

**DISEÑO, SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE UN KIT DE POLIURETANO A PARTIR  
DE ACEITE DE RICINO Y GLICEROL PARA LA REPARACIÓN DE FALLAS EN  
TUBERÍAS METÁLICAS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS INCOMPRESIBLES**

**SILVIA JULIANA GUTIERREZ RUEDA**

**KAREN YANITH PATIÑO JAIMES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DISEÑO, SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE UN KIT DE POLIURETANO A PARTIR DE ACEITE DE RICINO Y GLICEROL PARA LA REPARACIÓN DE FALLAS EN TUBERÍAS METÁLICAS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS INCOMPRESIBLES**

**SILVIA JULIANA GUTIERREZ RUEDA**

**KAREN YANITH PATIÑO JAIMES**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniera Química**

**Director**

**Gustavo Emilio Ramírez Caballero**

**PhD. Materials Science and Engineering**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

Dios, porque es el principal autor de este triunfo, su gracia y misericordia me llenaron de esperanza a lo largo del camino, pues a pesar de mis errores Él siempre me mostró su gran amor. A Él sea la gloria.

A mi madre Liliana Rueda, pues gracias a su apoyo incondicional y sus grandes esfuerzos hoy puedo alcanzar esta meta, porque aunque enfrentamos situaciones complicadas logramos salir adelante y ahora este logro es de las dos.

A Leo, porque me ayudó a convertir los problemas en un reto, animándome a través de sus consejos y siempre creyendo en mis capacidades, realmente su compañía fue un regalo de Dios para vencer los obstáculos de forma más sencilla.

A mis tíos que de una u otra manera me han apoyado en lo que ha estado a su alcance, compartiendo conmigo consejos y experiencias.

A mis compañeros de clases con los cuales compartí grandes momentos y experiencias que llevaré en mi corazón.

Silvia Juliana Gutiérrez Rueda

*A Dios por su infinito amor, sus bendiciones y sus lecciones de vida. Por darme la fortaleza y la inteligencia necesaria durante toda mi carrera*

*A mi madre por ser mi mejor amiga, por apoyarme y corregirme siempre que lo he necesitado, por brindarme su amor incondicional, por sus sabios consejos, por todo su esfuerzo y dedicación.*

*A mi padre por su apoyo incondicional durante toda mi formación académica, por su amor y por ser mi modelo a seguir.*

*A mi hermano por ser un amigo y confidente para mí, por ser el mejor hermano que Dios me pudo regalar.*

*Y a todas las personas que han contribuido en mi formación personal y profesional.*

*Karen Yanith Patiño Jaimes*

## **AGRADECIMIENTOS**

A los profesores de la escuela de ingeniería química, por transmitirnos sus conocimientos y contribuir a nuestra formación profesional.

Al Ph.D Gustavo Emilio Ramírez Caballero, por la confianza puesta en nosotras y su constante motivación a lo largo del proyecto.

A Jorge Ramírez por su colaboración, paciencia y su buen sentido del humor.

A Carolina Ardila y a Katherine López por su generosidad y amabilidad.

A Ronald Rueda, Pilar Pinto y Robinson Salamanca de la Corporación para la Investigación de la corrosión (CIC), porque siempre nos colaboraron en lo que estuvo a su alcance con amabilidad.

A Joan del taller de mecánica fina de CIC, porque gracias a su experiencia, consejos y constante apoyo logramos superar varios obstáculos presentes durante el desarrollo del proyecto.

A Paolita del edificio de investigaciones por su amabilidad y disposición para colaborarnos.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. METODOLOGÍA	21
1.1. SELECCIÓN DEL TAPÓN (TP) Y DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE EXPULSIÓN ( $P_{exp}$ )	22
1.2. SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA CURA Y DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE FUGA ( $P_{fuga}$ ) DEL SISTEMA TAPÓN (TP)+ CURA (C)	23
1.3. SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA BANDA Y DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE FUGA ( $P_{fuga}$ ) DEL SISTEMA TAPÓN (TP) + BANDA (B) y TAPÓN (TP)+ CURA (C) + BANDA (B)	24
1.4. CONDICIONES DE TRABAJO DEL KIT	24
1.5. MATERIALES Y MÉTODOS	25
1.5.1. Materiales, insumos y equipos	25
1.5.2. Métodos:	26
2. RESULTADOS	28
2.1. DISEÑO DEL MODELO DE TAPÓN	28
2.2. SELECCIÓN DE LA RELACIÓN MOLAR DE POLIOLES	29
2.3. PRESIÓN DE EXPULSIÓN DEL MODELO BASE Y PROPUESTO DE TAPÓN	30
2.4. DISEÑO DE LA CURA	31
2.5. GRADO Y CONDICIONES DE ADHERENCIA ENTRE LA TUBERÍA DE GRADO API 5L Y EL POLIURETANO	32
2.6. PRESIÓN DE FUGA DEL SISTEMA TP + C	33
2.7. DISEÑO DE LA BANDA (B)	34
2.8. PRESIÓN DE FUGA	34
2.8.1. Sistema TP + B	34
2.8.2. Sistema tapón TP + C + B	35
2.9. PRESIÓN DE TRABAJO DEL KIT A UNA TEMPERATURA DE 22 °C	36
2.10. PRESIÓN DE FUGA DEL KIT A UNA TEMPERATURA DE 90 °C	37
2.11. PRESIÓN DE TRABAJO DEL KIT A UNA TEMPERATURA DE 90 °C	39

2.12. REPARACIÓN DE TUBERÍAS DE GRADO API 5L CON FALLAS DE DIAMETRO DE 0,59 IN UTILIZANDO EL KIT DISEÑADO	40
2.12.1 Preparación de los substratos	41
2.12.2 Reparación	42
3. CONCLUSIONES	43
4. RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXOS	54

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Comparación entre el modelo de tapón base y el propuesto	28
Tabla 2. Grado de adherencia entre los substratos	32

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Tipos de reparaciones: (a) Soldada. (b) Metálica. (c) No metálicas	18
Figura 2. Diagrama metodológico	21
Figura 3. Porcentaje de daños en la integridad del tapón.	29
Figura 4. Cambio de coloración en la base del tapón	29
Figura 5. Módulo de almacenamiento y de pérdida para la relación molar de polioles 60:40	30
Figura 6. Presión de expulsión del tapón base y propuesto de relación molar de polioles 60:40	31
Figura 7. Diseño de la cura	32
Figura 8. Presión de fuga del sistema TP + C	33
Figura 9. Abultamiento de la cura (a) y desajuste del tapón (b)	34
Figura 10. Presión de fuga del sistema TP + B	34
Figura 11. Rotura de la banda	35
Figura 12. Diagrama de fuerzas que actúan sobre la banda	35
Figura 13. Presión de fuga del sistema TP + C + B	36
Figura 14. Partes del kit: cura, tapón, banda	36
Figura 15. Evaluación de la presión de trabajo en el tiempo	37
Figura 16. Presión de fuga del kit de reparación a una temperatura de 90 °C	38
Figura 17. Daños en el material a una presión de 450 psi y una temperatura de 90 °C	38
Figura 18. Módulo de almacenamiento de la relación molar de polioles 70:30, con y sin refuerzo de fibra de vidrio	39
Figura 19. Evaluación de la presión de trabajo en el tiempo a una T= 90 °C	40
Figura 20. Metal Blanco	41

