

**DETERMINACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL POLIURETANO CAST-  
URETHANE, COMO MATERIAL PARA LA FABRICACIÓN DE BANDAS  
PROTECTORAS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA Y DE AISLAMIENTO  
ELÉCTRICO, DE LA SUPERFICIE INTERNA EN LAS UNIONES BRIDADAS**

**SILVIA ALEJANDRA VILLALBA BOLAÑOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2015**

**DETERMINACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL POLIURETANO CAST-  
URETHANE, COMO MATERIAL PARA LA FABRICACIÓN DE BANDAS  
PROTECTORAS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA Y, DE AISLAMIENTO  
ELÉCTRICO, DE LA SUPERFICIE INTERNA EN LAS UNIONES BRIDADAS**

**SILVIA ALEJANDRA VILLALBA BOLAÑOS**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniera Metalúrgica**

**Director**

**GUSTAVO EMILIO RAMÍREZ CABALLERO  
Ingeniero Químico, PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2015**

Gracias, señor  
Por hacerme débil  
Loco  
Infantil  
Gracias por estas cárceles  
Que me liberan  
Por el dolor que conmigo empezó  
Y no cesa  
Gracias por toda mi fragilidad tan flexible  
Como tu arco  
Señor amor.

*Raúl Gómez Jattin*



**COLECTIVO POR LAS  
MUJERES UIS**

## Agradecimientos:

El desarrollo de este proyecto se dio gracias al trabajo, trabajo en conjunto e interrelación de las diferentes instituciones que, en su totalidad, permitieron que su experiencia y labor se tomaran como base de conocimiento y marco de teoría. Mis más sinceros agradecimientos a la comunidad de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, del Grupo de Investigación en Polímeros, de la Corporación para la Investigación de la Corrosión y, a mis compañeros de corazón de la comunidad UIS y de la vida, que han sido el camino mediante el cual se logra el desarrollo del planteamiento y análisis de esta tesis.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS .....	16
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. CAST-URETHANE.....	17
2.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE LA BANDA.....	19
2.2.1. Habilidad para el control de la corrosión atmosférica .....	19
2.2.2. Variables de montaje.....	19
2.2.3. Funcionalidad.....	20
2.2.4. Manufactura .....	20
3. PROCEDIMIENTO LLEVADO A CABO.....	21
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	24
4.1. INSPECCIÓN VISUAL PRELIMINAR .....	24
4.2. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL .....	25
4.3. CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA .....	26
4.4. CARACTERIZACIÓN DIELECTRICA.....	26
4.5. CARACTERIZACIÓN FISICOMECAÁNICA.....	26
4.6. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA .....	28
4.7. COMPORTAMIENTO EN AMBIENTES SIMULADOS.....	31

5. CONCLUSIONES.....	43
6. RECOMENDACIONES.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45
REFERENCIAS .....	48
ANEXOS .....	49

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Compilación de los resultados.....	28

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Representación de un sistema de acople entre bridas.....	15
Figura 2. Bridas corroídas por la condición atmosférica.....	17
Figura 3. Reacción de polimerización.....	17
Figura 4. Imagen del microsandblasting.....	23
Figura 5. Superficie inferior de una lámina de Cast-Urethane.....	24
Figura 6. Micrografía de dos niveles diferentes de poliuretano.....	25
Figura 7. Termograma del Cast-Urethane.....	28
Figura 8. Comportamiento en tensión del Cast-Urethane por la temperatura.....	29
Figura 9. Reducción del porcentaje de brillo del Cast-Urethane.....	32
Figura 10. Vaciado de la mezcla polimérica en el molde de silicona.....	34
Figura 11. Banco de pruebas o Loop.....	35
Figura 12. Detalle del sistema de instalación de la banda de Cast-Urethane.....	36
Figura 13. Banco de pruebas al interior de la cámara salina posterior al ensayo...	37
Figura 14. Superficie del lomo e interna de la unión bridada del sistema 2.....	37
Figura 15. Todas las bridas tienen un resalte de 1/16”.....	38
Figura 16. Comparación cualitativa de los sistemas.....	39
Figura 17. Resultados del tratamiento en Matlab.....	40
Figura 18. Superficie interna de una brida protegida por el Cast-Urethane.....	41
Figura 19. Zona inferior de la Banda y de la unión del sistema 4.....	41

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
ANEXO A. ESPECIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	49
ANEXO B. PLANO DEL MONTAJE DEL LOOP.....	53

## RESUMEN

**TÍTULO:** DETERMINACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL POLIURETANO CAST-URETHANE, COMO MATERIAL PARA LA FABRICACIÓN DE BANDAS PROTECTORAS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA Y DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO, DE LA SUPERFICIE INTERNA EN LAS UNIONES BRIDADAS\*

**AUTORA:** SILVIA ALEJANDRA VILLALBA BOLAÑOS\*\*

**PALABRAS CLAVES:** ricino, poliuretano, banda de protección, corrosión atmosférica, uniones bridadas, aplicabilidad en la industria.

### DESCRIPCIÓN:

Estudios previos han dejado insinuación del posible uso del Cast-Urethane como material de aplicabilidad industrial, cuya innovación radica en reemplazar los polioles de origen petroquímico utilizado en los poliuretanos comerciales, por polioles obtenidos a partir del aceite de ricino en combinación con el glicerol obtenido como subproducto de la fabricación del biodiesel. Los resultados obtenidos en evaluaciones en laboratorio y su comparación de habilidades técnicas con materiales comerciales de uso universal, fundamentan las bases para plantear la posible aplicabilidad del Cast-Urethane, en el control de la corrosión atmosférica, en forma de banda de protección para uniones bridadas y que de manera dual, realiza la función de aislamiento eléctrico en éstas. Esta tesis plantea el procedimiento para la selección de las variables de diseño clave que se deben tener en cuenta en la determinación de dicha aplicabilidad (habilidad para el control de la corrosión atmosférica, variables de montaje, funcionalidad y manufactura) y, el análisis de los resultados experimentales como herramienta para plantear la hipótesis del comportamiento del material y la selectividad de sus cualidades con miras a la aplicación industrial.

Este trabajo junta diferentes técnicas de evaluación mediante la caracterización microestructural, fisicoquímica, dieléctrica, fisicomecánica, térmica, el comportamiento en ambientes simulados e inspección visual micro-macro; para la evaluación del desempeño de la banda como sistema de control de la corrosión atmosférica y aislamiento eléctrico de uniones bridadas. Los resultados de evaluación de desempeño en ambientes simulados, permitieron reafirmar la potencialidad de competencia del Cast-Urethane, al obtenerse niveles de eficacia similares a la obtenida con bandas de protección comerciales de origen foráneo.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director PhD. Gustavo Emilio Ramírez Caballero

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATION OF THE APLICABILITY OF THE CAST-URETHANE POLIURETHANE, AS A MATERIAL FOR THE FABRICATION OF FLANGES PROTECTORS OF ATMOSPHERIC CORROSION AND INSULATION BANDS\*

**AUTHOR:** SILVIA ALEJANDRA VILLALBA BOLAÑOS\*\*

**KEYWORDS:** castor, polyurethane, protection band, atmospheric corrosion, flanged joints, industrial applicability.

### DESCRIPTION:

Previous numerous studies have left implication of the potential use of the material polyurethane Cast Urethane as a material for industrial applications. The results of the laboratory evaluations are taken as an indication for raising the potential applicability of polyurethane developed with castor oil and glycerol, in the control of atmospheric corrosion problem, as protection band flanged joints and electric insulator. This bachelor thesis presents the procedure for the selection of the key design variables that must be taken into account in determining such applicability (ability to control atmospheric corrosion and electric insulaton, variable mounting, functionality and manufacturing) and analysis experimental results as a tool to hypothesize the behavior of the material Cast-Urethane and the selectivity of its qualities with industrial application.

This bachelor thesis meets different laboratory evaluation techniques using microstructural, physicochemical, dielectric, fisicomechanical, thermal, behavior in simulated environments and visual inspection, for performance evaluation as a protective band of atmospheric corrosion and electrical insulation of flanged joints. Universally used in the industry. The results of the behavior of the Cast-Urethane in simulated environments enabled to reaffirm the potential competition of Cast-Urethane, due to the obtained levels are similar and also superior to that obtained with commercial bands protection of foreign origin efficacy.

---

\* Bachelor thesis

\*\* Physic-chemist Engineering Faculty. Metallurgic Engineering School, Director PhD. Gustavo Emilio Ramirez Caballero.

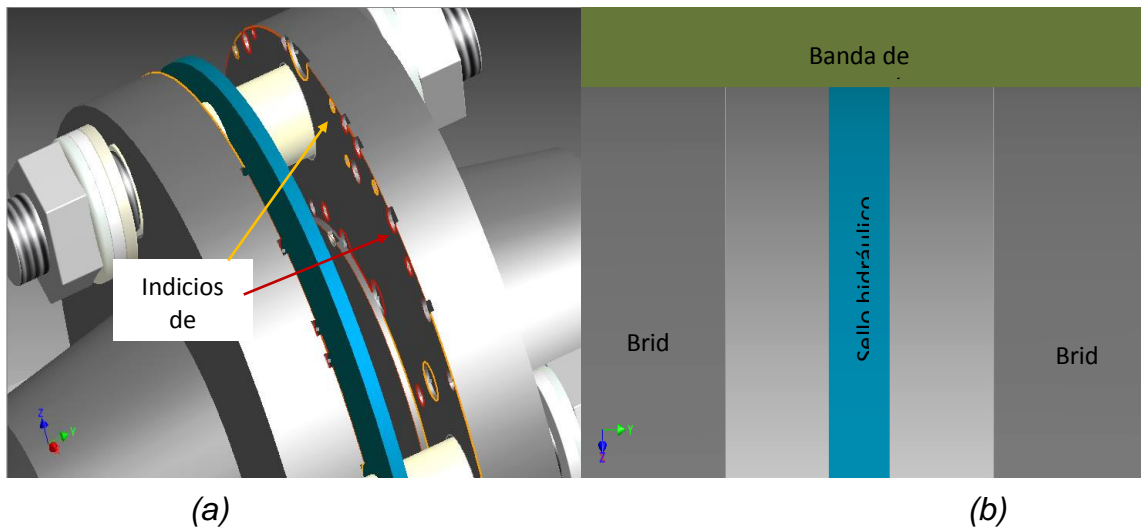
## INTRODUCCIÓN

Como respuesta a la invitación que hace el Grupo de Investigación en Polímeros (en adelante GIP) a la comunidad académica; mediante los análisis y resultados, y continua pesquisa de las propiedades y potenciales desarrollos del glicerol (subproducto de la producción de biocombustible); a potencializar sus investigaciones de las aplicaciones del mismo en las diferentes industrias; nace la rama de estudio del poliuretano fabricado a partir de este, y con dicho polímero, el interés de esta investigación. La cual se centra en determinar si el Cast-Urethane posee las cualidades para ser competitivo como Banda protectora de la corrosión atmosférica y aislante eléctrica en las uniones bridadas.

