterior análisis, se establece una comparación del material obtenido con otros recubrimientos que son comerciales.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño del poliuretano PUAG3K producido a partir de aceite de ricino modificado con glicerol como recubrimiento para control de la corrosión de sustratos de acero al carbono.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Evaluar el comportamiento cualitativo y/o cuantitativo de nivelación de película, espesor de película húmeda, espesor de película seca, tiempo de secado al tacto y tiempo de curado, bajo condiciones monitoreadas de humedad relativa y temperatura ambiente.
- 2) Evaluar el desempeño del recubrimiento bajo los ambientes simulados en cámara de niebla salina, cámara de humedad relativa al 100%, y cámara de envejecimiento
- 3) Realizar la caracterización físico-mecánica mediante los ensayos de resistencia al impacto, resistencia a la abrasión y elongación.
- 4) Evaluar las características básicas de adherencia, permeabilidad al vapor de agua y capacidad de resistencia eléctrica a bajo voltaje DC.
- 5) Comparar los resultados obtenidos con la base de datos del sistema de gestión del conocimiento SHIREC* de la CIC y establecer el grado de viabilidad técnica con respecto a sistemas de recubrimientos comerciales.

*SHIREC: Base de datos donde está contenida la información tanto de caracterización como de monitoreo de más de un centenar de sistemas de recubrimientos comerciales y es propiedad de la CIC.

1. MARCO TEÓRICO.

Los poliuretanos son materiales que se caracterizan por tener el grupo uretano en sus cadenas, por reacción de un grupo hidroxilo y un grupo isocianato. De esta reacción se obtiene un material cuyas propiedades finales dependerán del método de polimerización y de las características de los reactivos involucrados. En el presente trabajo se utilizó un monómero polifuncional (poliol) procedente de un aceite natural (aceite de ricino). El poliuretano obtenido exhibe estabilidad térmica, flexibilidad, resistencia química, biocompatibilidad, biodegradabilidad, adherencia a sustancias metálicas, conductividad térmica, etc. [4].

El aceite de ricino es un triglicérido de ácidos grasos que contiene ácido ricinoleico como mayor constituyente (90%) y triglicéridos de los ácidos linoleico, oleico, palmítico, esteárico, 9,10-dihidroxiesteárico, eicosaneico y linolénico. Su estructura básica es:

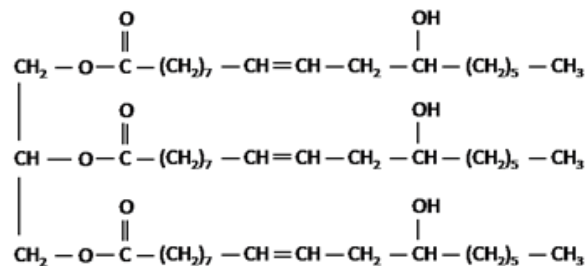


Figura 1 Estructura química del aceite de ricino.

Los grupos hidroxilo localizados en las diferentes cadenas hacen de la molécula de aceite de ricino un monómero polifuncional para la obtención de poliuretanos entrecruzados en presencia de diisocianatos. Las cadenas largas de ácidos grasos imparten flexibilidad y resistencia a la hidrólisis, el doble enlace presente ofrece oportunidades adicionales de reacción por injerto. Obsérvese que en relación a la complejidad de la molécula, el número de hidroxilos es relativamente

bajo, por consiguiente, las redes de poliuretano tendrán un relativo bajo grado de entrecruzamiento, los segmentos de cadena entre puntos de entrecruzamiento serán largos y la misma extensión de los brazos de la molécula del aceite de ricino podrá servir de interferencia para la reacción de los grupos hidroxilo e isocianato [5]. De lo anterior se puede esperar lo que experimentalmente ha sido observado: un material con bajo módulo de resistencia mecánica y baja energía de ruptura [6].

Con el objetivo de aumentar el índice de hidroxilo y por ende aumentar la funcionalidad del aceite de ricino, éste ha sido modificado por medio de reacciones de transesterificación con polialcoholes [7]. Al aumentar esta funcionalidad, se modifican las propiedades físico-mecánicas y físico-químicas de los poliuretanos obtenidos, debido a que se produce un aumento en la densidad de entrecruzamiento del polímero.

Las principales características de un buen recubrimiento dependen de su composición que determina propiedades como: resistencia química, barrera de vapor de agua, nivelación de película, adherencia, flexibilidad, resistencia al impacto y resistencia a la abrasión.

De otra parte la durabilidad de la película depende fundamentalmente de su resistencia al medio corrosivo y de la facultad de permanecer adherida al sustrato metálico; la eficiencia de protección contra la corrosión además de considerar los factores anteriores depende de la habilidad de la película de recubrimiento para impedir el acceso de los agentes corrosivos al sustrato metálico.

La adherencia es clave ya que es la fuerza de interacción entre la superficie y el recubrimiento, siendo una propiedad de la materia que es generada cuando dos sustancias tienden a unirse. La adherencia tiene dos componentes adherencia física y adherencia química; la adherencia física está asociada directamente a la rugosidad del sustrato y se da mecánicamente gracias a la fuerza física generada por la penetración del recubrimiento en el sustrato. Todas las superficies tienen un

perfil de anclaje, esto significa la distancia entre el pico más alto y el valle más profundo hecho por la preparación de la superficie y se puede medir de forma directa y repetible. La adherencia química, es la relación química directa entre el recubrimiento y el sustrato, se produce cuando los dos materiales desarrollan uniones por contacto.

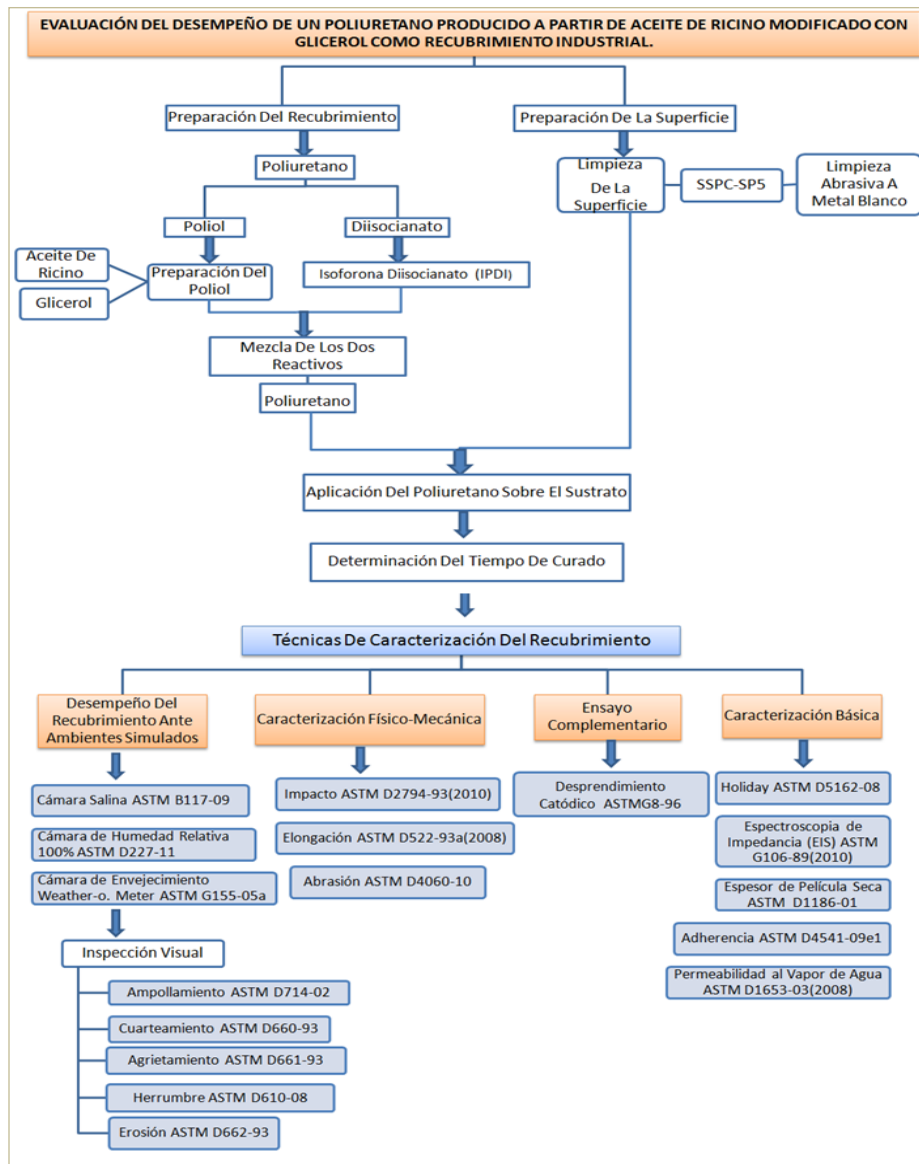
La adherencia del PUAG3K sobre el sustrato se debe a las fuerzas de empotramiento que desarrolla la molécula de poliuretano entrecruzado que dependen de la mojabilidad del mismo y que se ve reflejado en el desarrollo de la componente adhesiva de la adherencia.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

En la Figura 2 se muestra un diagrama secuencial del trabajo experimental que soporta este proyecto, desde la preparación del recubrimiento polimérico hasta su aplicación, caracterización y evaluación.

Figura 2 Metodología experimental.

Fuente: Autores.



A continuación se hace una breve descripción de cada una de las etapas de la batería experimental mostrada en la Figura 2. Una descripción más completa de cada una de las pruebas experimentales se puede consultar en el anexo puntualizado.

PREPARACIÓN DEL RECUBRIMIENTO: Recubrimiento de poliuretano (PUAG3K) obtenido de la reacción del polioliol producto de la modificación del Aceite de Ricino con Glicerol y la Isoforona Diisocianato (IPDI), usando como catalizador el Dibutylestano Dilaurato.

PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE: La superficie debe presentar rugosidad y estar limpia antes de aplicar el recubrimiento. Se hizo limpieza mediante la técnica de sandblasting hasta alcanzar el grado a metal blanco, se realizó la medición del perfil de anclaje. El contenido de cloruros sobre la superficie se determinó utilizando un Elcometer SCM 400

APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO: El recubrimiento se aplicó con brocha sobre la superficie metálica limpia. Se monitoreo la humedad relativa y la temperatura del ambiente. La temperatura en la superficie metálica se mantuvo 3°C por encima de la temperatura del punto de rocío para evitar la deposición de humedad sobre la superficie metálica.

ESPESOR DE PELÍCULA HÚMEDA Y SECA: El espesor de película húmeda se registra cuando un recubrimiento ha sido recién aplicado e inicia el proceso de curado; el espesor de película seca se mide cuando el recubrimiento ha alcanzado su secado total o curado. La medida de espesor de película seca y húmeda se expresa en unidades de micras o mils (1 mils = 0.001 Inch =25.4 microns).

TIEMPO DE CURADO: Es el tiempo de secado previo superficial; se determina cuando al palpar el recubrimiento con el dedo índice, queda la huella pero no moja el área de contacto con la piel.

DESEMPEÑO DEL RECUBRIMIENTO EN AMBIENTES SIMULADOS.

Cámara salina: Este ensayo permite determinar la degradación acelerada del recubrimiento expuesto en un laboratorio que simula la condición de ambiente salino de cercanía al océano, o por la presencia de iones cloruros en un fluido líquido o gaseoso.

El Centro de investigación de la Corrosión (CIC) ha desarrollado una técnica de ensayo que emplea dos tipos de cupones, fisurados y no fisurados. En los primeros se trazan fisuras sobre la superficie, en los segundos no. El daño producido por el ambiente se valora visualmente de acuerdo con una escala predefinida que lleva el nombre de Kiv. (Ver anexo B). También se hacen ensayos de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica para determinar la resistencia de poro R_{po} , que representa la resistencia del material de recubrimiento al paso de agentes contaminantes que contribuyen a la corrosión. Para esta determinación se utiliza el equipo IM6 Zahner Elektrik.

Cámara a humedad relativa 100%: Este ensayo permite determinar la degradación acelerada del recubrimiento expuesto a condiciones de humedad relativa por encima de la crítica (80% aproximadamente). Permite en un tiempo relativamente corto, conocer el comportamiento del recubrimiento en cuanto a cambios de morfología, densidad y tipo de falla en función del tiempo de exposición.

Cámara de envejecimiento o Weather-o-Meter: Este ensayo permite evaluar el comportamiento del recubrimiento sometido a degradación oxidativa en presencia de oxígeno elemental y radiación UV. La CIC ha desarrollado una técnica de ensayo de envejecimiento en la que se usan cupones no fisurados. Se hacen mediciones de espesor de película seca, inspecciones visuales para determinar reducción de brillo y se mide la resistencia de los poros mediante mediciones de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

Toda la información detallada de los ensayos enunciados se encuentra en el anexo B

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA

Las pruebas de caracterización físico-mecánica aplicadas son suficientemente conocidas y por lo tanto se omite su definición. En el Anexo C se encuentra información básica sobre las mismas. Las pruebas son: resistencia al impacto, ensayo de elongación y resistencia a la abrasión.

ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

Resistencia al desprendimiento catódico: Consiste en un ensayo acelerado para determinar las características de aislamiento de un recubrimiento expuesto a la agresividad de un electrolito (Ver Anexo D)

CARACTERIZACIÓN BÁSICA.

Discontinuidad eléctrica: Mediante este ensayo se detecta la existencia de discontinuidades o poros de la película de recubrimiento sobre el sustrato metálico. Se utiliza un equipo (Holiday detector) que emite señales audibles.

Espesor de película seca: Este ensayo es de medición directa, puntual y no-destructiva, que permite determinar el espesor de película seca de un recubrimiento, utilizando un equipo de medición de espesores Positector 6000.

Adherencia: Es un ensayo destructivo mediante el cual se mide la fuerza de tensión necesaria para desprender un dispositivo de metal (Dolly) previamente adherido a la superficie del recubrimiento.

Permeabilidad al vapor de agua: Permite determinar la efectividad del recubrimiento como barrera al paso de vapor de agua. Se determina por cambios de peso de la muestra por absorción de vapor.

Toda la información detallada de los ensayos enunciados se encuentra en el Anexo E.

3. RESULTADOS.

En la preparación de la superficie se obtuvo un perfil de anclaje de 2,5 [mils] y se determinó el contenido de cloruros 1,2 [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]. La aplicación del recubrimiento se realizó con brocha y se procedió a definir los parámetros básicos de requerimientos de tiempos de alistamiento para uso, los cuales se presentan a manera de ficha técnica como se muestra a continuación.

Tabla 1. Ficha técnica para la aplicación del poliuretano.

Sistema	Poliuretano de aceite de ricino -PUAG3K
Rendimiento	3.21 m ² /gal-(1) mils de espesor húmedo
Tiempos de secado a 27±2 °C y 68 ± 2%	Tacto: 5 horas Curado: 32 horas
Vida en pote	15 minutos a 27±2 °C
Precauciones de aplicación	Temperatura de superficie > Temperatura de rocío + 3°C Humedad Relativa < 75%

3.1. DESEMPEÑO EN AMBIENTES SIMULADOS

Diez (10) cupones, cinco (5) fisurados y cinco (5) no fisurados fueron expuestos cuatrocientos ochenta (480) horas en ambientes salinos (cámara salina) y trescientos treinta y seis (336) horas a humedad relativa al ciento por ciento (cámara de humedad relativa 100%).

La evaluación de cada uno de los cupones de prueba de tipo fisurado fue realizada con base en el cálculo del factor Kiv de la inspección visual, los valores obtenidos para cada uno de los cupones de este tipo fueron promediados para cada monitoreo.

La evaluación de los cupones no-fisurados se basó en el cálculo de la Resistencia de Poro, a partir de corridas electroquímicas de espectroscopia de impedancias realizada a un cupón testigo extraído de la cámara de simulación.

Los resultados obtenidos de los diferentes monitoreos de inspección realizados, se consolidan acorde con la metodología de la CIC para este tipo de ensayos.

3.1.1. CÁMARA SALINA.

A continuación se presenta de forma graficada el resultado del comportamiento obtenido. (Las tablas de datos se encuentran en el anexo B)

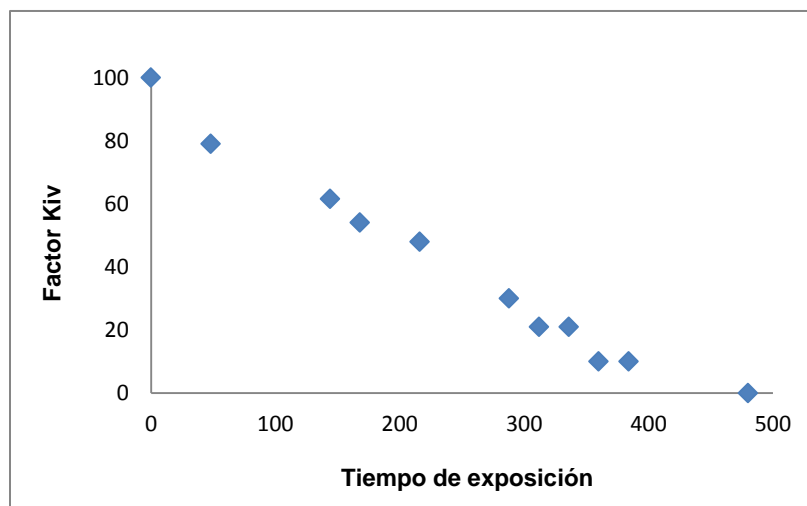


Figura 3 Comportamiento del factor Kiv en cupones fisurados.

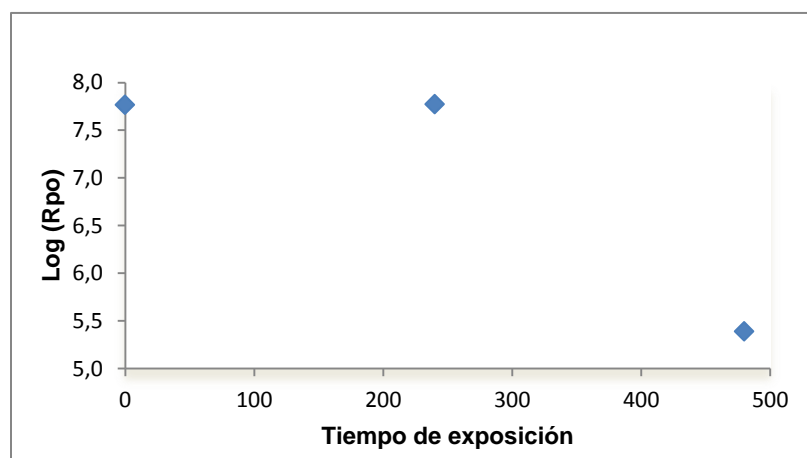


Figura 4 Comportamiento del logaritmo de la resistencia de poro Rpo en cupones no fisurados.

La vida útil del recubrimiento es de ciento cuarenta y cuatro (144) horas, basados en los resultados del factor Kiv, que en este caso es la técnica más exigente.