Figura 21. Tubería limpia - Grado metal blanco	41
Figura 22. (a) Preparación y (b) Aplicación del puente adherente (c) tubería reparada	42

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. PLANO TUBERÍA ACERO API 5L	54
Anexo B PROTOCOLO DE SÍNTESIS DEL POLIURETANO	55
Anexo C. DIAGRAMA DE FUERZAS EJERCIDAS POR EL FLUIDO DE TRABAJO SOBRE EL TAPÓN EN EL INTERIOR DE LA TUBERÍA	57
Anexo D. PRUEBA DE INSERCIÓN DE LOS TAPONES	58
Anexo E. CLASIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CORTE ENREJADO SEGÚN LA NORMA ASTM D3359-09	59

## LISTA DE ABREVIATURAS

**ABS:** Acrilonitrilo Butadieno Estireno

**B:** Banda

**C:** Cura

**CIC:** Corporación para la investigación de la corrosión

**D:** Diámetro externo de la tubería

**GIP:** Grupo de Investigación en Polímeros

**L:** Longitud axial de la cura

**L<sub>Defect</sub>:** Longitud axial del defecto en la tubería

**L<sub>Over</sub>:** Longitud extendida más allá de la región dañada en la tubería

**L<sub>Taper</sub>:** Longitud biselada en el extremo de la reparación

**MDI:** Diisocianato de difenilmetano

**NCO:** Grupo funcional isocianato

**OH:** Grupo funcional hidroxilo

**P<sub>Exp</sub>:** Presión de expulsión

**P<sub>Fuga</sub>:** Presión de fuga

**PU:** Poliuretanos

**t:** Espesor de la tubería

**TP:** Tapón

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO, SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE UN KIT DE POLIURETANO A PARTIR DE ACEITE DE RICINO Y GLICEROL PARA LA REPARACIÓN DE FALLAS EN TUBERÍAS METÁLICAS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS INCOMPRESIBLES \*

**AUTORES:** Silvia Juliana Gutiérrez Rueda, Karen Yanith Patiño Jaimes \*\*

**PALARAS CLAVES:** reparaciones no metálicas, poliuretano, polioles, prueba hidrostática, presión de fuga, Sigmashield 880.

### DESCRIPCIÓN:

Se desarrolló un kit de poliuretano para realizar reparaciones no metálicas a tuberías de grado API 5L, que presentan una falla de 0,59 in de diámetro. El diseño de cada una de las partes del kit se realizó teniendo en cuenta investigaciones previas realizadas por CIC- GIP UIS y normas internacionales (ASME y ASTM). El material se sintetizó utilizando una relación molar OH: NCO de 1:1 y se reforzó con fibra de vidrio de calibre 230 g/cm<sup>2</sup>. Las relaciones molares de polioles de las partes del kit se seleccionaron teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del material a 90°C, temperatura que se encuentra dentro del rango de operación de las líneas que transportan hidrocarburos. Se realizaron pruebas hidrostáticas a 22 °C con el propósito de determinar la combinación de sistemas que presentara la mayor presión de fuga. Se encontró que el sistema tapón, cura y banda, adheridos con Sigmashield 880, presentó una presión de fuga de 750 psi. Se evaluó el kit mediante pruebas hidrostáticas a 90 °C y se encontró una presión de fuga de 450 psi. Las presiones de trabajo del kit con un factor de seguridad de 25% son 560 y 330 psi a 22 y 90 °C, respectivamente. Finalmente, se verificaron las presiones de trabajo mediante pruebas hidrostáticas con una duración mínima de 4 horas.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero, Ingeniero Químico

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN, SYNTHESIS AND EVALUATION OF A POLYURETHANE KIT FROM CASTOR OIL AND GLYCEROL TO REPAIR FAILURE IN METAL TUBES THAT TRANSPORT INCOMPRESSIBLE FLUIDS.\*

**AUTHORS:** Silvia Juliana Gutiérrez Rueda, Karen Yanith Patiño Jaimes\*\*

**KEY WORDS:** Non-metallic repairs, polyurethane, polyols, hydrostatic test, leak pressure, Sigmashield 880.

### DESCRIPTION:

A polyurethane kit was developed to make non-metallic repairs to API grade 5L pipes, which have a 0.59 in diameter failure. The design of each part of the kit was made taking into account previous research carried out by CIC-GIP UIS and international standards (ASME and ASTM). The material was synthesized using an OH: NCO molar ratio of 1: 1 and reinforced with 230 g / cm<sup>2</sup> glass fiber. The molar ratios of polyols of the kit parts were selected taking into account the mechanical properties of the material at 90 ° C, which temperature is within the operating range of the hydrocarbon transport lines. Hydrostatic tests were performed at 22 ° C to determine the combination of systems that would exhibit the highest leakage pressure. It was found that the plug, cure and band system adhered to Sigmashield 880 had a leakage pressure of 750 psi. The kit was evaluated by hydrostatic testing at 90 ° C and a leakage pressure of 450 psi was found. The working pressures of the kit, with a safety factor of 25%, are 560 and 330 psi at 22 and 90 ° C, respectively. Finally, the work pressures were verified by hydrostatic tests with a minimum duration of 4 hours.

---

\*Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero, Ingeniero Químico.

## INTRODUCCIÓN

La industria petroquímica se ha caracterizado por utilizar tuberías de acero para el transporte de hidrocarburos y sus derivados, las cuales son susceptibles a sufrir una gran variedad de daños tales como deterioro del recubrimiento, erosión, corrosión y daño mecánico, debido a que operan bajo condiciones ambientales agresivas, en un amplio rango de presión (60 a 1200 psi) [1,2] y de temperatura (50 a 250 °C) [3,4]. Dependiendo de la complejidad del daño, se generan pérdidas de dinero por tiempos muertos en las operaciones y pérdidas significativas de presión en la tubería de hasta 800 psi [5,2], reduciendo la vida útil de la tubería o en el peor de los casos ocasionando una falla estructural en el material [6]. Estos daños se solucionan cambiando el tramo de tubería o reparándolo, teniendo en cuenta criterios establecidos en la norma ASME B31.4 2002 [7].

Existen tres tipos de reparaciones: soldada, metálica y no metálica (Figura 1). Las reparaciones no metálicas consisten en un sustrato, un composite que son materiales formados por un refuerzo (fibra de vidrio, aramida o fibra de carbono) en una matriz polimérica termoestable (poliéster, poliuretano, fenólica, éster de vinilo y epoxi), un material de relleno, generalmente se utiliza un masilla epóxica, un puente adherente (adhesivo epóxico), una preparación de superficie, un método de aplicación y un protocolo de curado de la reparación. Los daños que pueden ser reparados con este método, teniendo en cuenta el tipo de fluido que transporta la tubería y las condiciones ambientales a las cuales es sometida, son: corrosión externa, abolladuras, ranuras, ampollas, picaduras, fugas y defectos de manufactura o fabricación [8].