La mayoría de los polímeros presentes en la industria son sintetizados a partir de materias primas derivadas de fuentes petroquímicas que son recursos fósiles naturales no renovables, generando además de su futura inexistencia, un problema ambiental debido a la baja degradabilidad que presentan. Es por esto que la búsqueda de nuevas fuentes de bajo impacto ambiental, reciclables, reutilizables y para las cuales su obtención no requiera un efecto nocivo al planeta; es un tema de natural interés de la comunidad académica y en general, de la sociedad en todas sus generaciones.

Los aceites de origen vegetal que contienen grupos hidroxilo, son una alternativa atractiva y competitiva como reemplazo de aquellos procedentes de la industria petroquímica. El Cast-Urethane es un poliuretano que se sintetiza con aceite de ricino en vez de alcoholes. Promoviendo además del uso de materias primas renovables, el aprovechamiento del espacio para la sana agricultura. En la figura 1 se muestra una esquematización de lo que se pretende prevenir con el Cast-Urethane (a), logrando un aislamiento completo de la hendidura del medio atmosférico (b).

Figura 1. Representación de un sistema de acople entre bridas



(a) Expuesto a la intemperie, (b) Protegido por una banda. La geometría del sistema implica una hendidija expuesta parcialmente al ambiente, generando un microambiente que promueve la acumulación de productos atmosféricos. Es este microambiente lo que se quiere evitar con el uso de la banda de protección de Cast-Urethane. Inventor CAD.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

- Determinación de la aplicabilidad del poliuretano Cast-Urethane, desarrollado por el Grupo de Investigación en Polímeros de la UIS, como material para la fabricación de bandas protectoras de corrosión atmosférica y, de aislamiento eléctrico, de la superficie interna en las uniones bridadas

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir las variables de funcionalidad requeridas en un material que actuará como elemento de protección de corrosión atmosférica y aislamiento eléctrico de bridas.
- Caracterizar un poliuretano desarrollado a partir de aceite de ricino y poliglicerol; Cast-Urethane, en su aplicabilidad como material para la fabricación de bandas protectoras de la corrosión atmosférica y aislante eléctrica de la superficie de las uniones bridadas.
- Diseñar e implementar las metodologías y facilidades de ensayos en laboratorio para establecer el comportamiento de las variables críticas de funcionalidad del Cast-Urethane como sistema de protección de corrosión atmosférica y aislamiento eléctrico de uniones bridadas.
- Diseñar el sistema de montaje de la banda en la unión bridada, definir las variables de proceso de fabricación del producto y, fabricar una banda prototipo.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. CAST-URETHANE

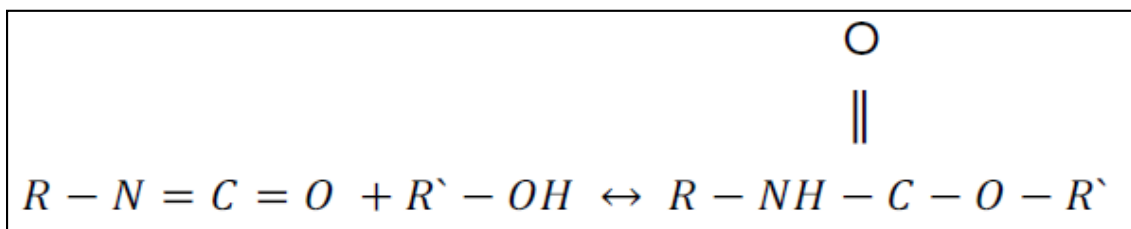
Debido a que la obtención de un polímero de determinadas propiedades mecánicas está en función de las variables del proceso de síntesis del mismo, y como estas pueden ser tantas, se definió el nombre de Cast-Urethane como la síntesis (la mezcla específica de variables) de la obtención del material que en esta tesis se evalúa.

Figura 2. Bridas corroídas por la condición atmosférica



Fuente: DB & Co: Aislamiento térmica y seguridad industrial

Figura 3. Reacción de polimerización



Fuente: Buitrago, Fuentes y García [7]

Reacción entre un grupo hidroxilo y un grupo isocianato para formar un grupo uretano. Es la cinética de transesterificación simple (reacción equimolar de diácido y diol) la que controla la velocidad de polimerización.

El prefijo 'Cast' hace referencia al proceso primario de obtención del sólido; moldeado, o en inglés 'as Cast', y la palabra 'Urethane' por el uretano. El poliuretano es un material polimérico que tiene como unidad repetitiva el uretano producido de la reacción de un diisocianato (diácido) ( $-N=C=O$ ) con un alcohol (diol) ( $-OH$ ). Ver figura 3. Los poliuretanos poseen tres componentes principales: un macro-diol, un diisocianato y un extensor de cadena. El macro-diol es el componente blando con una estructura amorfa que gobierna las propiedades del material a bajas temperaturas (para el caso del Cast-Urethane, se trata de una mezcla definida entre aceite de ricino y glicerol 15:85 %peso). El diisocianato y el extensor de cadena son el componente rígido, con cierto grado cristalinidad que refuerza al material.

Las diferentes variables de proceso de polimerización de poliuretano permiten la fabricación de materiales diseñados a la medida de la necesidad. De investigaciones pasadas del GIP, los resultados de los ensayos de laboratorio de estos diferentes materiales de poliuretano, han dejado insinuación de su posible uso como material protector de la corrosión atmosférica de sistemas metálicos, puesto que se observa que las mezclas desarrolladas por el GIP son resistentes ellas mismas a la corrosión atmosférica; es decir, la degradación de su integridad y la de sus propiedades, ocasionada por las condiciones medioambientales normales (fluido y material particulado), ocurren a velocidad casi imperceptible.

El diseño del plan de desarrollo para el cumplimiento del objetivo de esta tesis es de fundamental importancia puesto que definió en el orden apropiado, las diferentes variables y características que debe cumplir el material, conservando la austeridad de los recursos, y dando aprovechamiento a los datos que ya se han obtenido gracias al trabajo e investigación previos, del GIP y la Corporación para la Investigación de la Corrosión (en adelante CIC).

La teoría de esta investigación se da dentro del marco del plan de desarrollo, bajo la guía del equipo de trabajo de este proyecto, así:

## **2.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE LA BANDA**

**2.2.1. Habilidad para el control de la corrosión atmosférica** Se debe definir si la banda de Cast-Urethane puede controlar efectivamente la corrosión atmosférica en las superficies de las bridas. Para esto la Banda debe tener excelente comportamiento en todo aquello que corresponda a su capacidad de aislar la hendidura del medio, evitando la formación del microambiente esquematizado en la figura 1a. Para ello se tiene en cuenta su:

- Resistencia a la abrasión, debido al material particulado que se mueve a través de la atmósfera.
- Desempeño en ambiente salino, buscando clasificar su funcionalidad según el tipo de atmósfera.
- Desempeño en ambiente de humedad relativa al 100%, buscando clasificar su funcionalidad según el tipo de atmósfera.
- Permeabilidad al vapor de agua, puesto que si permite el paso de éste, la Banda no será capaz de aislar la hendidura del medio.
- Resistencia a la radiación ultravioleta, como determinante de su degradabilidad debido a los rayos solares.

En otras palabras, se determina la corrosividad del material como consecuencia de la interacción de éste con los constituyentes atmosféricos.

**2.2.2. Variables de montaje** Que permitan que la instalación de la Banda se dé de manera fácil y confiable, para esto se especifican las propiedades requeridas conforme a la realidad en el campo:

- Resistencia a la tensión, aplicada por el operario al momento de su cierre.
- Estabilidad y hermeticidad del sistema de acople, que provea seguridad en cuanto al continuo correcto funcionamiento de la Banda.
- Estabilidad del sistema de cierre, que provea seguridad en cuanto al continuo correcto funcionamiento de la Banda.

- Factibilidad de re-uso, permitiendo utilizar la Banda después de ser desmontada debido a alguna necesidad de planta.

**2.2.3. Funcionalidad** Para determinar si el Cast-Urethane dispone de características físico-químicas adecuadas para ser competitivo en la operación de un mercado amplio de demanda. Para esto se deben obtener resultados sobresalientes, respecto de las bases de datos de otros materiales competentes, en su capacidad de:

- Resistencia térmica,
- Resistencia dieléctrica.