3.1.2. CÁMARA A HUMEDAD RELATIVA 100%

A continuación se presente de forma tabulada y graficada el resultado del comportamiento obtenido. (Las tablas de datos se encuentran en el anexo B)

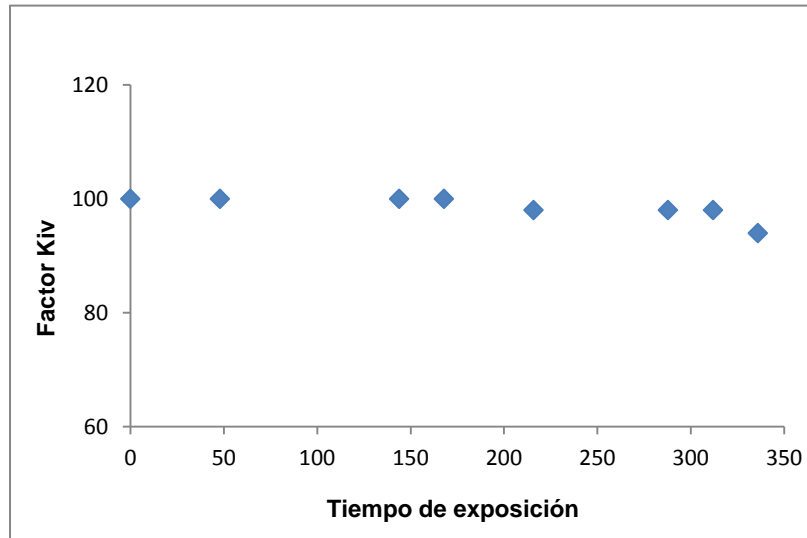


Figura 5 Comportamiento del factor Kiv en cupones fisurados.

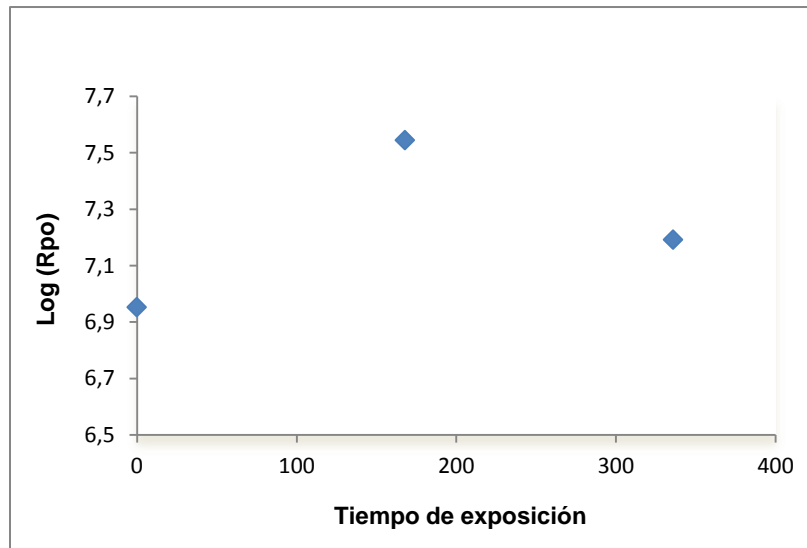


Figura 6 Comportamiento del logaritmo de la resistencia de poro Rpo en cupones no fisurados.

Los resultados mediante las dos técnicas evidencian que el tiempo de exposición no fue suficiente para establecer la vida útil del recubrimiento y por tanto, sólo se puede afirmar que ésta es superior a trescientas treinta y seis (336) horas.

3.3.1. CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO - WEATHER O METER

Se expusieron diez (10) cupones no fisurados a radiación UV en la cámara bajo la acción combinada de los ciclos día-lluvia y día-noche, durante un tiempo de ciento noventa y dos (192) horas, y monitoreados mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica sobre un cupón y mediante la medición de brillo sobre tres cupones testigo.

Los cupones no perdieron espesor de película seca durante el tiempo de exposición en el Weather o meter. A continuación se presenta los resultados del monitoreo mediante la reducción del porcentaje de brillo y la variación de la resistencia de poro, Rpo. (Las tablas de datos se encuentran en el anexo B)

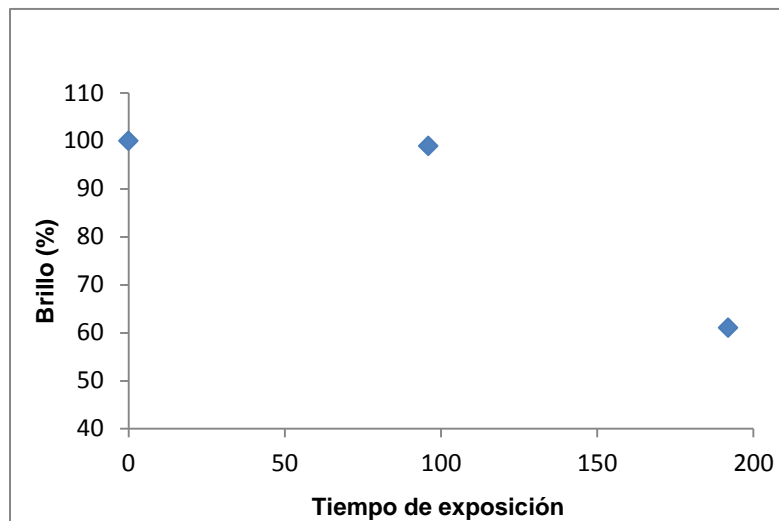


Figura 7 Porcentaje de brillo en cupones no fisurados.

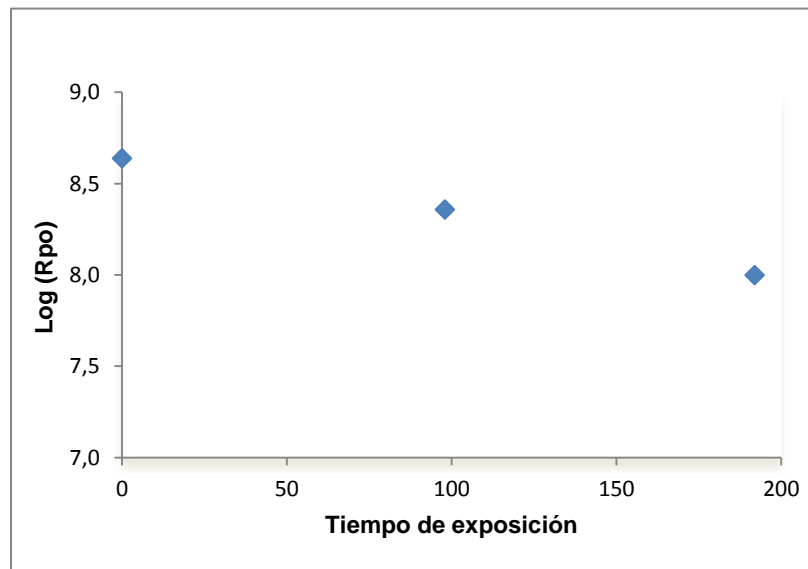


Figura 8 Comportamiento del logaritmo de la resistencia de poro Rpo en cupones no fisurados.

Las dos gráficas, que representan los resultados a través de la evaluación del recubrimiento utilizando técnicas diferentes, muestran la consistencia entre ellas y el deterioro gradual de la integridad del recubrimiento a través del tiempo de exposición en un ambiente con altos niveles de radiación UV.

Los resultados permiten afirmar que la exposición a ciento noventa y dos (192) horas genera una pérdida de brillo del recubrimiento en un cuarenta por ciento (40%), de otra parte, la prueba de Rpo indicó que la degradación del recubrimiento por acción combinada de luz y agua fue del uno por ciento (1%), lo cual se traduce en que el tiempo de vida útil es mucho mayor al tiempo de exposición aplicado al recubrimiento.

3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA.

3.2.1. ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO

A continuación se presenta la tabla de resultados de las diez (10) probetas sometidas al ensayo, para establecer la resistencia impacto del recubrimiento.

Tabla 2. Resultado de ensayo de resistencia al impacto.

Probeta	Masa [Kg]	Altura [m]	EPS (mils)	Energía [J]	Inspección Visual	HOLIDAY a 9 VDC
1	1,103	0,54	2,68	5,86	Pasa	Pasa
2	1,103	1,02	2,43	11,03	Pasa	Pasa
3	1,103	1,02	1,21	11,03	Pasa	Pasa
4	1,992	0,54	3,84	10,58	Pasa	Pasa
5	1,992	0,9	2,73	17,57	Pasa	Pasa
6	1,992	0,9	2,72	17,57	Pasa	Pasa
7	1,992	0,9	2,43	17,57	Pasa	Pasa
8	1,992	0,9	2,70	17,57	Pasa	Pasa
9	1,992	0,9	3,26	17,57	Pasa	Pasa
10	1,992	0,9	3,91	17,57	Pasa	Pasa

Criterio para definición de resistencia al impacto.

“Pasa”: Nivel de energía para la cual el recubrimiento no presenta daño en su integridad ni discontinuidad eléctrica al voltaje de referencia acorde con el espesor.

“No-Pasa”: Nivel de energía para la cual el recubrimiento presenta daño en su integridad y/o discontinuidad eléctrica al voltaje de referencia acorde con el espesor.

Resistencia al Impacto: Valor máximo de energía al cual “pasa” o intervalo de energía entre los cuales “pasa” y “no-pasa”.

Los resultados permiten establecer que la resistencia al impacto del PUAG3K es mayor a 17,57 Joules (80 Lb-pul).

3.2.1 ENSAYO DE ELONGACIÓN

Fueron sometidas al ensayo cuatro (4) probetas con espesores de película seca entre 4.4 y 4.6 mils, para las cuales se obtuvo los resultados a continuación presentados.

Tabla 3. Resultado ensayo de elongación.

Diámetro de Mandril (mm)	Probeta	HOLIDAY a 9 VDC	Inspección Visual	EPS (mils)	Elongación (%)
3,2	1	Pasa	Pasa	4,4	34,16
3,2	2	Pasa	Pasa	4,5	34,30
3,2	3	Pasa	Pasa	4,6	34,44
3,2	4	Pasa	Pasa	4,5	34,30
			Promedio	4,5	34,30

Criterio para definición de Elongación.