Una de las matrices poliméricas utilizadas para este tipo de reparaciones son los poliuretanos, ya que pertenecen a una de las clases de polímeros más versátiles con propiedades deseables tales como: alta resistencia a la abrasión y al desgarre, flexibilidad, excelente absorción de impactos y elasticidad. Entre las ventajas de

este material, se encuentran su baja viscosidad, su facilidad de formar composites, un coste relativamente bajo y un corto tiempo de reacción [9].

**Figura 1. Tipos de reparaciones: (a) Soldada. (b) Metálica. (c) No metálicas**



**Fuente:** MORALES VELASCO, Mauricio. Propuesta para la reparación del oleoducto primario existente en el campo Marginal Tiguino a cargo de la empresa Petrobell Inc. Grantmining S.A basado en la norma ANSI/ASME B31G. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2011, p.105-106. Disponible en: <<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4961/1/T-ESPE-032998.pdf>>

Los poliuretanos termoestables son polímeros que se obtienen por medio de una reacción de adición de compuestos con grupos hidroxilos (-OH) e isocianatos (NCO), los cuales forman un grupo uretano (-NH-CO-O-). En la producción de poliuretanos existe un creciente interés de buscar una química sostenible, promoviendo el reemplazo de materias primas derivadas del petróleo por materias primas renovables [10]. Se ha encontrado que los aceites naturales tales como los de linaza, ricino, soya y palma, son una opción viable para la producción de biopolímeros con características competitivas con los materiales producidos a partir del petróleo [11,12]. Otra alternativa es la implementación de glicerol, subproducto del biodiesel que tendría como beneficio el aprovechamiento de su sobreproducción y por tanto proporcionarle un valor agregado [13]. Por lo tanto, GIP-UIS, ha desarrollado estudios en la obtención de poliuretanos a partir de aceite de ricino, glicerol y diisocianato de difenilmetano comercial (MDI) utilizando una relación molar OH: NCO de 1:1 [14,15].

El ácido ricinoléico presente en un 90% en el aceite de ricino es una molécula poli funcional, que contiene grupos hidroxilo secundarios localizados en cadenas largas, que resultan en baja densidad de grupos OH, los cuales al reaccionar con el

diisocianato, forman retículos grandes que le proporcionan flexibilidad a la malla polimérica [16].

Por otra parte, el glicerol es un alcohol altamente reactivo, debido a la presencia de tres carbonos y tres grupos funcionales OH, de los cuales dos son primarios y uno secundario, que le confieren propiedades higroscópicas y solubilidad en agua. La relación molar entre los grupos funcionales que aportan el aceite de ricino y el glicerol influyen en ciertas propiedades mecánicas, tales como el módulo de almacenamiento, el cual indica la capacidad del material para restablecer la energía suministrada mecánicamente al sistema [16,17].

Las propiedades del poliuretano pueden modificarse mediante la adición de aditivos durante su fase de procesado, entre estos se encuentran los aditivos reforzantes tales como la fibra de vidrio, los cuales permiten mejorar el comportamiento mecánico y aumentar el rango de temperaturas de servicio del polímero [18].

Los composites de poliuretano con fibra de vidrio (PRFV) se caracterizan por su bajo peso, alta resistencia y tolerancia al daño, por lo tanto se utilizan cada vez más como soporte de carga primaria de estructuras y también en una alta gama de aplicaciones de ingeniería, tales como el refuerzo de tuberías [9].

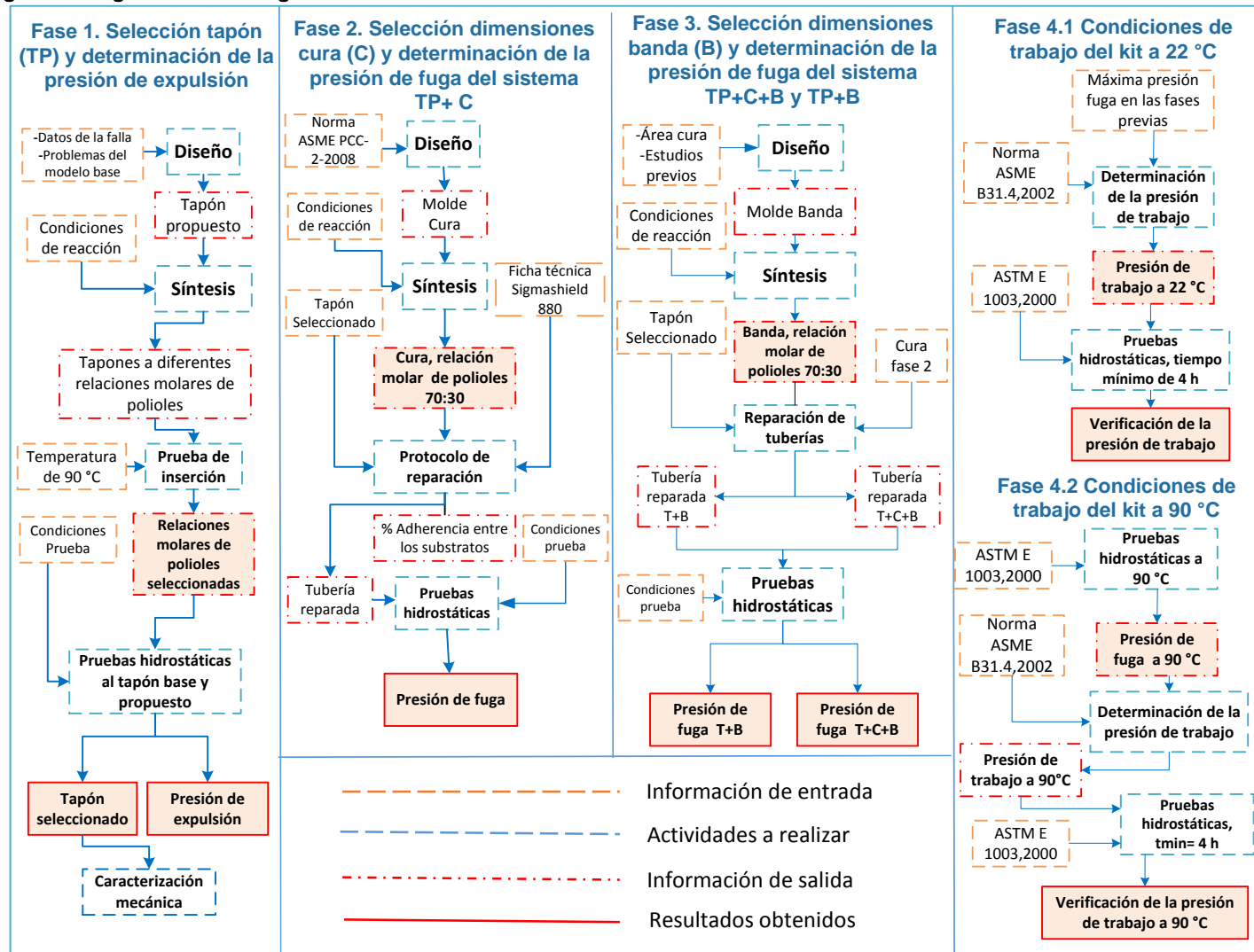
De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este trabajo es diseñar, sintetizar y evaluar un kit de poliuretano a partir de aceite de ricino y glicerol para la reparación de fallas en tuberías metálicas de transporte de fluidos incompresibles. Para esto se realizarán los diseños de cada una de sus partes teniendo en cuenta problemas presentados en investigaciones previas y normas internacionales. Se establecerá un protocolo de reparación, con el fin de garantizar la adherencia entre los substratos. Se determinará cuales componentes debe incluir el kit mediante pruebas hidrostáticas a 22 °C y finalmente se encontrará su presión de trabajo, realizando pruebas hidrostáticas a 90 °C, temperatura de operación de las líneas que

transportan hidrocarburos. Este trabajo hace parte del proyecto Colciencias-Grupo de investigación en polímeros (GIP)-Corporación para la investigación de la corrosión (CIC), titulado “Desarrollo y evaluación de un kit de reparación (Hot-repair) para el control de fugas en tuberías de transporte de hidrocarburos” código 9450.