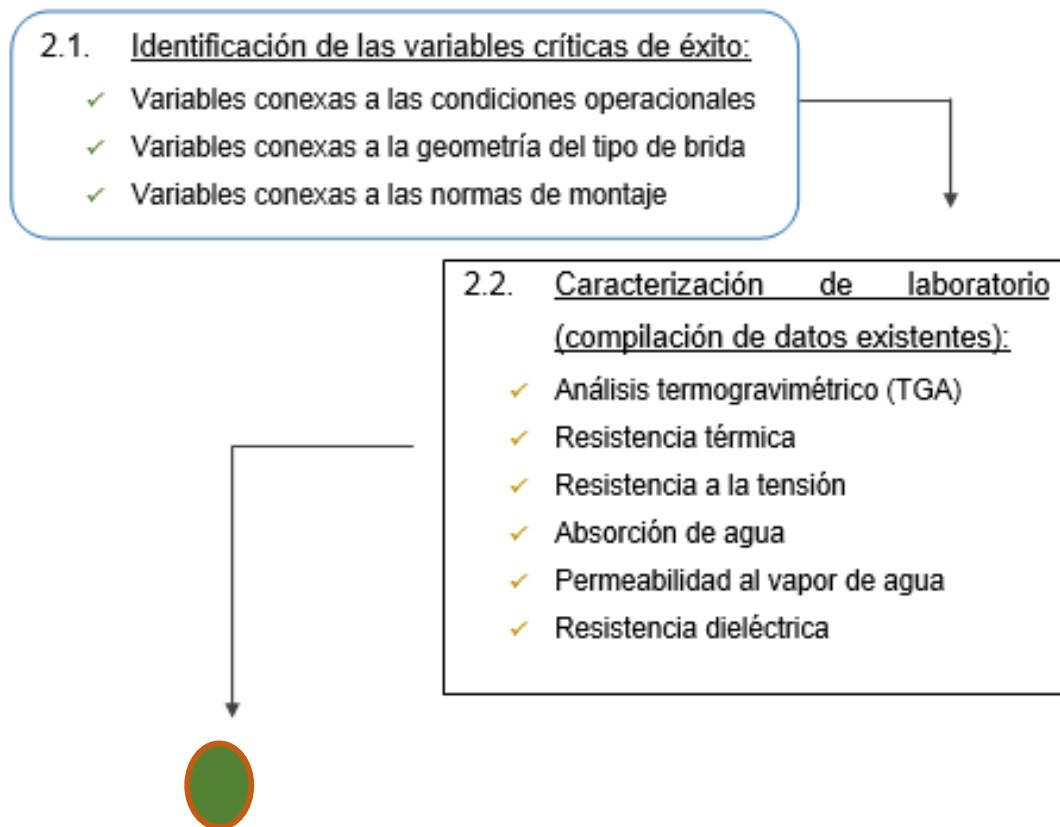
**2.2.4. Manufactura** Con el objeto de definir si es técnicamente viable el uso del Cast-Urethane, para la fabricación de bandas de protección de uniones bridadas y, la posibilidad de que puedan competir económicamente con productos importados. Para esto el material debe ser adaptable a un proceso sencillo de:

- Moldeo,
- Curado del polímero,
- Sistema de acople,
- Sistema de cierre.

### 3. PROCEDIMIENTO LLEVADO A CABO

Como se mencionó anteriormente, se planteó un plan de desarrollo que permitió hacer análisis del desempeño del material como protector de la corrosión atmosférica y aislante eléctrico. Esperando, en pocas palabras, que el Cast-Urethane además de no corroerse, actúe como barrera del medio atmosférico cualquiera que fuere y, no permita que exista un camino iónicamente conductor entre las dos superficies de las bridas.

Flowsheet del procedimiento:





2.3. Diseño y construcción del banco de pruebas:

- ✓ Documentación de instalación y montaje
- ✓ Diseño del banco de pruebas o Loop
- ✓ Construcción del banco de pruebas
- ✓ Protocolo de montaje de la Banda



2.4. Diseño y construcción de la banda de Cast-Urethane:

- ✓ Definición de las variables de montaje
- ✓ Concepto de la viabilidad de montaje y conformado del Cast-Urethane
- ✓ Diseño, replanteos y construcción de la banda cupón



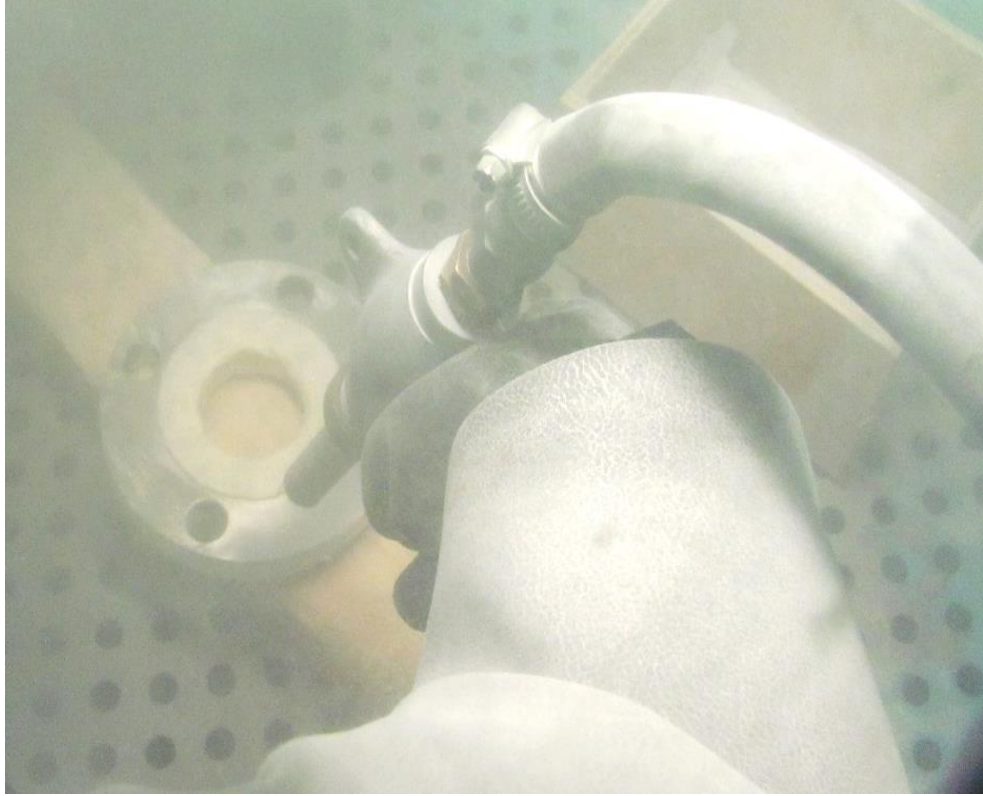
2.5. Evaluación del desempeño de la banda como protectora de la corrosión atmosférica de uniones bridadas:

- ✓ Resistencia a la radiación Ultravioleta
- ✓ Ambiente de Humedad Relativa al 100%
- ✓ Evaluación de la Banda en cámara de niebla salina



2.6. Evaluación y análisis de resultados

Figura 4. Imagen del Microsandblasting



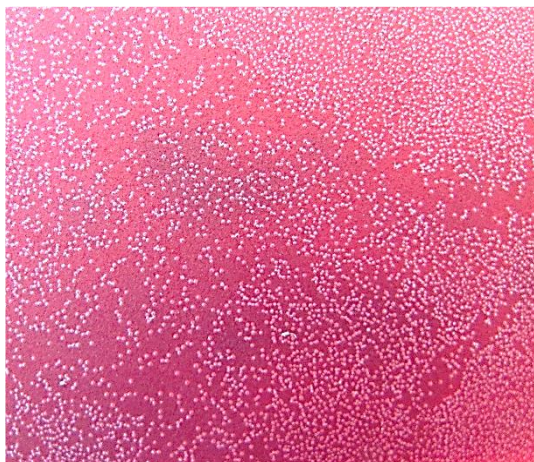
Fuente: Equipo MHG Strahlanlagen GmgH

Realizado para la limpieza preliminar de la superficie interna de las bridas utilizadas en el montaje de la evaluación en Cámara salina (Loop). Operario Sergio Guecha, CIC.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. INSPECCIÓN VISUAL PRELIMINAR

Figura 5. Superficie inferior de una lámina de Cast-Urethane de 5mm de espesor



Se observa la presencia de burbujas de diámetro promedio de 0,25 mm.

Las láminas de Cast-Urethane presentan porosidades distribuidas no homogéneamente en su interior y, en la superficie inferior (respecto del moldeo). Ver figura 5. Esta condición genera una mayor concentración de los esfuerzos, puesto que el área transversal de resistencia aumenta conforme lo hace el área superficial total de las discontinuidades volumétricas, y así disminuye la fuerza requerida para alcanzar el límite de rotura. El poliuretano con el cual se trabaja es un material traslúcido y fue sintetizado con pigmento hidrofílico para darle identidad al producto en términos de su color.

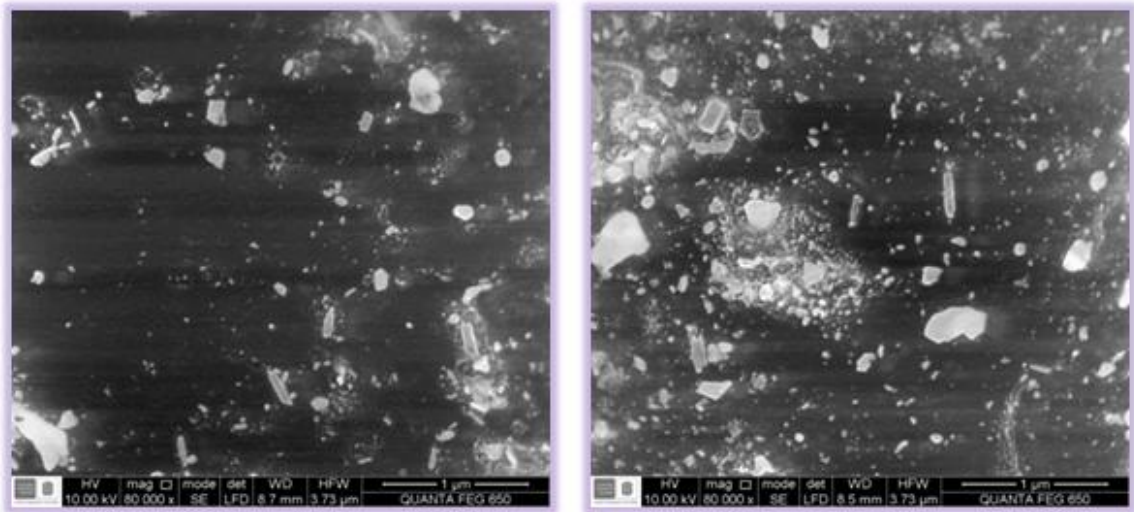
Se identificaron las variables críticas de éxito de acuerdo con los requerimientos básicos del comportamiento de un material utilizado como banda de protección de la corrosión atmosférica y aislante eléctrico de uniones bridadas.