"Pasa": Carga de flexión para la cual el recubrimiento no presenta daño en su integridad ni discontinuidad eléctrica al voltaje de referencia acorde con el espesor.

"No-Pasa": Carga de Flexión para la cual el recubrimiento presenta daño en su integridad y/o discontinuidad eléctrica al voltaje de referencia acorde con el espesor.

Los resultados permiten establecer que la Elongación del PUAG3K es de treinta y cuatro coma tres por ciento (34.3%).

3.2.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

Fueron sometidas al ensayo seis (6) probetas con espesores de película seca entre 4.9 y 5,7 mils, para las cuales se obtuvo los resultados a continuación presentados.

Tabla 4. Resultado ensayo de resistencia a la abrasión.

Probeta	EPS inicial (mils)	Peso inicial (g)	Promedio de la pérdida de espesor/ciclo (mils)	Promedio de la pérdida de peso/ciclo (g)	Pérdida de espesor en 1000 ciclos (mils)	Pérdida de masa en 1000 ciclos (g)	Ciclos/mil
1	4,9	236,44	0,00134	7,00E-05	1,338	0,07	747,66
2	5,7	234,85	0,00129	4,00E-05	1,288	0,04	776,70
3	5,0	240,63	0,00110	4,00E-05	1,100	0,04	909,09
4	5,5	235,77	0,00093	2,00E-05	0,925	0,02	1081,08
5	5,0	234,99	0,00149	6,00E-05	1,488	0,06	672,27
6	5,5	244,43	0,00093	4,00E-05	0,925	0,04	1081,08
Promedio total 6 probetas			0,00118	4,50E-05	1,177	0,045	877,98

Los resultados son el promedio de las seis (6) probetas sometidas al ensayo, y se obtuvo que el PUAG3K presenta una resistencia a la abrasión de 0,045 mg/ciclo o de 877,98 ciclos/mil.

3.3. ENSAYO COMPLEMENTARIO.

3.3.1. ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESPRENDIMIENTO CATÓDICO.

Luego de haber sometido la probeta durante 28 días a un potencial de -1,45 [v] se determina la resistencia al desprendimiento catódico, generando como resultado el levantamiento del recubrimiento en toda la superficie expuesta a prueba como se evidencia en las siguientes fotografías.

Figura 9 Resultado de ensayo de resistencia al desprendimiento catódico.



El recubrimiento PUAG3K presenta resistencia al desprendimiento catódico inferior al mínimo permisible para ser sometido a tal condición.


3.4. CARACTERIZACION BASICA

3.4.1. ENSAYO DE ADHERENCIA.

Fueron sometidas al ensayo cinco (5) probetas, en las cuales se aplicó un adhesivo acoplante para adecuar el montaje del Dolly a desgarrar en la prueba y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 5. Resultado de ensayo de adherencia Pull-Off (mecánico).

Probeta	Adherencia registrada [Psi]	Observaciones
1	500	100% - falla por acoplante
2	600	90% - falla adhesiva
3	800	80% - falla adhesiva
4	600	70% - falla adhesiva
5	600	60% - falla adhesiva



Los resultados permiten establecer que el PUAG3K posee una adherencia al sustrato en el rango de 600 y 800 psi.

3.4.2. ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Se sometieron a ensayo cinco (5) muestras de membranas de PUAG3K montados en copas que disponen de un peso inicial, y que en el transcurso de la prueba por gravimetría se define la masa de vapor de agua que pasa a través de las membranas. Los resultados de la prueba son presentados a continuación.

Tabla 6. Resultado ensayo de permeabilidad al vapor de agua.

Copa	Peso de la membrana (g)	Espesor de la membrana (mils)	Peso de la copa* (g)	WVT g/m ² -24h-mmHg
Copa 1	0,7214	5,1	172,89	0,0274
Copa 2	1,0270	8,5	175,17	0,0252
Copa 3	0,8454	5,4	173,63	0,0224
Copa 4	3,0837	28,3	172,60	0,0212
Copa 5	3,6030	43,4	176,90	0,0157
PROMEDIO				0,0224

*Copa: Σ Peso de la membrana + Peso del desecante.

Luego de realizar el ensayo en un tiempo de exposición de trescientas doce (312) horas en un ambiente de 100% de humedad relativa, se encontró que la permeabilidad al vapor de agua del PUAG3K es de $0.0224 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot \text{mmHg}}$.

4. COMPARACIÓN PUAG3K VS RECUBRIMIENTOS COMERCIALES.

Los resultados experimentales de evaluación del recubrimiento PUAG3K se compararon con los reportados en la base de datos SHIREC que recopila información sobre recubrimientos comerciales.

Para definir criterios de evaluación de la viabilidad técnica del poliuretano en estudio, se procedió a compararlo con los sistemas comerciales en los tres ambientes simulados, siguiendo como parámetros de referencia, sustratos de Acero al carbono y un grado de preparación superficial a metal blanco según norma SSPC-SP5.

4.1. DESEMPEÑO EN AMBIENTES SIMULADOS

A continuación se presenta un cuadro comparativo del desempeño en ambientes simulados del PUAG3K, y los sistemas comerciales disponibles en el SHIREC con desempeños similares o que puedan ser usados como referencia comparativa.

Tabla 7. Análisis del desempeño en ambientes simulados

Ambiente	PUAG3K	Emulsión (3)	Epoxi Poliamida	Alquídico Fenólico Ester Epoxi+Poliuretano Alifático	Inorgánico de Zinc+Epoxi Poliamida+Poliuretano	Epoxi Zinc	Epoxi Amina+Epoxi Poliamida+Ureol Alifático
		COD: 3067	COD:1019	COD:2069	COD:3087	COD:1021	COD:3085
Cámara Salina	140 h Kiv: 60%	90 h Kiv: 60%	400 h Kiv: 60%	900 h Kiv: 60%	2400 h Kiv: 60%	2400 h Kiv: 60%	1300 h Kiv: 60%
Cámara a HR 100%	200 h Kiv: 100%	3000 h Kiv: 100%	0 h Kiv: 100%	0 h Kiv: 100%	3000 h Kiv: 100%	3600 h Kiv: 100%	1200 h Kiv: 100%
Weather o Meter	187 h de luz (ΔRpo: OK)	1000 h de luz (ΔRpo: OK)	1000 h de luz (ΔRpo: OK)	167 h de luz (ΔRpo: NO OK)	1000 h de luz (ΔRpo: OK)	1000 h de luz (ΔRpo: OK)	1000 h de luz (ΔRpo: OK)

Δ Rpo: OK cuando la relación de Rpo inicial/Rpo final < 10³

Δ Rpo: NO OK cuando la relación de Rpo inicial/Rpo final > 10³

En ambiente salino el PUAG3K presenta un desempeño superior al 54% del sistema tipo Emulsión de tres (3) capas.

En ambiente de humedad relativa 100% no se logra definir en las 336 horas del tiempo de ensayo la vida útil del sistema PUAG3K, pero su desempeño es superior al 42% de un Sistema sencillo Epoxi-poliamida.

En un ambiente de alta radiación UV no se logra definir en las 187 horas del tiempo de ensayo la vida útil del sistema PUAG3K, pero su desempeño es superior al 86% de un Sistema Doble Alquídico Fenólico+Uretano.

4.2. CARACTERIZACION BASICA Y FISICO-MECANICA

A continuación se presenta un cuadro comparativo de la caracterización básica y físico-mecánica del PUAG3K, y los sistemas comerciales disponibles en el SHIREC que puedan ser usados como referencia comparativa.

Tabla 8. Análisis de la caracterización básica y físico mecánica

Característica	PUAG3K	Emulsión (3)	Epoxi Poliamida	Alquídico Fenólico Ester Epoxi + Poliuretano Alifático	Inorgánico de Zinc + Epoxi Poliamida + Poliuretano Alifático	Epoxi Zinc	Poliuretano autoimprimante reforzado con aluminio	Epoxi Amina+Epoxi Poliamida+ Uretano Alifático
		COD:3067	COD:1019	COD:2069	COD:3087	COD:1021	COD:1026	COD:3085
Impacto [Lbf-in]	> 80	> 80	>80	13	75	> 80	41	> 80
Elongación [%]	34,3%	26%	2%	1,50%	4%	36%	1,5%	14%
Abrasión [mg/ ciclo]	0,045	0,08	0,11	0,25	0,33	2,3	0,05	0,11
WWT [g/m2-dia]	24	122	31	53,69	51,4	605	35	15

La resistencia al Impacto del PUAG3K es superior a la capacidad del equipo de la prueba estándar y se encuentra al nivel de los sistemas comerciales con mayor capacidad de absorción de cargas de impacto súbito sin falla.

La Elongación porcentual del PUAG3K es superior a todos los sistemas comerciales disponibles en el SHIREC, con excepción del sistema simple Epoxy Zinc, que lo supera en un poco menos del 5%.

La resistencia a la Abrasión del PUAG3K es superior a todos los sistemas comerciales disponibles en el SHIREC, y mayor 11% del que presenta mayor resistencia de los disponibles en el SHIREC.

La Permeabilidad al vapor de agua del PUAG3K es superior al de todos los sistemas disponibles en el SHIREC, con excepción del sistema Epoxiamina + Epoxipoliamida + Uretano que lo supera en un 37%.

4.3. VIABILIDAD TÉCNICA

El sistema en estudio PUAG3K es técnicamente viable para ser utilizado en un ambiente salino porque supera el desempeño de algunos sistemas comerciales. Sin embargo, hace falta determinar el tiempo de vida útil del recubrimiento en estaciones de exposición atmosféricas para luego hacer la comparación con recubrimientos comerciales, que están en el orden de 60 y 120 meses.