# 1. METODOLOGÍA

En la figura 2 se muestra el cuadro metodológico utilizado en este trabajo, donde se presentan las fases desarrolladas durante la investigación.

Figura 2. Diagrama metodológico



Las tuberías que se utilizaron para el desarrollo del proyecto son de grado API 5L [19] (Anexo A) y se utilizó como fluido de trabajo aceite ISO 68. Las pruebas se realizaron con duplicado. Las condiciones de síntesis de poliuretano a partir de aceite de ricino, glicerol y MDI de las tres primeras fueron las enunciadas en el Anexo B.

### **1.1. SELECCIÓN DEL TAPÓN (TP) Y DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE EXPULSIÓN ( $P_{exp}$ ).**

Para el diseño del tapón se tuvieron en cuenta los problemas presentados en el modelo base probada en estudios preliminares realizados por GIP y CIC [20,21], el cual tiene forma de cono truncado y presenta problemas como: espacios muertos en el interior de la tubería y un límite de inserción no definido, es decir, depende de la fuerza que se le aplique. Por otra parte, se analizaron las fuerzas ejercidas por el fluido de trabajo dentro de la tubería en las pruebas hidrostáticas (Anexo C), las dimensiones y geometría de la falla. El diseño propuesto se realizó en el software Solidworks 2015, se imprimió en 3D con Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) con una resolución de 60 micras, posteriormente se realizó un molde utilizando caucho de silicona para molde RTV y se dejó curando por un tiempo de 24 horas.

Las condiciones de reacción para la síntesis del poliuretano a diferentes relaciones molares de polioles aceite de ricino: glicerol (100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35 y 60:40), se establecieron a partir de trabajos desarrollados por el grupo GIP-UIS (Anexo B) [22,23].

Para seleccionar la relación molar de polioles se realizó una prueba de inserción de los tapones en la falla, la cual se explica detalladamente en la sección 1.5.2, calentando la tubería hasta 90 °C, temperatura que se encuentra dentro del rango de operación de las tuberías que transportan hidrocarburos [9]; con el objetivo de cuantificar los daños en la integridad del material cuando se le aplica un esfuerzo puntual.

Finalmente, se realizaron pruebas hidrostáticas al modelo base y propuesto de tapón con las relaciones molares de polioles seleccionadas, manteniendo la temperatura del fluido de trabajo a 22 °C (temperatura laboratorio GIP), con el fin de encontrar la presión a la cual los tapones son expulsados de la falla ( $P_{exp}$ ). La prueba hidrostática inició con una presión de 50 psi, esta se incrementó cada 30 minutos en 50 psi, hasta que se evidenció un cambio abrupto en el sistema [24].

## **1.2. SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA CURA Y DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE FUGA ( $P_{fuga}$ ) DEL SISTEMA TAPÓN (TP)+ CURA (C)**

El diseño de la cura cuadrada se realizó teniendo en cuenta la norma ASME PCC-2-2008, en la cual se establece que para determinar la longitud de la reparación se deben tener en cuenta parámetros como el diámetro de la falla (0,59 in), el diámetro externo (4,44 in) y el espesor de la tubería (0,23 in) [8]. Luego se sintetizaron curas de poliuretano reforzado con un calibre de fibra de vidrio 230 g/cm<sup>2</sup>, una relación molar de polioles 70:30, a las condiciones de reacción previamente establecidas en la fase 1 (Anexo. La relación molar, el espesor de la cura (1/16 in) y el calibre del refuerzo se estableció con base a investigaciones realizadas por GIP- UIS [25,26].

Para realizar las reparaciones de las tuberías se utilizó el puente adherente Sigmashield 880, el cual es un revestimiento epoxi de dos componentes curados con aducto de polimanina [27], seleccionado teniendo en cuenta los resultados de investigaciones previas realizadas por CIC [28]. Inicialmente se estableció un protocolo de reparación, considerando la ficha técnica del puente adherente [27] y se utilizó la norma ASTM D3359-09 para determinar el grado de adherencia entre los substratos [29], realizando una prueba de corte enrejado a dos tuberías, variando las condiciones de curado del puente adherente.

Finalmente, se estableció la presión de fuga para el sistema TP+ C a partir de los resultados obtenidos en pruebas hidrostáticas, las cuales se realizaron teniendo en cuenta las condiciones establecidas en la fase 1.

### **1.3. SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA BANDA Y DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE FUGA ( $P_{fuga}$ ) DEL SISTEMA TAPÓN (TP) + BANDA (B) y TAPÓN (TP)+ CURA (C) + BANDA (B)**

Para definir las dimensiones de la banda se tomó como referencia el área de la cura seleccionada en la fase 2 y la longitud se estableció a partir de estudios realizados por GIP-UIS y CIC, donde se encontró que para evitar dificultades en el pegado del composite a la superficie metálica, su longitud debía ser menor al diámetro de la tubería [20,22]. Luego se sintetizaron bandas de poliuretano con el mismo espesor, relación molar y fibra de vidrio que se utilizó para la cura, a las condiciones de reacción previamente establecidas en la fase 1, con el objetivo de realizar dos tipos de reparaciones: TP+B y TP+C+B.

Por último, se realizaron pruebas hidrostáticas a los sistemas reparados, teniendo en cuenta las condiciones establecidas en la fase 1, con el objetivo de encontrar las presiones de fuga de cada uno.

### **1.4. CONDICIONES DE TRABAJO DEL KIT**

La presión de trabajo se estableció teniendo en cuenta un factor de seguridad del 25% [7] y el valor máximo de presión de fuga encontrado en las fases previas. Posteriormente, se realizaron pruebas hidrostáticas para verificar la presión de trabajo, a una temperatura 22°C, manteniéndola por un tiempo mínimo de 4 horas [7].

Finalmente, se repararon tuberías con el kit, con el fin de evaluarlo a una temperatura de 90 °C, para esto se determinó la presión de fuga del sistema, se estableció y se verificó la presión de trabajo encontrada, teniendo en cuenta los criterios descritos en el párrafo anterior. El procedimiento que se siguió en estas pruebas hidrostáticas fue estabilizar la temperatura del sistema y luego presurizarlo utilizando la norma ASTM E 1003 [30]. Para estabilizar la temperatura del fluido de

trabajo se utilizó una cinta de calentamiento, un controlador de temperatura y una termocupla. La manta de calentamiento se enrolló alrededor de la tubería y se aislaron utilizando lana de vidrio. Además, se precalentó el aceite hidráulico ISO 68 en un horno a 100 °C, para disminuir el tiempo de estabilización de la temperatura del sistema.