Los resultados desglosados a continuación y compilados en la tabla 1 (junto con su respectiva fuente de información), se obtuvieron en investigaciones preliminares. Los criterios de aceptación se establecieron de acuerdo a la confiabilidad que se

pretende en la funcionalidad de la Banda y tomando como referencia la base de datos SHIREC de la CIC. La especificación de la realización de los ensayos de laboratorio se encuentra en el Anexo A.

#### 4.2. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

Figura 6. Micrografía de dos niveles diferentes de poliuretano



Fuente: Diaz, Muñoz y Ramirez [1]

Micrografía de dos niveles diferentes de poliuretano desarrollado por el GIP. Se observa una matriz oscura blanda correspondiente a la mezcla glicerol y aceite de ricino y, un constituyente blanco de mayor dureza del cual su cantidad presente en el polímero depende de las variables de síntesis. Imagen Revelada con SEM. 80000X.

La figura 6 corresponde a las microestructuras de dos niveles de poliuretano que se caracterizan en función de los factores del proceso de síntesis. Esta imagen resulta de gran importancia para entender que existe una influencia de las variables de polimerización, en las propiedades microestructurales del material moldeado.

### **4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA**

**ABSORCIÓN DE AGUA:** corresponde a la cantidad de agua que absorbe el material cuando logra estar sustancialmente saturado. Comercialmente los materiales más utilizados con función dual de barrera física y aislamiento eléctrico son compuestos de resina fenólica y epóxica, reforzados con tejido de algodón y de vidrio. Estos materiales marcan un rango de absorción de agua entre 0,1 y 2,5 por ciento [2]. Basados en lo anterior, la banda de Cast-Urethane es competitiva si el material dispone de un nivel de absorción de agua enmarcado en este rango.

### **4.4. CARACTERIZACIÓN DIELECTRICA**

**RESISTENCIA DIELECTRICA:** con el objeto de conocer la fuerza que opone el material a ser atravesado por una corriente eléctrica. El material no-metálico de menor resistencia dieléctrica utilizado en uniones bridadas es el caucho nitrilo butadieno NBR reforzado con fibras Aramidas y su resistencia dieléctrica corresponde a 9,84KV/mm [3]; este valor es el límite mínimo de resistencia del Cast-Urethane para que sea técnicamente competitivo en los sistemas existentes comercialmente utilizados.

### **4.5. CARACTERIZACIÓN FÍSICOMECAÁNICA**

**RESISTENCIA A LA ABRASIÓN:** la banda deberá mantener su integridad física cuando sea sometida al roce de material particulado constitutivo de la atmósfera. La aceptación del valor de esta resistencia se da por comparación relativa con la base de datos SHIREC [3] de la CIC. El límite aceptable es que el registro del Cast-Urethane se encuentre en los niveles de resistencia a la abrasión de sistemas de recubrimientos con acabados en poliuretanos, polisiloxanos, acrílicos, acrílicos uretanos y, como nivel mínimo, alquídicos. Por tanto según [4], se define el criterio de aceptación establecido en la tabla 1.

**PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA:** consiste en establecer la habilidad del material para actuar como barrera al paso del vapor de agua. El Cast-Urethane debe

mostrar excelente comportamiento para que su aplicabilidad como protector de la corrosión atmosférica sea viable. Se sigue el criterio de SHIREC en donde un resultado es Bueno si en promedio WVT  $<0.04\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot \text{mmHg}$ , y Aceptable si en promedio WVT  $>0.04\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot \text{mmHg}$ .

**RESISTENCIA A LA TENSIÓN:** bajo la premisa que una persona normal puede ejercer una fuerza de tensión de 2 N (levanta 20 Kg recorriendo con el brazo una distancia doble desde el codo hasta la punta de la mano en 8 segundos aproximadamente;  $20\text{Kg} \cdot (2 \cdot 0,40\text{m}^2/8\text{s})$ ), el material debe tener una resistencia a la tensión tal que permita que la banda sea apretada para su ajuste sin afectar su integridad fisicomecánica. Se define el criterio de aceptación con el valor mínimo de resistencia requerido, para esto se selecciona la banda de menor tamaño (para la brida de ½ clase 150) [6]; adoptando un espesor mínimo de 3,175mm (1/8") y un ancho mínimo de Banda de 40 mm, la mínima sección transversal, correspondiente al área de resistencia, es igual a  $127\text{mm}^2$ . Por tanto, manteniendo un factor de seguridad de 5, el valor mínimo admisible de resistencia a la tensión es  $0,08\text{ N/mm}^2$ .

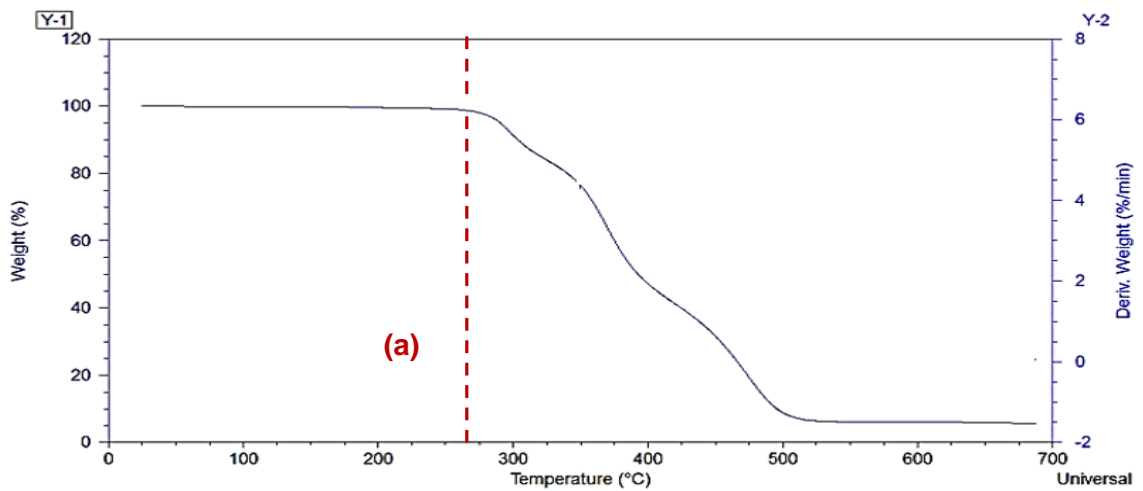
**CAPACIDAD DE ELONGACIÓN:** es fundamental para que se logre buena hermeticidad, impidiendo el paso de agentes atmosféricos en la hendidura de la unión bridada. La máxima exigencia de elongación se requiere en las bridas de menor diámetro exterior (88,9mm [6]), porque es en ellas cuando la banda tiene que flectarse en mayor medida para recubrir el lomo de las bridas. El criterio de aceptación se utiliza en la selección del resultado obtenido en función del diámetro del mandril. El resultado presentado en la tabla 1 corresponde al porcentaje de elongación aceptado obtenido en un diámetro de 3,2 mm; menor al límite establecido, con el cual haciendo ingeniería a la inversa, se determina que se trabaja con un factor de seguridad mayor al 90%, y se acepta dicho valor.

Tabla 1. Compilación de los resultados.

	<b>Cast-Urethane</b>	Fuente	Criterio de aceptación
<b>Absorción de agua (%)</b>	<b>0,31</b>	[7]	Bueno $\leq 0,1$ Aceptable $\leq 2,5$
<b>Rigidez dieléctrica (KV/mm)</b>	<b>16,3</b>	[7]	$\geq 9,84$
<b>Pérdida por abrasión mg/ciclo</b>	<b>0,045</b>	[4]	$\leq 0,05$
<b>Permeabilidad al vapor de agua (g/m<sup>2</sup>*24h*mmHg)</b>	<b>0,0224</b>	[4]	$< 0,04$
<b>Resistencia a la tensión (MPa)</b>	<b>7,69</b>	[7]	$\geq 0,08$
<b>Capacidad de elongación (%)</b>	<b>34,3</b>	[4]	Diámetro del mandril
<b>Competitividad térmica (°C)</b>	<b>50</b>	Figura 7	Alta $\geq 93$ Aceptable $\geq 40$