El sistema en estudio PUAG3K es técnicamente viable para ser utilizado en un ambiente húmedo y atmosférico, asimilables a campo abierto en ambientes rurales, boscosos y urbanos de baja concentración de contaminantes porque supera el desempeño de algunos sistemas comerciales, pero su nivel de competitividad no está definido, en razón a que el tiempo de exposición planeado y autorizado para estos ambientes simulados, fue inferior al tiempo de vida útil esperado en el recubrimiento PUAG3K.

El sistema en estudio PUAG3K presenta un comportamiento físico-mecánico y como función de barrera de vapor, que lo habilita como un producto técnicamente viable para ser utilizado como recubrimiento, presentando una competitividad de nivel muy superior de manera integral bajo este enfoque.

5. CONCLUSIONES.

- El desempeño del material propuesto en ambientes simulados estuvo cerca al límite inferior establecido por los sistemas de recubrimientos comerciales comparables.
- Las propiedades físico-mecánicas del material propuesto fueron superiores a las de los sistemas de recubrimientos comerciales comparables.
- El material propuesto resultó tener la habilidad de mantenerse adherido a la superficie del sustrato así como baja permeabilidad al vapor de agua, por lo que aparece como una buena opción para prevenir la corrosión.
- El material propuesto como recubrimiento no es resistente para aplicaciones de inmersión o enterramiento mediante un sistema recubrimiento-protección catódica.

6. RECOMENDACIONES.

Definir la vida útil del sistema PUAG3K en los ambientes simulados de cámara a Humedad Relativa al 100% y cámara de Envejecimiento Weather-o-Meter, para establecer el nivel de competitividad técnica asimilable en aplicaciones industriales para este tipo de ambientes, mediante ensayos a tiempos de exposición superior a 3000 y 1500 horas, respectivamente.

Realizar modificaciones en el PUAG3K mediante cambios en la estructura del producto, proceso de aplicación y/o inclusión de pigmentos que hagan las veces de ánodo de sacrificio enfocado a incrementar el desempeño en ambientes atmosféricos a los que pueda estar expuesto.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1. Prashantha P., K. Vasanth Kumar Pai, B.S Sherigara, S. Prasannakumar. Interpenetrating polymer networks based on polyol modified castor oil polyurethane and poly(2-hydroxyethylmethacrylate): Synthesis, chemical, mechanical and thermal properties. *Bull. Mater. Sci.* 24(5), 535-538. 2001.
2. Athawale V y Kolekar S. Interpenetrating polymer networks based on polyol modified castor oil polyurethane and polymethyl methacrylate. *European Polymer Journal*. Vol. 34, N°. 10, p.p 1447-1451. 1998.
3. Sanmathi C.S. Prasannakumar S. Sherigara B.S. Interpenetrating polymer networks based on polyol modified castor oil polyurethane and poly(2-ethoxyethyl methacrylate): synthesis, chemical, mechanical, thermal properties, and morphology. *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 94, 1029-1034. 2004.
4. M. F. Valero, "Síntesis y caracterización de nuevos materiales poliméricos, poliuretanos e IPNs, a partir de aceite de higuera modificado, estireno y almidón de yuca". Título de Doctorado, ingeniería química UIS. Director Álvaro Ramírez, Codirector Jorge E. Pulido, (2009)
5. S. R. Zoran, F. Dragica "Preparation and Properties of Castor Oil-Based Polyurethanes" *J. Appl. Polim. Sci.*, 29, 1031 (1984).
6. N. D. Ghatge, V. B. Phadke "Elastomers from castor oil" *J. Appl. Polim. Sci.*, 11, 629 (1964).
7. L. S. Higuera, S. M. Rodríguez, "elastómeros de poliuretanos a partir de aceite de higuera y almidón de yuca modificado químicamente: síntesis y propiedades físico-químicas, físico-mecánicas y térmicas". Proyecto de grado. Ingeniería química UIS. Director J. E. Pulido, A. Ramírez, Codirector: Manuel Valero, (2008).

8. ANEXO A

TERMINOLOGÍA

PERFIL DE ANCLAJE

Es la profundidad de la rugosidad máxima del perfil que se obtiene mediante la preparación de la superficie del sustrato se basa en la teoría acerca de la formación de valles y crestas en la superficie de un metal, una vez que este es pulido mediante la acción de un medio de limpieza. Es allí en estas crestas y valles donde se habrá de anclar el revestimiento una vez aplicado.

PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Es la acción de eliminar las impurezas presentes en la superficie metálica. Está en función del grado de limpieza y del perfil de anclaje que acepta la norma frente a los distintos tipos de limpieza a utilizar. En este proyecto para la preparación de las probetas se usó limpieza abrasiva a grado metal blanco según los lineamientos de la norma SSPC-SP5, la cual exige que la superficie esté libre de aceite, humedad, suciedad, polvo, herrumbre, escamas de laminación o cualquier otro material suelto y solo permite un 5% de contaminación sobre el área total de la probeta.

NIVELACION DE PELICULA

Está estrechamente relacionada con la homogeneidad que toma una película de recubrimiento cuando es aplicada sobre una superficie plana y es virtud de las propiedades intrínsecas del mismo.

ESPESOR DE PELICULA HÚMEDA Y SECA

La medida del espesor de película húmeda se registra cuando un recubrimiento ha sido recién aplicado e inicia su proceso de curado; por el contrario el espesor de película seca se mide cuando dicho recubrimiento ha alcanzado su secado total

o curado, la medida de espesor de película seca y húmeda se expresa en unidades de micras o mils (1 mils = 0.001 Inch =25.4 microns).

TIEMPO DE SECADO AL TACTO

Es el tiempo en el proceso de curado que toma un recubrimiento para alcanzar un secado previo superficial, el cual se determina cuando este es palpado con el dedo índice y queda la huella pero no moja el área de contacto de la piel.

TIEMPO DE CURADO

Es el tiempo en el proceso de curado que toma un recubrimiento para alcanzar el secado total y se determina cuando se le aplica un esfuerzo de torsión con el dedo índice sobre la superficie del recubrimiento sin encontrar ningún tipo de deformación en esta.

ANEXO B

DESEMPEÑO DEL RECUBRIMIENTO EN AMBIENTES SIMULADOS.

CÁMARA SALINA

Este ensayo fue basado en la norma STANDARD PRACTICE FOR OPERATING SALT SPRAY (FOG) ASTM B117-09, permite determinar la degradación acelerada del recubrimiento expuesto a un ambiente salino y consiste en conocer el desempeño del recubrimiento, expuesto a un ambiente de laboratorio, que simula la condición salina de un ambiente real, por su condición de cercanía con un océano, o bien por la presencia de iones cloruros en un fluido líquido o gaseoso. Permite en un tiempo relativamente corto, conocer el comportamiento de un sistema de recubrimientos en cuanto a la morfología, tendencia, densidad y tipo de falla en el tiempo.

Procedimiento. Para este ensayo previamente debe planearse el número probetas a exponer en la cámara, número de monitoreos para la evaluación y el tiempo de exposición de las muestras entre monitoreos. La película del recubrimiento es aplicada sobre un sustrato metálico o probeta y luego de obtener su condición de curado total, es caracterizada mediante la medición de espesores de película seca.

la metodología desarrollada por la CIC a través de su experticia, para el ensayo de cámara salina se consideran dos tipos de muestras o cupones, unas fisuradas (Daños inducidos de tipo lineal o cruzados en diagonal) en las cuales se realiza la evaluación bajo el criterio de inspección visual para determinar los daños tanto en los alrededores de las fisuras como en las regiones contenidas por éstas, para lo cual la cuantificación de la inspección se define como Kiv (factor de cuantificación de daños); el otro tipo de muestras o cupones, son no-fisurados y la evaluación se centra en realizar una inspección visual para la determinación de eventuales

daños para posteriormente someterlas a corridas de Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), en la cual la determinación de la resistencia de poros, será la variable a la cual se le realizara el seguimiento. Una vez finalizado el número total de monitoreos planeados, se procede a realizar la grafica del comportamiento o desempeño obtenido en la cámara salina, tanto bajo el enfoque de inspección visual (Kiv) como el enfoque de la resistencia de poros (Rpo).

Tabla 9. Condiciones de ensayo cámara salina.

Número de cupones	10
Dimensión de los cupones	10X20cm
Calibre	3mm
Cupones fisurados	5
Cupones no-fisurados	5
Monitoreo	3
Tiempo de exposición	480

Tabla 10. Condiciones del equipo cámara salina atlas CSF 850.

Solución	Salmuera 5%
Temperatura de la Cámara	35°C

Criterios de aceptación.

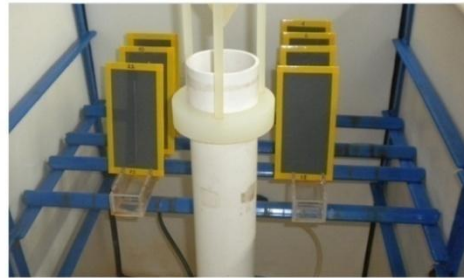
- Kiv superior a 60%
- Espectroscopia de Impedancia electroquímica (EIS)

Aceptable Rpo inicial/ Rpo final < 1×10^3 Ohm

No aceptable Si la Rpo inicial / Rpo final es $\geq 1 \times 10^3$ Ohm.



Cámara Salina



Interior de la Cámara con los cupones fisurados y no-fisurados.



Cupón no-Fisurado



Cupón Fisurado

Figura 10 Cámara salina exterior e interior

Resultados de forma tabulada para los cupones monitoreados por las técnica de Kiv y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) respectivamente.

Tabla 11. Tiempo de exposición Vs Factor Kiv promedio.