Para evaluar la presión de trabajo del kit a 90°C, la presurización del sistema se realizó de la siguiente manera: se aumentó la presión hasta 100 psi, manteniéndola durante un lapso de tiempo de una hora con el propósito de probar que no existían fugas mayores. Se continuó comprimiendo hasta alcanzar el 70 % de la presión de trabajo y se mantuvo por un tiempo de una 1 hora. Finalmente, se alcanzó la presión de trabajo, manteniéndola por un tiempo mínimo de 4 horas.

## **1.5. MATERIALES Y MÉTODOS**

**1.5.1. Materiales, insumos y equipos:** tubería de acero grado API 5L, reactores de 250 ml, Erlenmeyer de 250 ml, llave de paso con embudo de vidrio, soportes universales, pinzas de laboratorio, brocha de 1", cinta americana, llaves combinadas de 9/16 ", racores, tapones macho VCR de Acero inoxidable de 1/4", tubing de 1/4", válvula de alivio, marca Swagelok, cinta calefactora para tuberías, Rubinate ® 5005 distribuido por productos químicos S.A, glicerol 85% de Emsure ® marca Merck KGaA, aceite de ricino distribuido por laboratorios León, aceite hidráulico ISO 68 distribuido por Terpel, Sigmashield 880 distribuido por PPG Industries Colombia Ltda, rotoevaporador Heidolph Hei-VAP Precisión, plancha de calentamiento con agitación magnética marca Heidolph, bomba de vacío en seco marca Welch, horno de laboratorio marca Binder, termómetro infrarrojo marca fluke, termohigrometro digital, analizador mecánico diferencial DMA serie Q800 TA INSTRUMENTS®, montaje para prueba hidrostática, el cual consta de un sistema de control (tarjeta arduino, termocuplas, transductor de presión), un gato hidráulico y un horno.

### 1.5.2. Métodos:

- **Prueba de inserción:** se realizó la inserción de los tapones en la falla cuando la temperatura de la superficie era 90 °C, se utilizó un calibrador para medir la cabeza, tronco y base de cada tapón (Anexo D). Se compararon estas dimensiones con las originales, con el fin determinar la ubicación y magnitud de los daños en el material y finalmente se seleccionó la relación molar de polioles que sufrió la menor cantidad de daños.
- **Prueba de corte enrejado:** establece el procedimiento para determinar la resistencia a la adherencia de las pinturas y recubrimientos al ser separados del sustrato, realizando cortes en ángulo recto sobre el recubrimiento y penetrando hasta el sustrato [29]. Esta prueba se realizó para determinar el grado de adherencia entre la tubería de acero y el poliuretano, a diferentes condiciones de curado del puente adherente. Se repararon dos tuberías con curas de poliuretano reforzado con fibra de vidrio de relación molar de polioles 70:30; la tubería 1 se dejó expuesta a condiciones ambientales (a una temperatura promedio de 30 °C) por un periodo de 5 días, este tiempo se estableció según la ficha técnica del pegante [27]; y la tubería 2 se dejó expuesta a una temperatura de 90 °C, por un periodo de 12 horas.
- **Prueba hidrostática:** es la aplicación de una presión a una línea de tuberías fuera de operación, con el propósito de verificar la hermeticidad de los accesorios bridados y la soldadura, utilizando como elemento principal el agua o en su defecto un fluido no corrosivo [8]. Se utilizó para encontrar la presión de fuga y de expulsión, así como evaluar la presión de trabajo del kit, utilizando como fluido aceite ISO 68.
- **Análisis mecánico diferencial (DMA):** permite medir las propiedades mecánicas de un material viscoelástico en función de variables como la temperatura, el tiempo o la frecuencia mientras se somete a un esfuerzo, ya

sea fijo o variable [31]. Se utilizó para analizar el comportamiento del módulo de almacenamiento de las relaciones molares de polioles en función de la temperatura.

## 2. RESULTADOS

### 2.1. DISEÑO DEL MODELO DE TAPÓN

En la tabla 1, se presentan los problemas del modelo base y las soluciones propuestas en el nuevo diseño de tapón.

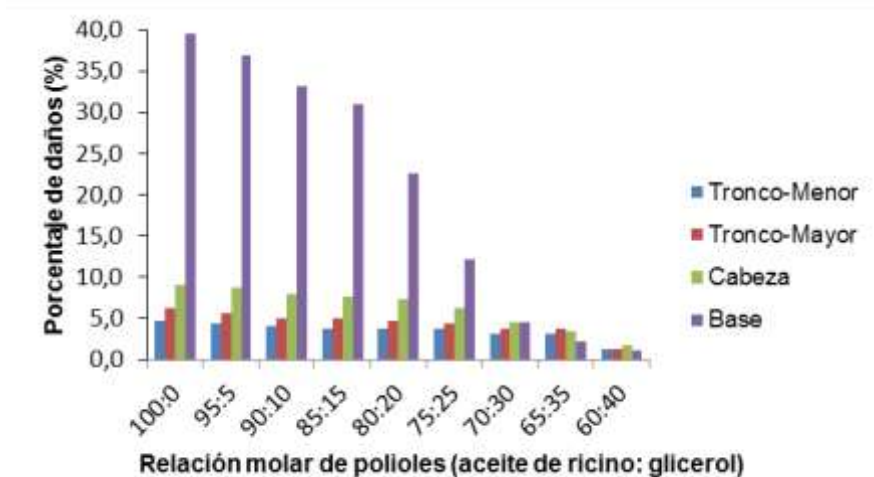
Tabla 1. Comparación entre el modelo de tapón base y el propuesto

Modelo Base	Modelo Propuesto
 <ul style="list-style-type: none"> <li>• No tiene límite de inserción, este depende de la fuerza aplicada.</li> <li>• La distribución de fuerzas en el interior de la tubería no es uniforme (Anexo B).</li> <li>• Las fuerzas de presión se aplican sobre la base menor del cono.</li> <li>• Presenta espacios muertos en el interior de la tubería, debido a que el diámetro varía en función de la altura.</li> <li>• La forma cónica se ajusta a la falla, permitiendo hermeticidad en el sistema.</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• La base limita la inserción en la falla, estandarizando este proceso.</li> <li>• Las fuerzas de presión se distribuyen a lo largo de la superficie de la semiesfera (Anexo B).</li> <li>• La cabeza semiesférica evita espacios muertos en el interior la tubería</li> <li>• El tronco es cónico, ya que permite la hermeticidad en el sistema.</li> </ul>

## 2.2. SELECCIÓN DE LA RELACIÓN MOLAR DE POLIOLES

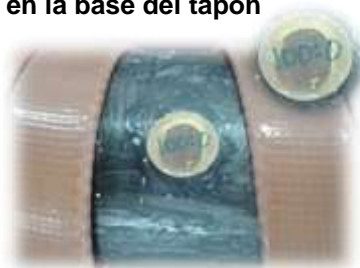
En la figura 3 se observan los resultados obtenidos en las pruebas de inserción para cada una de las relaciones molares de polioles estudiadas.