#### 4.6. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

Figura 7. Termograma del Cast-Urethane

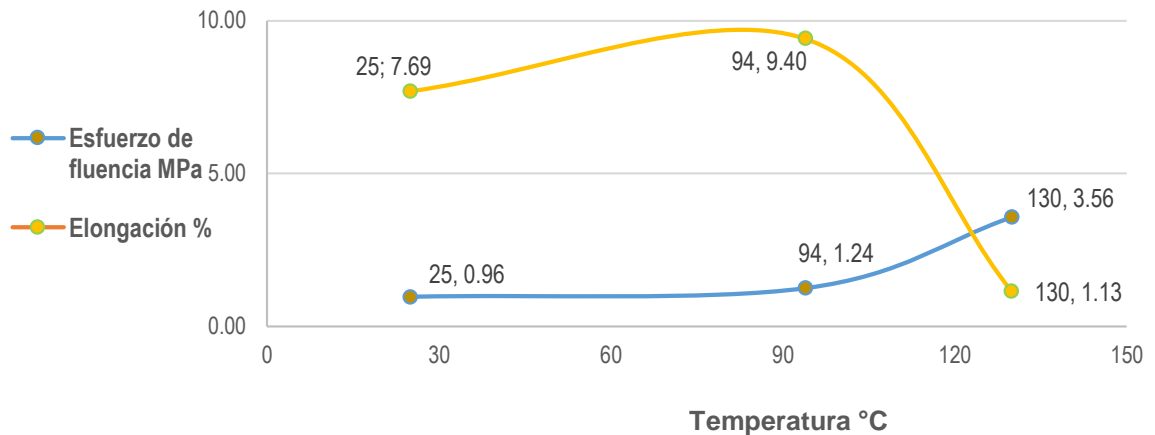


Fuente: Araque, Fuentes y García [7]

La primera región (hasta 270 °C) corresponde al comienzo de la degradación del material donde volatilizan compuestos de cadena corta presentes en la muestra que no hacen parte de la red de poliuretano, e.g.: compuestos presentes en el isocianato comercial y en el aceite. La segunda región (entre 270 y 500 °C) corresponde a la volatilización de las ramificaciones presentes en las moléculas que forman los enlaces uretano pero que no alcanzaron a reaccionar, p.e.: secciones de ácidos, esterres, e incluso grupos isocianato. La tercera región (desde 500 °C) representa el fin del proceso de degradación del material, en el que por efecto de las temperaturas elevadas, se rompen los enlaces uretano volatilizándose así la mayoría de los componentes de la red polimérica.

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO: mediante el cual se pudo establecer que el Cast-Urethane es térmicamente estable por debajo de 250°C y pierde más del 90% de su peso después de los 500°C. Se presenta en la figura 7 la curva obtenida.

Figura 8. Comportamiento en tensión del Cast-Urethane por la temperatura



Comportamiento en tensión del Cast-Urethane en función de la temperatura. Datos obtenidos en la Máquina Universal de Ensayos MC WDW-205, Laboratorio de Resistencia de Materiales, UTS.

**CAPACIDAD DE RESISTENCIA TÉRMICA:** la capacidad de resistencia térmica determina el grado de competitividad del material. Para analizarla se debe tener en cuenta la cualidad específica que se pretende mantener en presencia simultánea del esfuerzo térmico; en este caso la resistencia a la tensión puesto que la Banda permanecerá flectada sobre los lomos de las bridas mientras esté en servicio. Se establece la buena competitividad del Cast-Urethane en función de la capacidad térmica máxima conocida para otros materiales del mismo mercado; 93,3°C [3], y un valor aceptable en función de las condiciones térmicas de servicio normal. Para determinar el grado de competitividad se compara la resistencia a la tensión del material luego de ser este, en diferentes probetas (con dos testigos cada una), sometido durante 24 horas a 94 y 130 °C, con el valor de la resistencia a la tensión original. La figura 8 representa gráficamente los datos obtenidos.

La curva azul muestra el comportamiento del esfuerzo de fluencia requerido para lograr la rotura de la probeta. Evidentemente se nota la influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico del material, es decir, el Cast-Urethane es un material sensible a ser tratado térmicamente. Se calentaron las probetas junto con la estufa que las contenía, y a partir del momento en que la estufa logra la temperatura de reacción se inició el conteo de las 24 horas, al final del tiempo se apagó la estufa permitiendo que ésta enfriara con las probetas dentro. Se plantea la hipótesis de que la red polimérica con la temperatura aumenta su grado de extensión por el aumento en la eficiencia de unión de enlaces químicos equimolares entre el diácido y el diol. La sensibilidad del material a la temperatura se traduce en su capacidad de extender las redes poliméricas, incrementando la estructura de mayor cristalinidad que refuerza al material; el precipitado. Sin embargo dicho endurecimiento no puede ser avalado directamente puesto que se observa que las probetas son frágiles mientras se encuentran a altas temperaturas. En la figura 7, la línea roja (a) indica la temperatura ( $\Delta T + 50$  °C) a la cual el material presenta su primera disminución de peso como consecuencia de la volatilización de compuestos de cadena corta presentes en la muestra que no hacen parte de la red de

poliuretano, permitiendo incrementar la reacción entre los componentes de interés, y en consecuencia con la hipótesis, logrando endurecimiento por la dispersión de un precipitado rígido; el constituyente duro, blanco mostrado en la Figura 6 (página 25). Su presencia interfiere con el movimiento de las dislocaciones y por tanto va a promover una falla sin previa deformación plástica. Debido a que los ensayos de tensión se hacen a temperatura ambiente, no se puede ver en las gráficas dicho comportamiento. Estas presentan en cambio, el destino que tienen las redes poliméricas luego de ser tratadas térmicamente; al aumentar la temperatura hasta un valor  $\Delta T + 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en la primera disminución de peso Figura 7(a), las redes se forman con mayor eficiencia aumentando la dureza y como consecuencia, su fragilidad. Es decir, las probetas analizadas no evidencian comportamiento sobresaliente a alta temperatura,  $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en presencia simultánea con un esfuerzo mecánico. Al enfriarse las probetas acercándose a la temperatura ambiente, se ha obtenido un material endurecido que ha aliviado parte de los esfuerzos internos promotores de fragilidad, mediante la liberación de calor sensible, mostrando un incremento en su resistencia a la tensión.

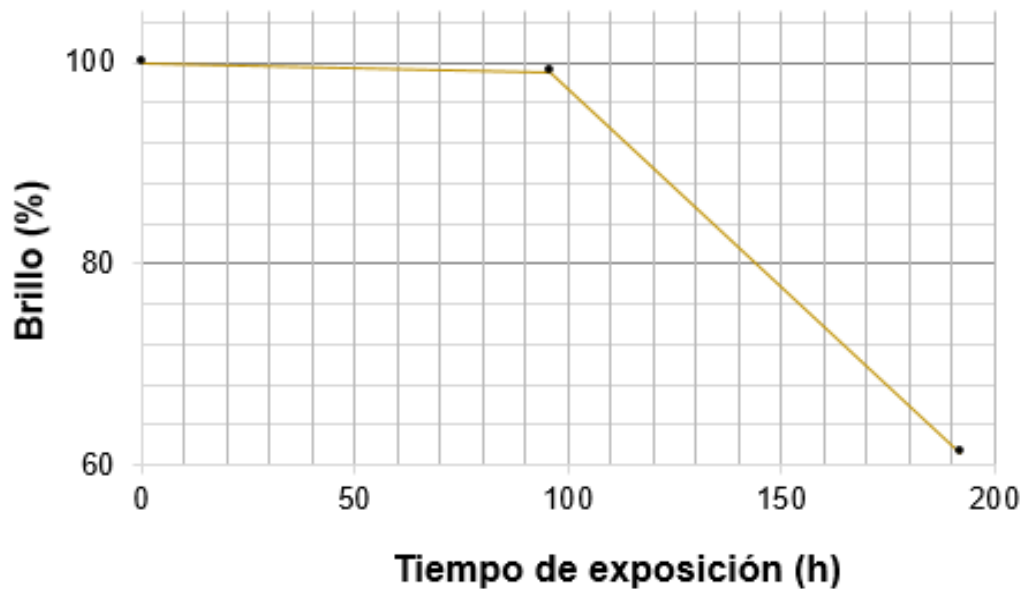
La curva amarilla, por otro lado, grafica el valor porcentual de la elongación longitudinal que se logra en la probeta en el instante de la rotura; luego del pico a  $94\text{ }^{\circ}\text{C}$  la deformación plástica que ocurre en el material antes de la falla, disminuye. Se define una competitividad térmica aceptable igual a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y el valor a la resistencia térmica dada a dicha temperatura.

#### **4.7. COMPORTAMIENTO EN AMBIENTES SIMULADOS**

**RESISTENCIA A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA:** de las evaluaciones en condiciones ambientales simuladas, es esta la de mayor importancia puesto que permite conocer la morfología de la degradación que se presenta en el Cast-Urethane luego de suponer una exposición al oxígeno y radiación UV. Los datos se obtuvieron de la investigación [4] en la cual el Cast-Urethane fue monitoreado

mediante la medición de brillo sobre tres cupones testigo. Además, aseguran los autores que la pérdida de masa ocasionada por la acción combinada de luz y agua fue del 1%. La figura 9 contiene los resultados obtenidos de la pérdida de brillo del material en función del tiempo de exposición; esta pérdida por no representar un cambio en las propiedades mecánicas se considera irrelevante.

Figura 9. Reducción del porcentaje de brillo del Cast-Urethane.



Fuente: Cifuentes, Soto, Fuentes y García [4]

AMBIENTE DE HUMEDAD RELATIVA AL 100%: en esta cámara se acelera la degradación del material al ser expuesto a condiciones de humedad relativa entre 95 y 100%, lo que corresponde a disponer de niveles superiores a la humedad relativa crítica para zonas tropicales (80%). Se valora su capacidad de aislamiento según la generación de caminos iónicamente conductores, cuando actúan como barrera de vapor de control de corrosión de materiales metálicos. Los resultados guían la clasificación de él o los tipos de ambientes [8] a los cuales la banda de Cast-Urethane es resistente a la corrosión. Según [4] el material no presenta

deterioro luego de 336h, valor que al ser comparado con la base SHIREC, permite establecer una alta competitividad del Cast-Urethane y de su eficacia en el control de la corrosión.