Tiempo de Exposición (Horas)	Kiv promedio
0	100,0
48	79,0
144	61,5
168	54,0
216	48,0
288	30,0
312	21,0
336	21,0
360	10,0
384	10,0
480	0,0

Tabla 12. Tiempo de exposición Vs Rpo

Tiempo de Exposición (Horas)	Rpo [Ohm/cm ²]
0	5,83E+07
240	5,90E+07
480	2,46E+05

CÁMARA A HUMEDAD RELATIVA 100%

Este ensayo fue basado en la norma STANDARD PRACTICE FOR TESTING WATER RESISTANCE OF COATINGS IN 100% RELATIVE HUMIDITY ASTM D2247, permite determinar la degradación acelerada del recubrimiento expuesto a condiciones de humedad relativa con condensación inminente y tiene como finalidad conocer el desempeño de un sistema de recubrimientos, expuestos a un ambiente de laboratorio, que simula la condición de humedades relativas del aire ambiental superiores a la humedad relativa crítica (aproximadamente 80%) de un ambiente real. Permite en un tiempo relativamente corto, conocer el comportamiento de un sistema de recubrimientos en cuanto a la morfología, densidad y tipo de falla en el tiempo.

Procedimiento. Para este ensayo previamente debe planearse el número de probetas a exponer, el número de monitoreos para evaluación y el tiempo de exposición de las muestras entre monitoreos.

La película del recubrimiento es aplicada sobre un sustrato metálico o probeta y luego de obtener su condición de curado total, es caracterizada mediante la medición de espesores de película seca. La metodología desarrollada por la CIC a través de su experticia para el ensayo de humedad relativa al 100%, se consideran dos tipos de muestras o cupones, unas fisuradas (Daños inducidos de tipo lineal o cruzados en diagonal) en las cuales se realiza la evaluación bajo el

criterio de inspección visual para determinar los daños tanto en los alrededores de las fisuras como en las regiones contenidas por éstas, para lo cual la cuantificación de la inspección se define como Kiv (factor de cuantificación de daños); el otro tipo de muestras o cupones, son no-fisurados y la evaluación se centra en realizar una inspección visual para determinación de eventuales daños y luego son sometidas a corridas de Espectroscopia de impedancia química (EIS), en la cual la determinación de la resistencia de poros, será la variable a la cual se le realizara el seguimiento. Una vez finalizado el número total de monitoreos planeados, se procede a realizar la grafica del comportamiento o desempeño obtenido en la cámara de humedad relativa al 100%, tanto bajo el enfoque de inspección visual (Kiv) como el enfoque de la resistencia de poros (Rpo).

Tabla 13. Condiciones de ensayo cámara a humedad relativa 100%

Número de cupones	10
Dimensión de los cupones	10X20cm
Calibre	3mm
Cupones fisurados	5
Cupones no-fisurados	5
Monitoreo	3
Tiempo de exposición	33636

Tabla 14. Condiciones de equipo para cámara a humedad relativa 100%.

Atlas CSF 850.

Sustancia de trabajo	Agua desionizada
Temperatura de la Cámara	30°C

Criterios de aceptación.

- Kiv superior a 60
- Espectroscopia de Impedancia Electroquímica:
Aceptable R_{po} inicial/ R_{po} final $< 1 \times 10^3$ Ohm
No aceptable Si la R_{po} inicial / R_{po} final es $\geq 1 \times 10^3$ Ohm.



Cámara a humedad relativa 100%



Cupones fisurados y no- fisurados dentro de la cámara



Cupón no-Fisurado



Cupón Fisurado

Figura 11 Cámara a humedad relativa 100% exterior e interior.

Resultados de forma tabulada para los cupones monitoreados por las técnica de Kiv y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) respectivamente.

Tabla 15. Tiempo de exposición Vs factor Kiv promedio.

Tiempo de exposición (Horas)	Kiv Promedio
0	100
48	100
144	100
168	100
216	98
288	98
312	98
336	94

Tabla 16. Tiempo de exposición Vs Rpo.

Tiempo de exposición (Horas)	Rpo [Ohm/cm ²]
0	8,96E+06
168	3,50E+07
336	1,55E+07

DETERMINACIÓN DEL KIV (FACTOR DE CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS).

El factor de Kiv es una herramienta práctica desarrollada por la CIC, que permite cuantificar los daños evidenciados mediante la inspección visual, que ocurren en un recubrimiento expuesto a un medio específico. Este factor tiene una mayor aplicabilidad en cupones fisurados (cupones revestidos a los cuales se les practica fisuras en diagonal hasta formar una X centrada o una sola fisura de forma lineal) utilizados en procesos de evaluación de desempeño de recubrimientos, tanto en condiciones de ambientes reales de exposición, como en condiciones simuladas de laboratorio.

El principio de aplicabilidad del factor Kiv, se basa en que un cupón o muestra de sistemas de recubrimientos que es sometido a unas condiciones determinadas de agentes contaminantes, presentará la manifestación de daños y evolución en el tiempo, la utilización de cupones fisurados, permite acelerar este proceso de daño y por ende, disponer de un grado de certidumbre aceptable de la proyección del comportamiento. El factor Kiv se determina aplicando, en cada monitoreo o evaluación con ayuda de la inspección visual, la siguiente correlación.

$$Kiv=100-\Sigma(Fz*(|Ft|+|Fd|))$$

Donde:

Fz= Factor de Zona. Sus valores definidos en la escala de 1 a 10, están relacionados con los niveles de avance del daño respecto de la línea de la fisura así:

Tabla 17. Determinación Kiv factor zona.

Fz	Condición del Daño
2.0	Aleatorio
3.0	A 1mm de la fisura
6.0	A 3mm de la fisura
7.0	A mas de 3mm de la fisura
8.0	En una región entre fisuras
9.0	En más de una región entre fisuras
10.0	En todas las regiones entre fisuras

Ft= Factor de tamaño. Su magnitud hace referencia a la magnitud de daños evidenciado y se define así:

Tabla 18. Determinación del Kiv factor tamaño.

Ft	Condición del Daño
3.0	Cuando el diámetro del daño es mas de 3 veces el ancho de la fisura
2.0	Cuando el diámetro del daño está entre 2y3 veces el ancho de la fisura
1.0	Cuando el diámetro del daño es igual al ancho de la fisura
0.5	Cuando el diámetro del daño es inferior al ancho de la fisura

Fd= Factor de densidad. Este factor hace referencia a la densidad del daño evidenciado en la inspección visual y se define así:

Tabla 19. Determinación Kiv factor de densidad.

Fd	Condición del Daño
2.0	Alta densidad. Cuando es mayor al 50% de la longitud de la fisura, o mayor al 50%del área de la zona entre fisuras
1.0	Densidad media. Cuando representa entre el 20 y el 50% de la longitud de la fisura, o del área de la zona entre fisuras
0.5	Baja densidad. Cuando es menor al 20% de la longitud de la fisura, o menor al 50% del área de la zona entre fisuras.

CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO O WEATHER-O-METER.

Este ensayo fue basado en la norma STANDARD PRACTICE FOR PERATING LIGHT-EXPOSURE APPARATUS (XENON-ARC TYPE) WITH OR WITHOUT WATER FOR EXPOSURE OF NONMETALLIC MATERIALS ASTM G26. Permite conocer el desempeño de un recubrimiento expuesto a un ambiente de laboratorio, que simula el envejecimiento por la exposición a la radiación ultravioleta en forma cíclica con la presencia de aire y/o la presencia de lluvia. Todos los materiales orgánicos son susceptibles a la degradación oxidativa en

presencia de oxígeno elemental y radiación UV. El estudio del deterioro de un recubrimiento orgánico bajo la acción combinada de la radiación ultravioleta (UV) y agua es requerido debido al funcionamiento de los recubrimientos en ambientes reales donde están sometidos a radiación y humedad. Los fenómenos foto-oxidativos pueden causar cambios en las pinturas, no solo en la parte estética (color) sino en la parte funcional (rompimiento de las cadenas poliméricas, disminución de la elasticidad, reducción de las propiedades de barrera, etc.)

Procedimiento. Para este ensayo previamente debe planearse el número de probetas a exponer, el número de monitoreos para evaluación y el tiempo de exposición de las muestras entre monitoreos. La película de recubrimiento es aplicada sobre un sustrato metálico o probeta y luego de obtener su condición de curado total, es caracterizada mediante la medición de espesores de película seca. La metodología desarrollada por la CIC, a través de su experticia, para el ensayo en la cámara de envejecimiento (Weather-o-meter) se consideran solo muestras o cupones no-fisurados, a los cuales solo se les valora el proceso de deterioro mediante inspección visual, desgaste de espesor de película seca, reducción de brillo y resistencia de poro mediante corridas de Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Una vez finalizado el número total de monitoreos planeados, se procede a graficar el comportamiento o desempeño obtenido en la cámara de envejecimiento.

Tabla 20. Condiciones de ensayo cámara de envejecimiento.

Número de cupones	10
Dimensión de los cupones	7.5X15cm
Calibre	3mm
Cupones no-fisurados	10
Monitoreo	3
Tiempo de exposición [Horas]	192

Tabla 21. Condiciones de equipo cámara de envejecimiento. Equipo Atlas Ci 4000

Fuente de luz	Lámpara de arco de Xenón de irradiancia controlado
Nivel de irradiancia	0,55 W/m ² @ 340-420 nm
	40 Minutos únicamente de luz
	20 minutos de luz mas rociado frontal
	40 Minutos únicamente de luz
	5 Únicamente de oscuridad
Temperatura del panel Negro	87±2°C Luz / 30±2°C oscuridad
Humedad relativa	95% oscuridad / 50% Luz

Criterios de aceptación.

- Espesor de película seca
- Brillo
- Impedancia electroquímica (EIS)

Aceptable Rpo inicial/ Rpo final < 1x10³ Ohm

No aceptable Si la Rpo inicial / Rpo final es ≥ 1x10³ Ohm.



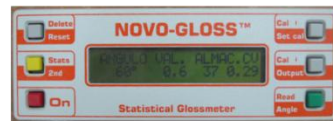
Cámara de envejecimiento



Cupones no-fisurados dentro de la cámara



Cupones no-fisurados



Equipo medidor de brillo

Figura 12 Cámara de envejecimiento exterior e interior.