Figura 3. Porcentaje de daños en la integridad del tapón.



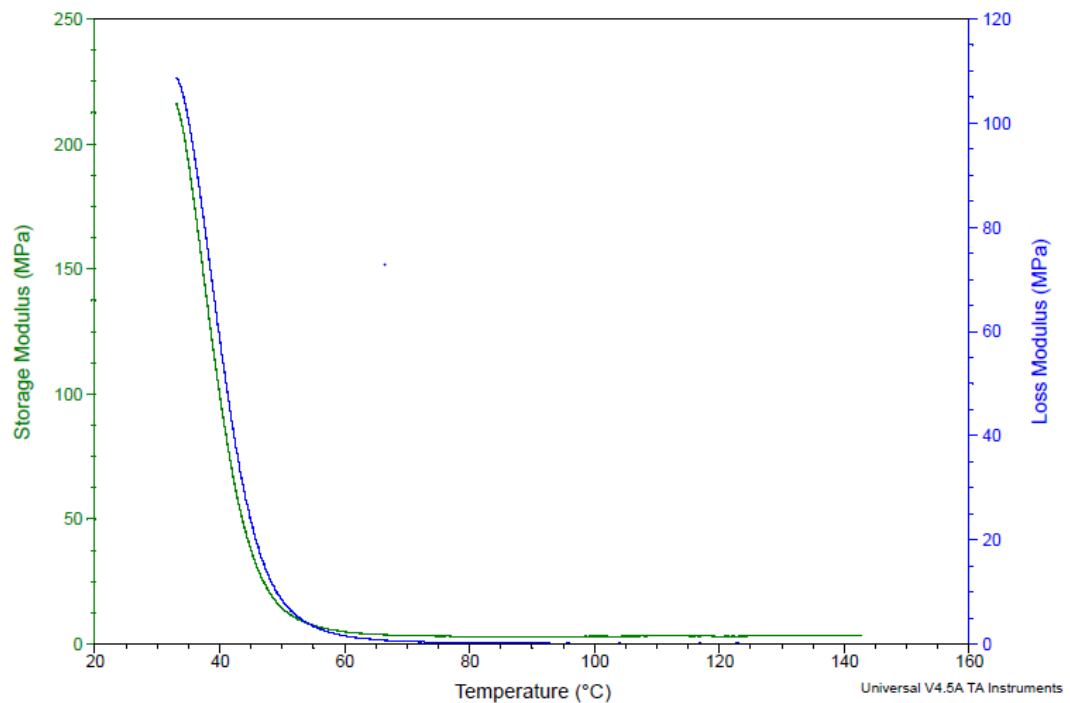
Las relaciones molares de polioles desde 100:0 hasta 75:25 presentaron porcentajes de daños en la base del tapón superiores al 12%; los cuales se observaron con un cambio de coloración y posteriormente con la ruptura del material (Figura 4); esto se debe al bajo módulo de almacenamiento que poseen estas relaciones molares de polioles, es decir, el material no es capaz de almacenar la energía suministrada, tanto por el calor de la tubería como por el esfuerzo puntual aplicado, así que disipa una parte de esta deformándose permanentemente hasta alcanzar el punto de ruptura.

Figura 4. Cambio de coloración en la base del tapón



Se seleccionó la relación molar de polioles 60:40, ya que sufrió la menor cantidad de daños en las pruebas de inserción; puesto que a medida que el contenido de glicerol y la temperatura del polímero aumentan, el módulo de almacenamiento supera el de pérdida, permitiendo que el material soporte una mayor cantidad de energía antes de deformarse permanente (Figura 5).

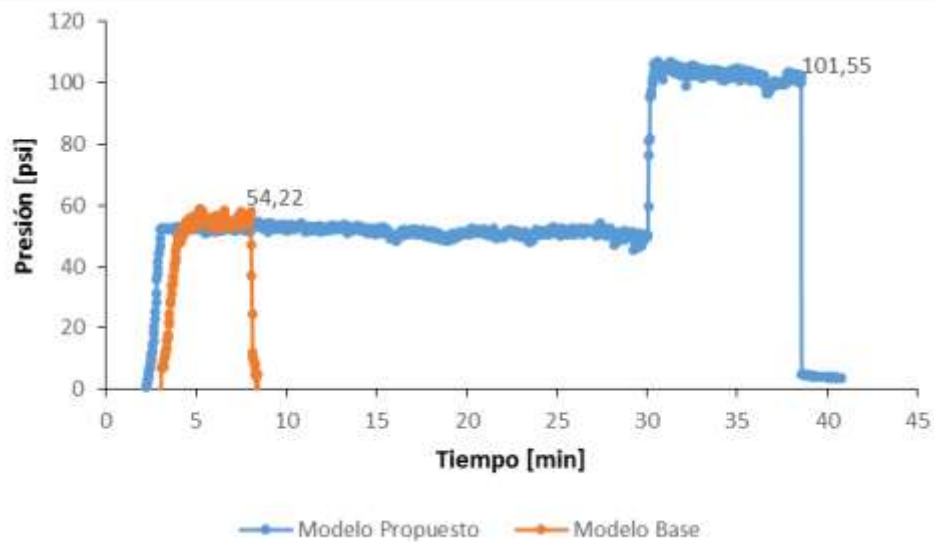
**Figura 5. Módulo de almacenamiento y de pérdida para la relación molar de polioles 60:40**



### 2.3. PRESIÓN DE EXPULSIÓN DEL MODELO BASE Y PROPUESTO DE TAPÓN

En la figura 6 se presentan los resultados obtenidos de promediar las pruebas hidrostáticas realizadas al modelo base y propuesto de relación molar de polioles 60:40, a una temperatura de 22 °C.

**Figura 6. Presión de expulsión del tapón base y propuesto de relación molar de polioles 60:40**



El modelo base fue expulsado de la falla en un tiempo de 3 minutos a los 54 psi, en cambio, el modelo propuesto alcanzó una presión de expulsión de 101 psi manteniéndose por un tiempo de 9 minutos sin presentar goteo durante la prueba. Lo anterior permite afirmar que el diseño influye en la presión que soporta el tapón antes de ser expulsado de la falla, ya que el modelo propuesto de tapón permite una mejor distribución de fuerzas en el interior de la tubería comparado con el modelo base, lo cual se ve reflejado en la presión que soportan.