**EVALUACIÓN DE LA BANDA EN CÁMARA SALINA:** se especifica la realización de este ensayo puesto que se considera como clave para la evaluación del comportamiento de la Banda prototipo en un ambiente de vapor de solución acuosa y, su capacidad de aislar el medio interno de la hendidura de la unión bridada del medio atmosférico simulado. El ambiente simulado en cámara de niebla salina es un ensayo de laboratorio universalmente representativo que permite visualizar el nivel de desempeño asimilable a ambientes atmosféricos salinos y salino-industriales, donde normalmente se concentran los mayores sitios de concentración industriales, y un buen comportamiento bajo estas condiciones simuladas puede extrapolarse como de buen desempeño en ambientes menos contaminados como los rurales y urbanos con bajas concentraciones de agentes contaminantes. Se presenta a continuación el desarrollo del Diseño y construcción del banco de pruebas y de la Banda de Cast-Urethane:

➤ Diseño y construcción del banco de pruebas

La documentación de instalación y montaje se obtuvo de [6] y se definió un sistema que permitió obtener una buena cantidad de datos en una sola evaluación.

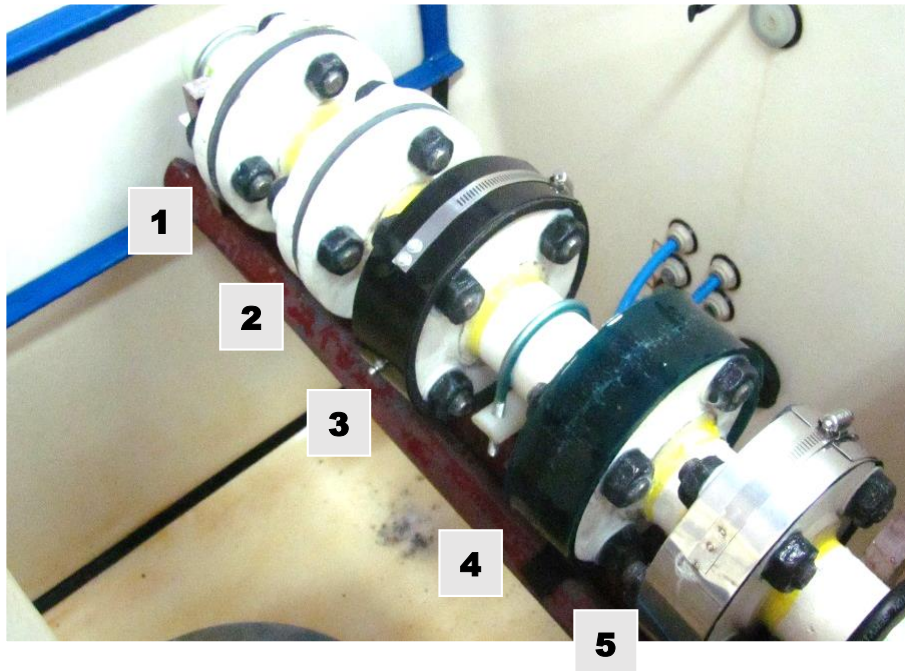
Figura 10. Vaciado de la mezcla polimérica en el molde de silicona.



Idealizando un sistema de fácil instalación, montaje y traslado, de bajo peso, económico y ocupando el menor espacio posible de la Cámara salina, se diseña el Loop mostrado en la figura 11, y esquematizado en el anexo B. Compuesto por cinco uniones bridadas con elementos estandarizados [6] que se diferencian entre sí así: 1. Unión sin banda de protección y con empaque de sello hidráulico de tipo espirotático, 2. Unión sin banda de protección y con empaque de sello hidráulico no metálico. Con estos dos montajes se pretende obtener el Control o monitoreo de la corrosividad del medio simulado. Durante el transcurso del ensayo en la Cámara no se realizan interrupciones. En las siguientes tres uniones bridadas se utiliza banda de protección de diferente tipo, con esto se quiere obtener un patrón de comparación de desempeño de la banda de Cast-Urethane en función de la oferta del mercado y, en función del Diseño Industrial aplicado. 3. Unión bridadada con banda de EEUU de tipo no metálica, 4. Hendija protegida con la banda de Cast-Urethane, 5. Banda metálica proveniente de EEUU; esta banda no permite el aislamiento

eléctrico entre las bridas. Los sistemas 3,4 y 5 tienen empaque de sello hidráulico no metálico.

Figura 11. Banco de pruebas o Loop



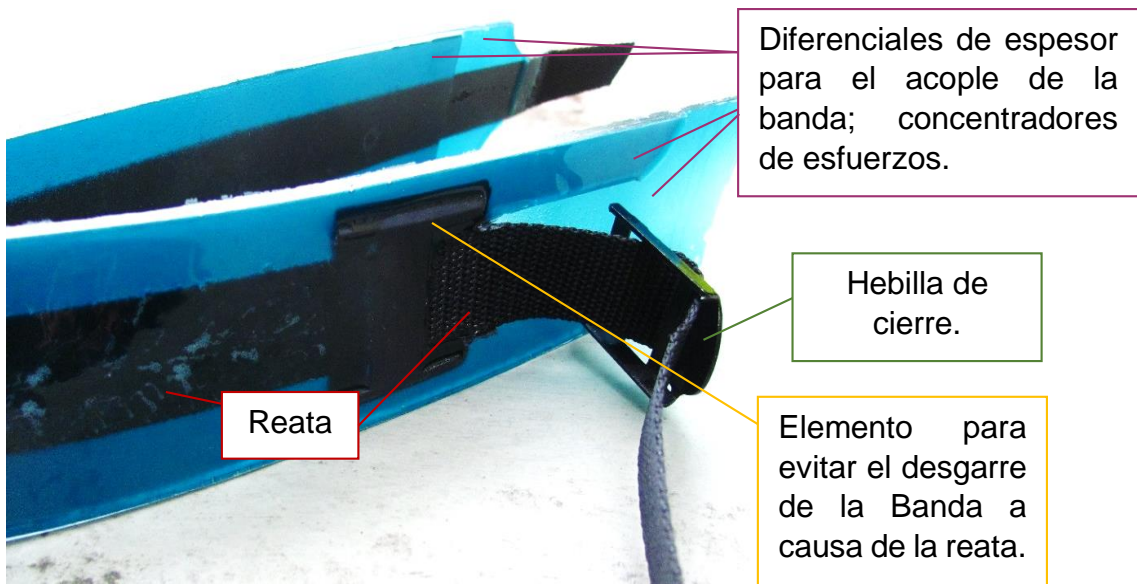
Montaje al interior de la Cámara salina previo al inicio del ensayo que duró 500 horas. Los diferentes elementos expuestos, tras ser sometidos a un ambiente de niebla salina, son la fuente para el control y monitoreo del comportamiento de la Banda de Cast-Urethane, y su grado de competitividad en comparación a las dos bandas de EEUU con que se cuentan para esta tesis. Cámara salina. Laboratorio de Recubrimientos, CIC.

El diseño y construcción del Loop o banco de pruebas, junto con el protocolo de montaje de la banda se realizan en conjunto con el equipo de trabajo de este proyecto, se realizan las respectivas preparaciones superficiales preliminares para la posterior inspección visual de las mismas.

➤ Diseño y construcción de la banda de Cast-Urethane

El diseño de la banda se llevó a cabo en función de las dimensiones de la brida y de las facilidades para su montaje. El vaciado de la síntesis y moldeo de la banda de Cast-Urethane se realizó en un molde de silicona por su facilidad para el desmoldeo y acople de diferentes geometrías, ver figura 10. Luego de varios planteamientos y fabricación de varios modelos, se definió un sistema que incluye una matriz de Reata en la banda y algunos elementos conexos para su acople. El detalle se muestra en la figura 12.

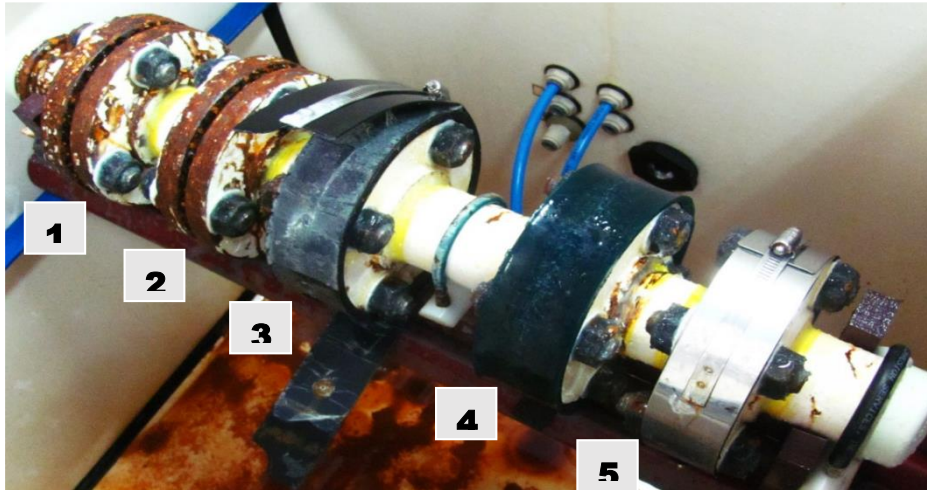
Figura 12. Detalle del sistema de instalación de la banda de Cast-Urethane



➤ Evaluación del desempeño de la banda como protectora de la corrosión atmosférica de uniones bridadas

La evaluación en la cámara de niebla salina es útil estimando el comportamiento relativo de materiales en atmósferas marinas, debido a que esta cámara simula las condiciones básicas con alguna aceleración en la humedad. La figura 13 es la imagen del Loop unos instantes después de que se abre la tapa de la cámara salina, luego de 21 días de ensayo.

Figura 13. Banco de pruebas al interior de la Cámara salina posterior al ensayo.



Los sistemas 1 y 2 permiten asegurar la influencia del medio atmosférico en la superficie de la hendidura que se forma de la unión bridada incluso en los lomos de ésta, tal como se evidencia en las figuras 13 y 14. Como la diferencia en la severidad de dicho impacto es imperceptible para la unión con empaque de sello hidráulico metálico y sello no metálico, y además el sistema 4 (con banda de Cast-Urethane) utiliza sello no metálico, se toma como unión Control al sistema 2, ver figura 14.