Resultado de forma tabulada para los cupones monitoreados por la técnica de determinación de brillo y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

Tabla 22. Tiempo de exposición Vs Porcentaje de brillo (%)

Tiempo de exposición (Horas)	Porcentaje de brillo (%)
0	100,00
96	98,93
192	60,37

Tabla 23. Tiempo de exposición Vs Rpo.

Tiempo de exposición (Horas)	Rpo [Ohm/cm ²]
0	4,35E+08
98	2,28E+08
192	9,99E+07

ANEXO C

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA

ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO

Este ensayo es basado en la norma STANDARD TEST METHOD FOR RESISTANCE OF ORGANIC COATINGS TO THE EFFECTS OF RAPID DEFORMATION (IMPACT) ASTM D2794, este ensayo se realiza con la finalidad de observar cuanta energía es capaz de resistir el recubrimiento antes de presentar algún daño. La prueba de impacto para un sistema de recubrimiento por el método de carga súbita o de deformación rápida, consiste en aplicar un nivel de energía potencial pre-establecida, mediante la caída libre de una masa conocida que golpea directamente sobre la probeta. La energía potencial predefinida (instalación de la masa a una altura determinada) en el momento del choque, se convierte totalmente en energía cinética (asumiendo cero pérdidas por fricción), que la probeta recubierta absorbe según su capacidad de resistencia al impacto. La forma cómo interactúan la masa de choque y el recubrimiento, definen el método estandarizado para este ensayo; si la carga actúa directamente sobre el recubrimiento el método se denomina directo o de intrusión; si la carga actúa por la cara opuesta del recubrimiento aplicado, el método se denomina indirecto o de extrusión.

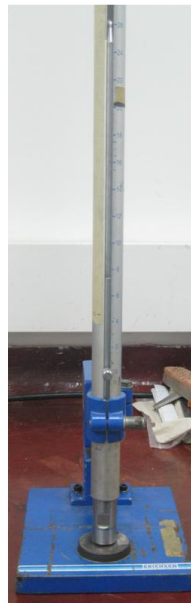
Procedimiento. El ensayo se realizo bajo condiciones de presión atmosférica, a una temperatura de $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ y a una humedad relativa de $60\pm 5\%$ y mediante el uso del equipo de impacto. La probeta es caracterizada mediante la medición de espesores de película seca en la zona en donde se aplicara la carga súbita. La integridad del recubrimiento es valorada mediante inspección visual para determinar la ausencia de defectos de fisuramiento y la aplicación del ensayo de detección de porosidad o holiday detector.

Tabla 24. Condiciones de ensayo prueba de resistencia al impacto.

Masa	1Kg
Diámetro de la masa	2.54cm
Longitud del Tubo guía	1m
Dimensión de la probeta	5x5cm
Energía de Impacto	Variada
Voltaje de detección de daños	9Vdc
Punto de impacto	Centro de la probeta

Criterios de aceptación.

No presentar Holiday después del impacto.



Equipo de impacto



Probeta expuesta a impacto

Figura 13 Ensayo de resistencia al impacto.

ENSAYO DE ELONGACIÓN

Este ensayo es basado en la norma STANDARD TEST METHODS FOR MANDREL BEND TEST OF ATTACHED ORGANIC COATINGS ASTM D522-93, este ensayo se realiza con la finalidad de observar la habilidad que posee un recubrimiento al estar sometido a esfuerzos de elongación sin producirse cuarteamiento, perder adherencia, o presentar alguna forma de falla.

El ensayo consiste en aplicar una carga de flexión hasta lograr niveles de deformación plástica de la probeta (sustrato recubierto), la cual se encuentra simétricamente apoyada sobre una superficie de un mandril de diámetro conocido. El proceso de determinación de la elongación es de tipo iterativo, en virtud a que deben realizarse todos los ensayos requeridos, para ir cerrando el intervalo del diámetro de mandril para el cual el recubrimiento mantiene su integridad.

Procedimiento. El ensayo de determinación de la elongación de un recubrimiento por el método de mandriles cilíndricos, se realizó bajo condiciones de laboratorio a presión atmosférica, a una temperatura de $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $60\pm 5\%$, la probeta es caracterizada mediante la medición de espesores de película seca.

La integridad del recubrimiento es valorada, mediante inspección visual para evidenciar la ausencia de defectos de fisuramiento y la aplicación del ensayo de detección de porosidad o holiday detector, fundamentados en un criterio de aceptación “pasa no-pasa”.

La siguiente tabla hace referencia a la correlación que se emplea para determinar el porcentaje de elongación donde:

$$E = e_1 + tc_1$$

E = elongación total, %, e_1 = elongación, %, tabla (4), t = Espesor, mils, c_1 = factor de correlación tabla (18).

Tabla 25. Valores de elongación por diámetro del mandril.

ENSAYO DE ELONGACIÓN		
Diámetro de mandril (mm)	% Elongación	Factor de Corrección
1(25)	3,3	0,21
3/4(19)	4,4	0,26
1/2(12,7)	6,75	0,38
3/8(9,5)	9	0,5
1/4(6,4)	14	0,71
1/8(3,2)	28	1,4

Tabla 26. Condiciones de ensayo prueba de elongación.

Mandril	Diferentes radios
Dimensión de la probeta	7.5x15cm
Calibre	22
Voltaje de detección de daños	9Vdc
Punto de elongación	Centro de la probeta

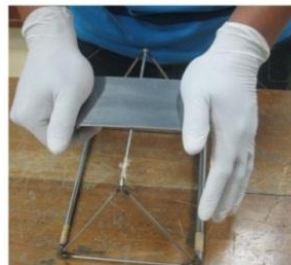
Criterios de aceptación: No presentar Holiday después del impacto.



Cupones no fisurados



Mandril



Ensayo de elongación

Figura 14 Ensayo de elongación.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

Este ensayo es basado en la norma STANDARD TEST METHOD FOR ABRASION RESISTANCE OF ORGANIC COATING BY THE TABER ABRASER ASTM D4060. La prueba consiste en simular un proceso de desgaste del recubrimiento usando ruedas abrasivas estandarizadas, durante un determinado número de ciclos, con el fin de evaluar la resistencia a la abrasión.

Procedimiento. El ensayo se realizó bajo condiciones de presión atmosférica, a una temperatura de $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de $60\pm 5\%$ y mediante el uso del equipo para abrasión TABER. La probeta es caracterizada mediante la medición de espesores de película seca, en el anillo o zona de rodadura. La probeta es instalada y ajustada en el disco que para tales efectos dispone el equipo y que gira a velocidad angular constante; sobre la superficie del recubrimiento actuaron ruedas abrasivas estandarizadas que giran perpendicularmente con el movimiento circular del disco, con una carga constante aplicada sobre la probeta para garantizar el efecto del desgaste. Este efecto de desgaste o de abrasión, se aplica en periodos prefijados en términos de ciclos o vueltas, tiempo después se realiza la toma de peso de la probeta para determinar la cantidad de masa de recubrimiento desgastada. El desgaste presentado en la película de recubrimiento, puede evaluarse de manera simultánea, con la evaluación de la reducción de espesores de película seca inicialmente registrados en la zona de desgaste.

Tabla 27. Condiciones de ensayo prueba de abrasión.

Ruedas Abrasivas	CS-17
Carga	1000 gr
Periodo de registro	200 Ciclos
Número de registros	5
Número de ciclos	1000



Cupón con fisura en el centro para adaptarlo en el equipo



Equipo Abrasimetro TABER 5150



Probetas después de abrasión

Figura 15 Ensayo de resistencia a la abrasión.

ANEXO D

ENSAYO COMPLEMENTARIO.

ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESPRENDIMIENTO CATÓDICO

Este método es basado en la norma STANDARD TEST METHODS FOR CATHODIC DISBONDING OF PIPELINE COATING ASTM G8-96. Consiste en un ensayo acelerado para determinar las características de aislamiento de un recubrimiento expuesto a la agresividad de un electrolito.

Procedimiento. Completado el tiempo de exposición a las condiciones de ensayo, se realizan ocho cortes radiales a través del defecto, cada corte se extiende 2 cm a partir del centro del defecto.

Con la punta de un bisturí y desde el centro se trata de remover cada uno de los sectores generados en el recubrimiento. Se registra el radio de desprendimiento de cada sector y se reporta un promedio. Este procedimiento se realiza durante la hora siguiente al tiempo de exposición.

Tabla 28. Condiciones de ensayo prueba de resistencia al desprendimiento catódico

Temperatura	25±2°C
Humedad	60±5%
Solución de prueba	Salmuera al 3%
Ánodo	Electrodo de Grafito
Cátodo	Probeta
Electrodo de referencia	Plata Cloruro de Plata Ag/AgCl
Potencial	1.45 con respecto al electrodo de referencia
Área de exposición	Correspondiente a un circulo de 75±2mm
Tiempo de exposición	28 Días

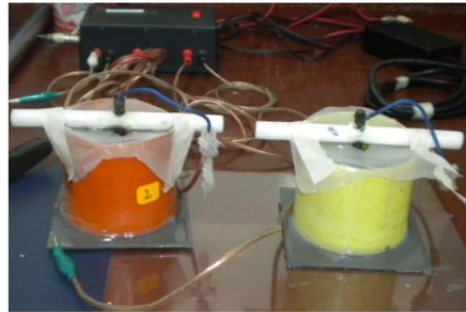
Criterios de aceptación.

Tabla 29. Criterios de aceptación prueba de resistencia al desprendimiento catódico.

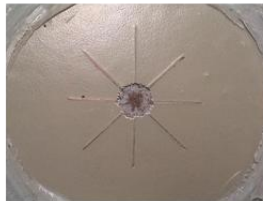
Bueno	Desprendimiento radial promedio entre 0 y 4 mm
Aceptable	Desprendimiento radial promedio mayor de 4 mm y menor de 8 mm
Deficiente	Desprendimiento radial promedio mayor de 8 mm



Cupón para el montaje de la prueba



Ensayo de desprendimiento Catódico



Probeta después del ensayo

Figura 16 Ensayo de resistencia al desprendimiento catódico.