## 2.4. DISEÑO DE LA CURA

El diseño de la cura se realizó según la norma ASME PCC-2 del 2008, donde se establece que la longitud axial total de la reparación no metálica (L) está dada por (Figura 7),

$$L = 2L_{over} + L_{defect} + 2L_{taper}$$

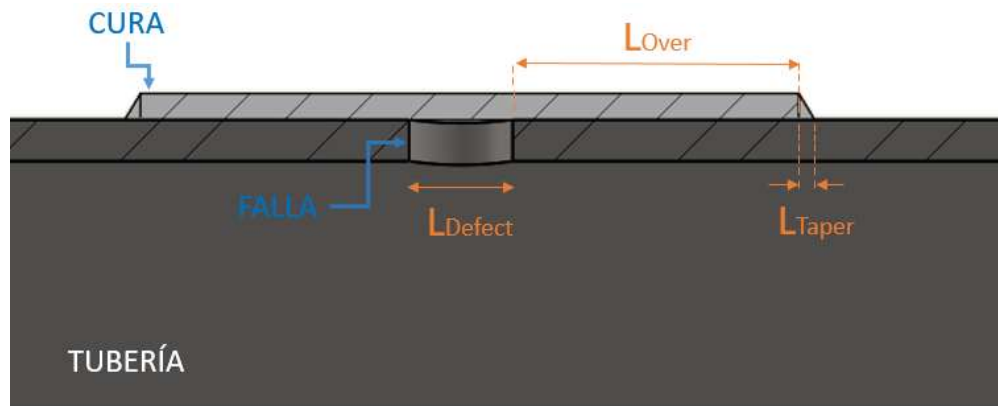
$$L_{over} = 2,5 \sqrt{Dt/2} = 1,78 \text{ in}$$

La longitud axial del defecto,  $L_{defect}$ , es el diámetro de la falla; y como los lados de la cura no son biselados en los extremos,  $L_{taper}$  es cero.

Entonces la longitud axial de la cura es:

$$L = 2 ( 1,78 \text{ in} ) + 0,57 \text{ in} + 2 ( 0 ) = 4,13 \text{ in}$$

**Figura 7. Diseño de la cura**



## 2.5. GRADO Y CONDICIONES DE ADHERENCIA ENTRE LA TUBERÍA DE GRADO API 5L Y EL POLIURETANO

Las condiciones establecidas inicialmente para reparar tuberías fueron: un espesor de película húmeda del puente adherente de 4 mils, un porcentaje de humedad relativa menor al 85%, un perfil de rugosidad entre 2,1 y 3,1 mils, una limpieza del acero grado SP5 y una temperatura de la superficie metálica de 90 °C.

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de corte enrejado, teniendo en cuenta las condiciones de reparación, los cuales se analizaron teniendo en cuenta la tabla 1 enunciada en la norma ASTM D3359-09 (Anexo E).

**Tabla 2. Grado de adherencia entre los substratos**

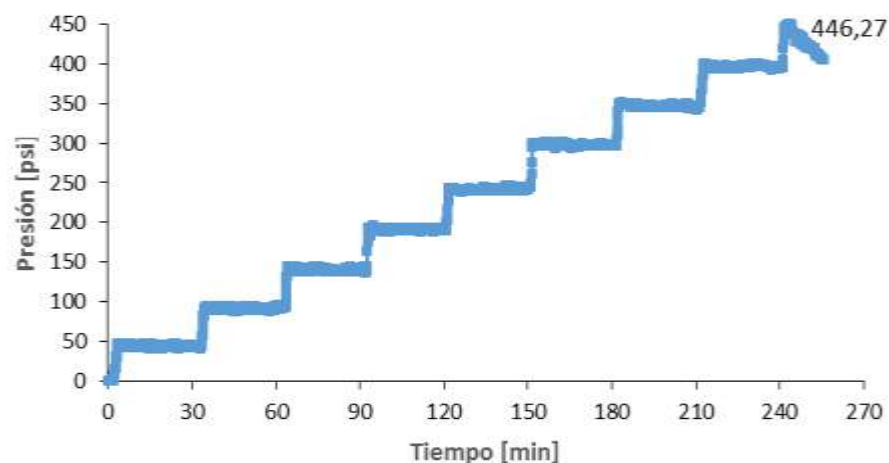
Tubería	% Adherencia removida	Promedio (%)	% Adherencia
1	1	0,5	99,5
2	25	30	70

La tubería 1 presentó un grado de adherencia del 99,5% y la tubería 2 del 70%, por lo tanto se estableció un tiempo de curado del Sigmashield 880 de 12 horas a una temperatura de 90 °C y se verificó el protocolo de reparación.

## 2.6. PRESIÓN DE FUGA DEL SISTEMA TP + C

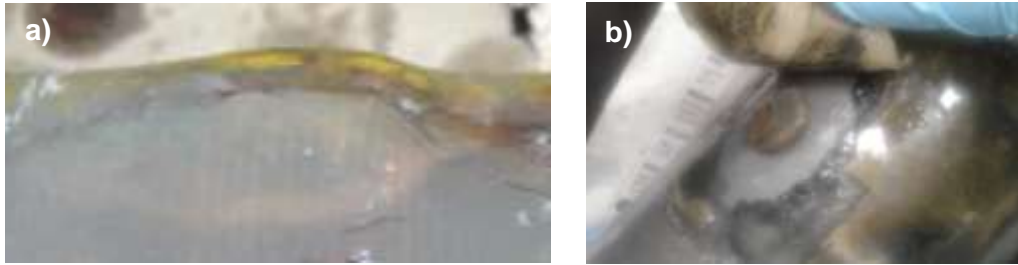
En la figura 8 se presentan los resultados obtenidos de promediar las pruebas hidrostáticas realizadas al sistema tapón de relación molar de polioles 60:40 y a la cura cuadrada reforzada con fibra de vidrio de relación molar 70:30, a una temperatura de 22 °C. La presión de fuga del sistema fue de 450 psi en un tiempo de 240 minutos.

Figura 8. Presión de fuga del sistema TP + C



Durante las pruebas hidrostáticas la cura presentó un abultamiento en la zona de la falla. Finalizadas estas, se retiró el material y se realizó una inspección visual en las superficies; donde se observó que el tapón se desajusta de la falla, causando que el polímero se desprenda de la superficie metálica lo cual se evidencia con el abultamiento de la cura (Figura 9). Además, este desajuste del tapón y desprendimiento entre las superficies, permite la salida del fluido causando una fuga en el sistema.

**Figura 9. Abultamiento de la cura (a) y desajuste del tapón (b)**



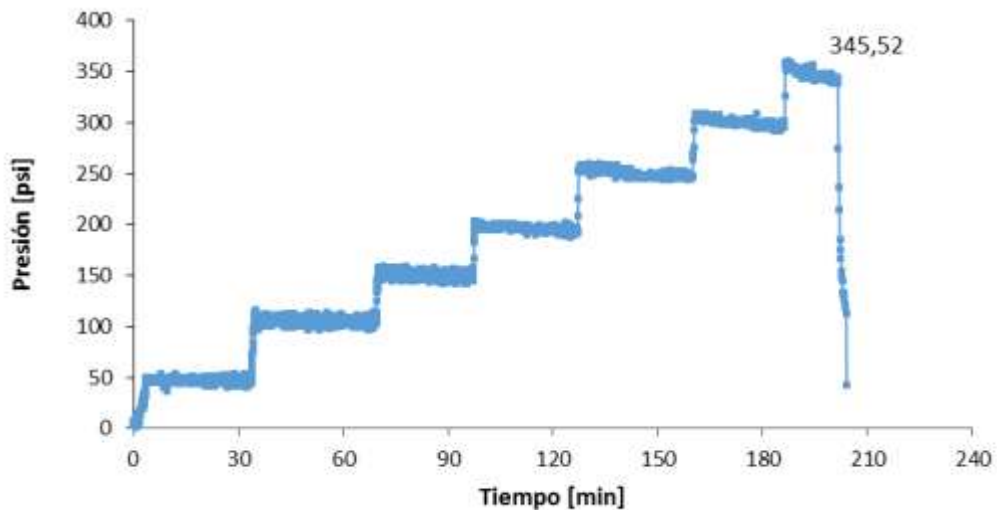
## 2.7. DISEÑO DE LA BANDA (B)

La banda rectangular de poliuretano reforzada con fibra de vidrio de relación molar de poliols 70:30 se diseñó con las siguientes dimensiones: un espesor de 1/16 in, un ancho de 4,13 in y un largo de 10,6 in [4, 20, 22].