Figura 14. Superficie del lomo e interna de la unión bridada del sistema 2



Su condición final es igual a la del sistema 1.

Hay presencia de óxidos de baja y alta adherencia compuestos por los constituyentes atmosféricos (niebla salina) más el metal de la superficie de las bridas que se ha disuelto en este. Luego de la inspección visual preliminar se procede a realizar la limpieza manual en seco, como luego de esta con una lupa de 8 dioptrías, no se observa presencia de corrosión, no se continúa con la limpieza puesto que se requiere del uso de soluciones químicas preparadas para esto. La mezcla de óxidos y solución salina se acumula, como muestra la figura 15, en el resalte de la cara de las bridas.

La banda no metálica del sistema 3 se ha fracturado, se cree que dicha falla inició antes del montaje y fue fragilizada con la condición del ensayo. A pesar de esto, el componente de espuma de la banda permitió que la hendidura se mantuviera protegida. Los resultados del sistema 3 y 5, en relación a la protección de la corrosión atmosférica, son los mismos. Ver figura 22.

El sistema 4 de la banda de Cast-Urethane parece no haber sufrido cambio alguno. Más adelante se presentan los resultados de la inspección visual de esta, luego del ensayo en cámara salina. Debido a la pobre presencia de óxidos y demás contaminantes sobre la superficie de las caras de las bridas de la unión del sistema 4, se hace una comparación cualitativa de la competitividad del Cast-Urethane como protector de la corrosión atmosférica en función de los resultados de la inspección visual del sistema 5 y se determina que el Cast-Urethane es altamente competitivo para su uso como protector de la corrosión atmosférica. Ver figura 16.

Figura 15. Todas las bridas tienen un resalte de 1/16".



Fuente: ASME B16.5

Zona que facilita la acumulación de producto atmosférico y óxidos.

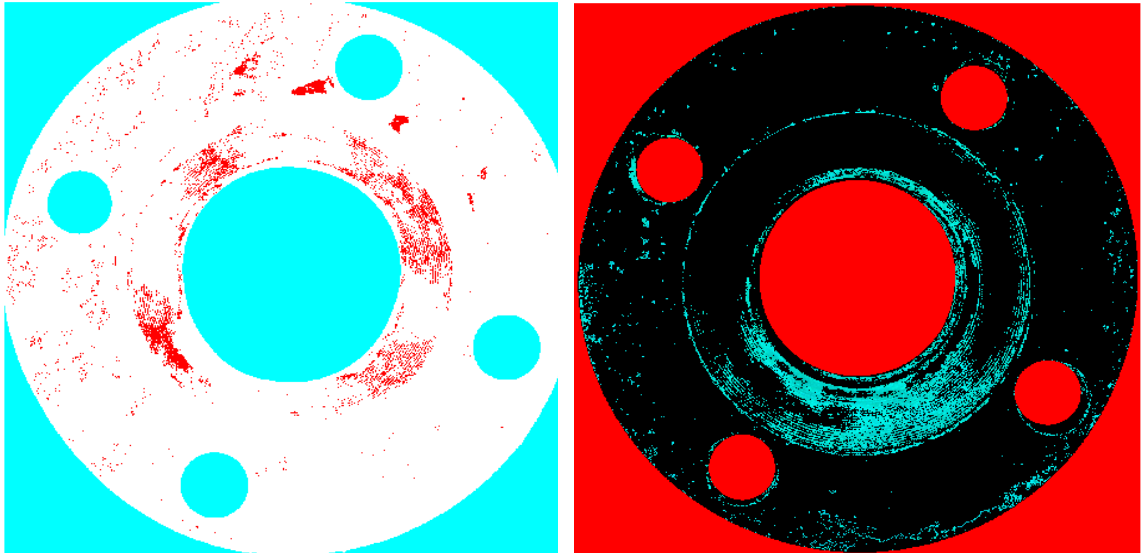
Posteriormente se hizo un tratamiento de imágenes en Matlab, determinando el porcentaje de producto contaminante presente en la superficie de las bridas, tomando como referencia los códigos de colores RGB de la imagen de una brida del sistema 4 y una del sistema 2 (Control). En la figura 17 se muestra el resultado de dicho análisis técnico, y se evidencia la alta competitividad del material Cast-Urethane como aislante del medio atmosférico.

Figura 16. Comparación cualitativa de los sistemas



En la figura 16 2. Sin banda de protección, 4. Con la banda de Cast-Urethane y, 5. Con la banda foránea de tipo metálica. Se puede determinar cualitativamente que la banda de Cast-Urethane aísla la hendidura de la unión bridada del medio atmosférico, tanto o mejor de lo que lo hace la banda comercial importada.

Figura 17. Resultado del tratamiento en Matlab



En la figura anterior a la izquierda, una brida del sistema 2; el color aciano representa el fondo que no hace parte del tratamiento, el color blanco es la superficie de la brida que se encuentra con óxidos y, el color rojo representa las zonas de la brida sin óxidos; en total, la matriz realizada en Matlab indica un 96% de la superficie tratada con presencia de óxidos. A la derecha, una brida del sistema 4; el color rojo representa el fondo que no hace parte del tratamiento, el color aciano es la superficie de la brida que se encuentra con óxidos y, el color negro representa las zonas de la brida sin óxidos; en total, la matriz realizada en Matlab indica un 9,4% de la superficie tratada con presencia de óxidos.

Como es el sistema 4 el de nuestro completo interés, se presenta a continuación el análisis y evaluación del desempeño de la banda de Cast-Urethane como aislante del medio atmosférico. La figura 18 es el resultado del microambiente generado en la hendidura de la unión bridada, la cual se protegió con la banda de material Cast-Urethane. La presencia de mezclas heterogéneas de óxidos y solución salina proveniente de la atmósfera del ensayo, evidencian el inicio de la ubicación de estas; desde el exterior acercándose concéntricamente hacia el interior, con

acumulación propensa a darse en la zona superior del resalte de la cara interna de la brida. No hay presencia de daños por corrosión.

Figura 18. Superficie interna de una brida protegida por el Cast-Urethane.



Figura 19. Zona inferior de la Banda y de la unión del sistema 4.

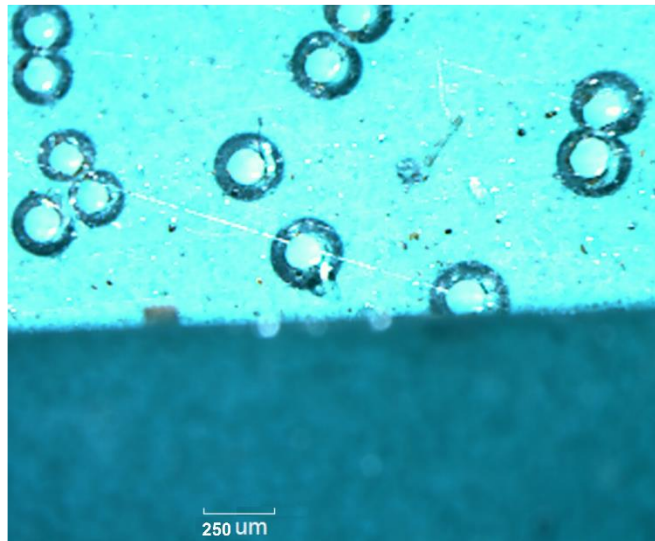


Mediante la inspección visual micro y macroscópica y, la simulación de una nueva instalación, se define que la banda es apta para ser reutilizada. La figura 19 muestra la zona inferior de la sección de la unión, en donde se ha acumulado mayor cantidad de partículas de óxidos y constituyentes del medio atmosférico, por escurrimiento de los mismos. Aun así la banda de Cast-Urethane ha conservado su integridad física como se muestra en la figura 20.

## 5. CONCLUSIONES

El poliuretano basado en polirol agroindustrial denominado Cast-Urethane es un material con el cual se puede desarrollar una banda competitiva de protección de uniones bridadas de la corrosión atmosférica; considerando por lo menos ambientes rural y marino [8]; y como función dual de protección-aislamiento eléctrico en uniones bridadas que se configuren como puntos de frontera de sistemas de protección catódica. Se logró determinar la aplicabilidad de este material gracias a la definición de las variables críticas de funcionalidad requeridas en él, la compilación de datos de investigaciones preliminares para su caracterización y, el trabajo que comprendió la evaluación de la Banda prototipo en la cámara de niebla salina.

Figura 20. Banda de Cast-Urethane.



10X. Laboratorio de metalografía UIS

## 6. RECOMENDACIONES

Debido al comportamiento de la banda foránea del sistema 3 (ver figura 13 página 37), se recomienda profundizar el estudio del proceso de conformado con el objeto de desarrollar un poliuretano tipo espuma de alta cohesión al Cast-Urethane para aumentar la eficacia de protección.

Figura 21. Adhesión de la Banda en el lomo de la brida.



## BIBLIOGRAFÍA

Agredo Acevedo. Hernán. Resistencia aplicada de los materiales - Mecánica de los sólidos deformables. Segunda edición. Publicaciones UIS. Colombia. 2012.

American Society of Testing and Materials. Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Surfaces. D610. New York: El Autor, 2012.

----- . Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. B117. New York: El Autor, 2011.

----- . Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies. D149. New York: El Autor, 2013.

----- . Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints. D714. New York: El Autor, 2009.

----- . Standard Test Method for Evaluating Degree of Checking of Exterior Paints. D660.

----- . Standard Test Method for Evaluating Degree of Cracking of Exterior Paints. D661. New York: El Autor, 2011.

----- . Standard Test Method for Evaluating Degree of Erosion of Exterior Paints. D662. New York: El Autor, 2011.

----- . Standard Test Method for Evaluating Degree of Flaking (Scaling) of Exterior Paints. D772. New York: El Autor, 2011.