ANEXO E

CARACTERIZACIÓN BÁSICA.

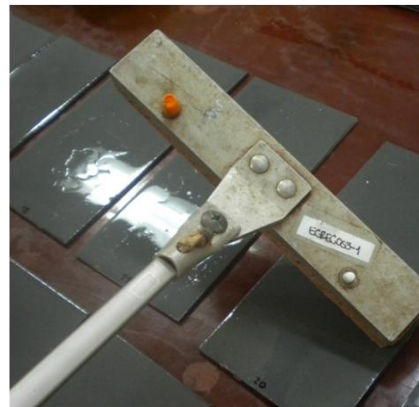
ENSAYO DE DISCONTINUIDAD ELÉCTRICA HOLIDAY

Este ensayo es basado en la norma STANDARD PRACTICE FOR DISCONTINUITY (HOLIDAY) TESTING OF NONCONDUCTIVE PROTECTIVE COATING ON METALLIC SUBSTRATES ASTM D5162-08. Este ensayo utiliza un instrumento eléctrico detector de fallas (Holiday Detector) de advertencia audible.

Procedimiento. Se realizó la detección de Holidays por medio del equipo de bajo voltaje y con un voltaje de 9V. Este criterio se determina de acuerdo al espesor mínimo detectado 20 mils. La detección de discontinuidad en la probeta se da por medio de advertencia audible.



Equipo Holiday



Detección de porosidad sobre las probetas

Figura 17 Equipo detector de porosidades (Holiday)

ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)

Este ensayo es basado en la norma STANDARD PRACTICE FOR VERIFICATION OF ALGORITHM AND EQUIPMENT FOR ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE MEASUREMENTS ASTM G106-89, esta prueba tiene como finalidad , conocer

información sobre el comportamiento o desempeño del recubrimiento en cuanto a: mecanismo de protección y magnitud o umbral de protección.

La técnica de espectroscopia de impedancia (EIS), ha permitido disponer de metodologías no-destructivas para la evaluación de la degradación de un sistema de recubrimientos expuesto a un ambiente determinado. En la mayoría de los casos, un producto o esquema de recubrimiento ideal para el control de la corrosión, es aquel que permite disponer de una película con alta resistencia eléctrica al paso de los iones a través de sus intersticios y un bajo nivel de capacitancia.

En este caso de estudio el poliuretano posee mecanismo de protección efecto barrera, este mecanismo está basado en el principio físico de crear una barrera eléctricamente aislante y de obstrucción, para dificultar la creación de caminos iónicamente conductores y por ende, obstaculizar el paso de los contaminantes. Para este tipo de protección, el recubrimiento no dispone de pigmentos ni aditivos, que reaccione con los contaminantes que pasan a través de sí. En estas condiciones, inicialmente la impedancia de la película tendrá un valor relativamente alto, por el mismo carácter de aislante del producto y en la medida que ocurra la degradación del recubrimiento por su exposición en el medio, ocurrirá el paso de agentes contaminantes que irán saturando los poros y conduciendo a una disminución de su impedancia. Es probable que durante el monitoreo el comportamiento del recubrimiento, hayan aumentos en la impedancia que obedecerán a la formación de productos de corrosión o ampollamiento, que se han comportado como resistencias al paso de los agentes contaminantes, pero si esta situación se presenta, habrá una tendencia semi-cíclica y gradual, de disminución de la impedancia con el tiempo.

Procedimiento. Se prepara la celda para realizar el ensayo, esta consta de un electrodo de trabajo (probeta), electrodo de referencia (calomel), contraelectrodo

(platino) y sus respectivas conexiones al equipo IM6, luego de realizar lo anterior y con el software Thales se introducen los parámetros para la corrida del ensayo.



Figura 18 Equipo IM6, para ensayo de impedancia electroquímica (EIS)

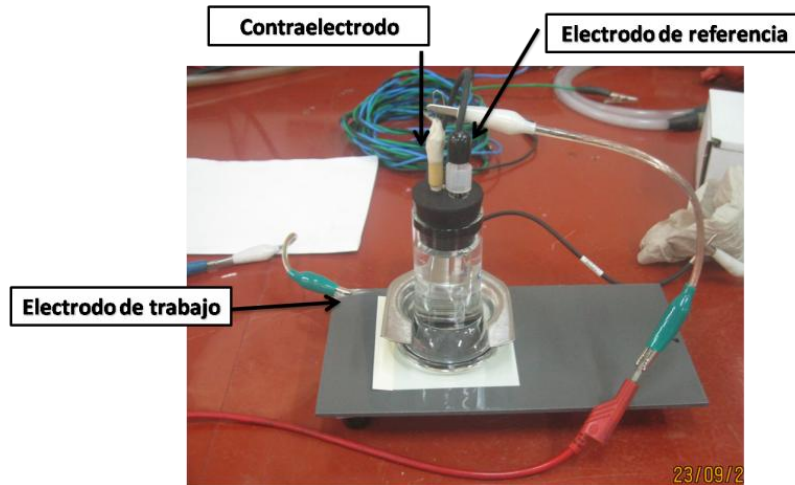


Figura 19 Celda de trabajo para impedancia electroquímica (EIS)

Tabla 30. Condiciones de ensayo impedancia electroquímica (EIS)

Temperatura	25±2°C
Solución	Salmuera 3%
Voltaje	50mV
Rango de frecuencia	20mHz-200KHz
Electrodo de referencia	Calomelo Saturado
Contraelectrodo	Platino
Electro de trabajo	Probeta
Monitoreos	3
Equipo	IM6 Zahner Electric
Software de análisis	Thales Zahner Electric

Condiciones de ensayo.

Aceptable: $R_{po} \text{ inicial}/R_{po} \text{ final} < 1E3 \text{ Ohm}$

No aceptable: Si las $R_{po} \text{ inicial}/R_{po} \text{ final}$ es $\geq 1E3 \text{ Ohm}$

ESPESOR DE PELÍCULA SECA

Este ensayo está basado en la norma STANDART TEST METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT OF DRY FILM THICKNESS OF NONMAGNETIC COATNGS APPLIED TO A FERROUS BASE ASTM D1186-01. Este ensayo es de medición directa, puntual y no-destructiva, para determinar el espesor de película seca de un recubrimiento, lo cual representa el parámetro fundamental para la caracterización básica.

Procedimiento. Antes de la realización del ensayo se debe garantizar que la superficie esté libre de cualquier materia particulado y que la superficie a evaluar este totalmente curado, después de verificar lo anterior se procede a poner de manera perpendicular sobre la superficie y leer el valor que es arrojado del equipo.



Figura 20 Equipo medidor de espesores Positector 6000

ENSAYO DE ADHERENCIA

Este ensayo está basado en la norma STANDARD TEST METHOD FOR PULL OFF STRENGTH OF COATINGS USING PORTABLE ADHESION TESTERS ASTM D4541-09e1, tiene como finalidad saber cuánto resiste un recubrimiento ante un esfuerzo de tensión aplicada sobre la superficie y es una prueba de carácter destructivo.

Procedimiento. Consiste en pegar un dispositivo de metal (Dolly) a la superficie del recubrimiento en forma perpendicular. Luego que el pegamento ha curado se mide la fuerza necesaria para desprender el Dolly del recubrimiento. La fuerza de tensión en (Psi o en Mpa) resultante es la medida de la adherencia del recubrimiento.

Tabla 31. Condiciones de ensayo prueba de adherencia Pull-Off

Temperatura	25±2°C
Humedad	60±5%
Equipo	Pull-Off Mecánico



Figura 21 Equipo de adherencia Pull-Off mecánico.

ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Este ensayo está basado en la norma STANDARD TEST METHOD FOR WATER VAPOR TRANSMISSION OF ORGANIC COATING FILMS ASTM D1653-03. Esta prueba consiste en establecer la habilidad de un recubrimiento para actuar como una barrera de aislamiento, al paso del vapor de agua hacia el material a proteger contra la corrosión.

Procedimiento

La membrana de cada sistema se coloca sellando una copa que contiene material higroscópico (tamiz molecular). El montaje de estos sistemas se coloca dentro de la cámara de exposición, en un ambiente húmedo.

Debido a una diferencia de presión entre las caras de la membrana se genera un flujo de vapor hacia el interior de la copa. Esto ocasiona variaciones de la masa de la copa con el tiempo indicando la velocidad de ingreso de vapor de agua a través de la membrana.

Se hacen mediciones de masa al iniciar la prueba y cada 24 horas hasta completar 312 horas.

Con estos datos se calcula el índice "WVT", [$\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot \text{mmHg}$] que muestra el incremento de masa cada 24 horas por unidad de área y por unidad de diferencia de presión.

Tabla 32. Condiciones de ensayo prueba de permeabilidad al vapor de agua.

Temperatura de la cámara	30°C
Humedad	90%

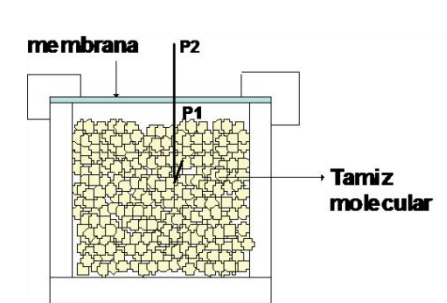
Criterios de aceptación.

Bueno: promedio WVT < 0.04 g/m²*24h*mmHg

Aceptable: promedio WVT >0.04 g/m²*24h*mmH



Membranas



Esquema general de la copa



Copas dentro de la cámara



Cámara de humedad relativa adaptada para la prueba de permeabilidad al vapor de agua

Figura 22 Cámara a humedad relativa adecuada para ensayo de permeabilidad al vapor de agua.