----- Standard Test Methods for Mandrel Bend Test of Attached Organic Coatings. D522. New York: El Autor, 2013.

----- Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. D638. New York: El Autor, 2010. New York: El Autor, 2011.

----- Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. D570. New York: El Autor, 2010.

----- Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. E96. New York: El Autor, 2013.

----- Standard Practice for Operating Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials. G155. New York: El Autor, 2013.

CHATTOPADHYAY, Dipak Kumar y KOTHAPALLI, Raju. Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications: Progress in Polymer Science. India: [s.n.], 2007. p. 352-418.

KUMAR GUPTA, Chiranjib. Chemical metallurgy. India: Wiley-VCH Verlag , 2003. 581 p.

FUENTES, Luis Enrique, et al. Redes poliméricas interpenetradas de poliuretano a partir de aceite de ricino modificado y poliestireno: miscibilidad y propiedades mecánicas en función de la composición. En: Revista Ion. Julio, 2011. vol 24. p. 45-50.

HILL, Loren W. Dynamic Mechanical and Tensile Properties. New York: ASTM, 2012.

LANDRUM, R James. Fundamentals of designing for corrosion control: A corrosion aid for the engineer. Texas: NACE Publication, 2010.

LASHERAS, José. Tecnología del acero. 3 ed. Madrid: CEDEL, 1977. P.35-37.

ROBERGE, Pierre R. Corrosion Basics: An introduction. 2 ed. Texas: NACE, 2005.  
p. 3,21,86-90, p. 333-335, p. 355-356, p. 555.

## REFERENCIAS

- [1] E.F. Díaz, O.M. Muñoz, G.E. Ramírez, A.R. García. Estudio de las variables de síntesis de poliuretano a partir de aceite de ricino y glicerol. Trabajo de grado UIS, (2014).
- [2] Fichas técnicas. Materiales industriales no metálicos. Base de datos. Diacor S.A.S.
- [3] Sistema de gestión del conocimiento en recubrimientos. SHIREC. Corporación para la Investigación de la Corrosión.
- [4] P.K. Cifuentes, F.Soto S., L.E. Fuentes, A.R. García. Evaluación del desempeño de un poliuretano producido a partir de aceite de ricino modificado con glicerol como recubrimiento industrial. Trabajo de grado UIS, (2012).
- [5] Experimentación en Gimnasio.
- [6] STD. ASME/ANSI B16.5. Pipe flanges and flanged fittings. NPS ½ - 24. (1996).
- [7] J.P. Araque, L.D. Buitrago, L.E. Fuentes, A.R. García. Síntesis y caracterización básica de elastómeros de poliuretano obtenidos a partir de MDI polimérico y aceite de ricino modificado con glicerol para definir criterios de aplicabilidad como material industrial. Trabajo dae grado UIS, (2013).
- [8] International Organization for Standarization. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification. Designation ISO 9223. (1992).

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. ESPECIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO**

**CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL:** se llevó a cabo mediante la técnica de caracterización de microscopía electrónica de barrido (SEM); técnica que mediante la formación de imágenes por medio del barrido de electrones en la superficie, permite conocer el tamaño, forma y distribución de microconstituyentes presentes. Se utilizó el microscopio FEI QUANTA FEG 650 del Laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico de la UIS. Fuente [1].

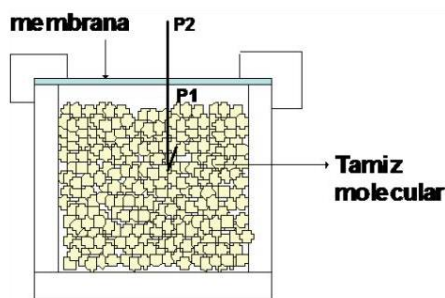
**ABSORCIÓN DE AGUA:** ajustado a la norma ASTM D570, el ensayo consistió en establecer la cantidad de agua que el material logra contener en su interior hasta saturarse. Los materiales y equipos utilizados fueron recipientes con cierre hermético para el almacenamiento de agua, pinzas y balanza analítica, en el Laboratorio del GIP en el Parque Tecnológico de la UIS. Fuente [7].

**RESISTENCIA DIELECTRICA:** ajustado a la norma ASTM D149 para la determinación del voltaje de ruptura dieléctrica del material; con lo cual se determina el valor al cual el material deja de ser aislante eléctrico para volverse conductor. La rampa usada en el ensayo fue de 500 V/s. El equipo utilizado constó de un dispositivo especial desarrollado por la Corporación para la Investigación de la Corrosión. Fuente [7].

**RESISTENCIA A LA ABRASIÓN:** ajustado a la norma D4060. Este ensayo permitió simular el proceso de desgaste del material al ser sometido al contacto de ruedas abrasivas. La tabla 2 especifica las condiciones del ensayo. Fuente [4].

Condiciones del ensayo de abrasión. [4],	
Medio abrasivo	Ruedas
Carga	1000g
Periodo de registro	200 ciclos
Número de ciclos	1000

PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA: ensayo basado en la norma ASTM D1653 para determinar la habilidad del material al actuar como barrera de aislamiento de una superficie a proteger contra la corrosión. En la figura 22 se esquematiza la copa compuesta por un tamiz molecular de material higroscópico y una membrana de Cast-Urethane. Las copas son expuestas a ambiente simulado en Cámara de humedad relativa al 100%. Fuente [4].



RESISTENCIA A LA TENSION: de acuerdo a la norma ASTM D638, en la Máquina Universal de Ensayos WEW20E de las Unidades Tecnológicas de Santander. Utilizando velocidad de deformación de 25mm/min y, carga aplicada de 400N. Fuente [7].

CAPACIDAD DE ELONGACIÓN: basado en la norma ASTM D522. Por el método de mandriles cilíndricos se determinó el valor, evaluando con el Holiday detector las porosidades presentes luego de la elongación. Fuente [4].

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO: se utilizó una termo balanza TA Instruments Universal Analysis 2000 en las siguientes condiciones: velocidad de calentamiento

10°C/min, rango de temperatura entre 25°C y 800°C, flujo de nitrógeno de 50ml/min y, muestras con peso entre 10 y 15mg. Fuente [7].

RESISTENCIA A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA: se evaluaron diez cupones en la cámara de envejecimiento de la CIC. Ver tabla 3. Los cupones estuvieron expuestos a ciclos de día-lluvia y día-noche durante 192h, y fueron monitoreados mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica y, la medición de brillo y de espesor de película seca. El ensayo se basó en la norma ASTM G155. Fuente [4].

Condiciones de la cámara de envejecimiento. Equipo Atlas Ci 4000. [4]	
Fuente de luz	Lámpara de arco Xenón de irradiancia controlada
Nivel de irradiancia	40 minutos luz
	20 minutos luz y rociado frontal
	40 minutos luz
	5 minutos oscuridad
Temperatura del panel Negro	87 ±2°C luz   30 ±2°C oscuridad
Humedad relativa	50% luz   95% oscuridad

AMBIENTE DE HUMEDAD RELATIVA AL 100%: basado en la norma ASTM D2247, la tabla 4 especifica las condiciones del ensayo. Fuente [4].

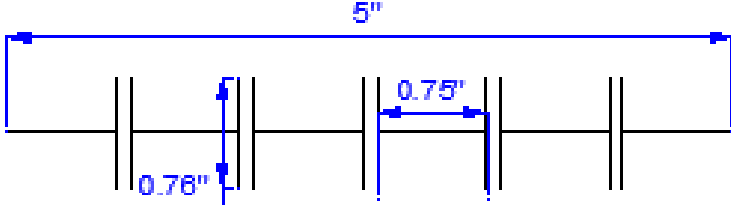
Condiciones de la cámara de humedad relativa al 100%. Equipo Atlas CSF 850. [4].	
Tiempo de exposición	336h
Temperatura de la cámara	30°C
Sustancia de trabajo	Agua desionizada

EVALUACIÓN EN CÁMARA SALINA: basado en la norma ASTM B117, la tabla 5 especifica las condiciones del ensayo.

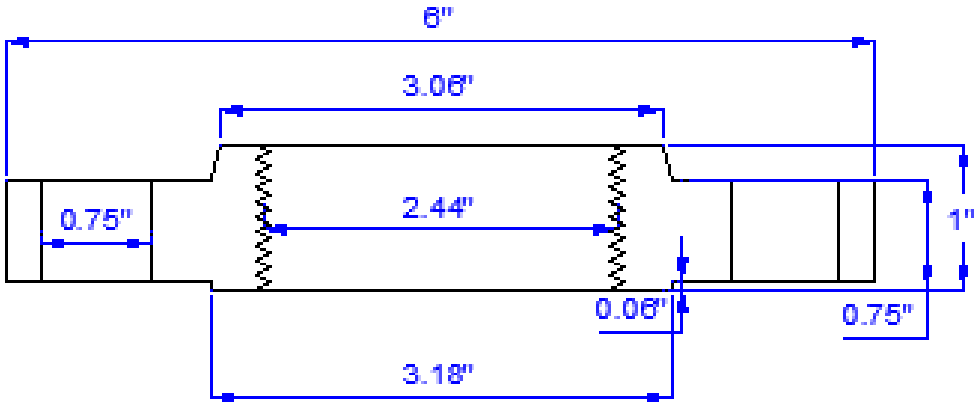
Condiciones de la evaluación en cámara salina. Equipo Atlas CSF 850.	
Tiempo de exposición	500h
Temperatura de la cámara	35 ±2°C
Sustancia de trabajo	Salmuera al 5%
pH de la sustancia	6,5-7,5

**ANEXO B. PLANO DEL MONTAJE DEL LOOP**

**VISTA EN PLANTA**



**DIMENSIONES DE LAS BRIDAS 2" CLASE 150**



**PLANO DEL MONTAJE DEL LOOP EN LA CÁMARA SALINA**