## 2.8. PRESIÓN DE FUGA

**2.8.1. Sistema TP + B:** En la figura 10 se presentan los resultados obtenidos de promediar las pruebas hidrostáticas realizadas al sistema tapón seleccionado y a la banda reforzada con fibra de vidrio de relación molar 70:30, a una temperatura de 22 °C.

**Figura 10. Presión de fuga del sistema TP + B**

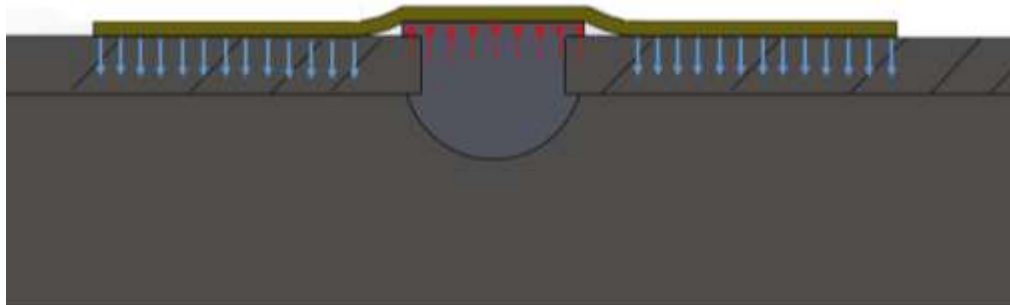


A una presión de 350 psi la banda se rompió causando una fuga en el sistema (Figura 11), esto se debe a que la sumatoria de fuerzas de adhesión a lo largo de la longitud de la banda es mayor que el límite de rotura del material y que la presión aplicada (Figura 12), por ende, no ocurre desprendimiento entre las superficies.

**Figura 11. Rotura de la banda**



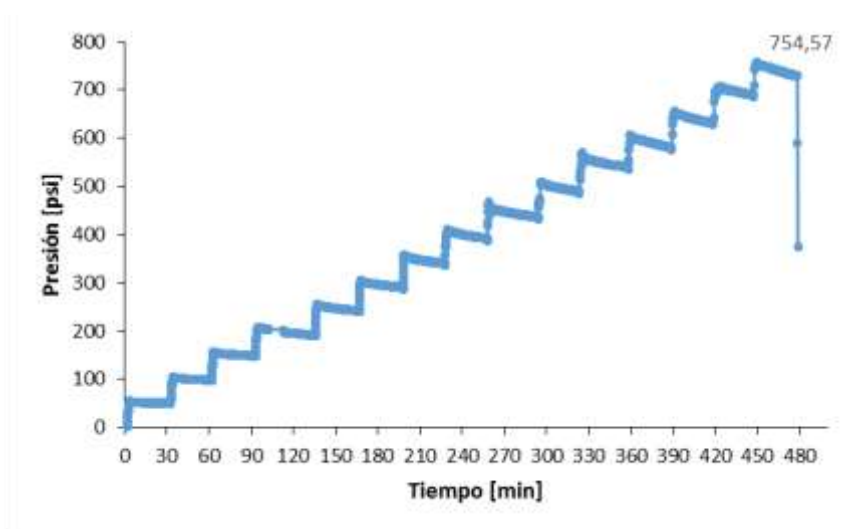
**Figura 12. Diagrama de fuerzas que actúan sobre la banda**



**2.8.2. Sistema tapón TP + C + B:** En la figura 13 se presentan los resultados obtenidos de promediar las pruebas hidrostáticas realizadas al sistema tapón, cura y banda a una temperatura de 22 °C.

Finalizada las pruebas hidrostáticas se realizó una inspección visual donde se encontró que las causas de la falla fueron las mismas que se presentaron en el sistema TP+C, sin embargo, al adicionar la banda se logró aumentar la presión de fuga de 450 a 750 psi.

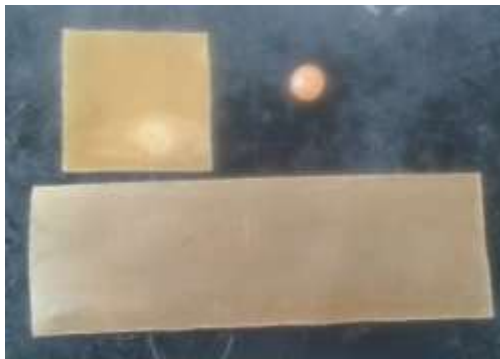
**Figura 13. Presión de fuga del sistema TP + C + B**



## **2.9. PRESIÓN DE TRABAJO DEL KIT A UNA TEMPERATURA DE 22 °C**

Según los resultados obtenidos en las pruebas hidrostáticas, el kit de reparación seleccionado es el sistema tapón, cura y banda (Figura 14), ya que soportó la mayor presión de fuga, es decir, 750 psi.

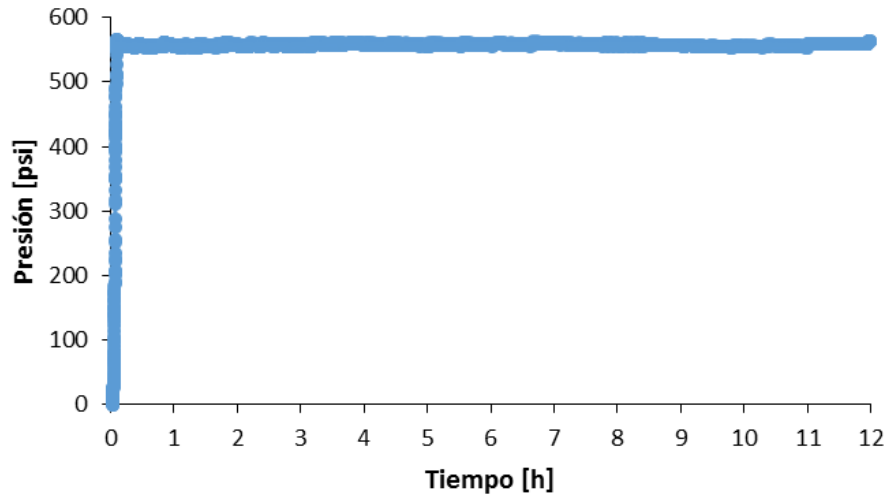
**Figura 14. Partes del kit: cura, tapón, banda**



La presión de trabajo del kit a 22 °C es de 560 psi, teniendo en cuenta un factor de seguridad del 25% [7]. Con el fin de verificar esta presión, se realizaron pruebas hidrostáticas manteniendo el sistema a 560 psi por un tiempo mínimo de 4 horas [7].

En la figura 15 se presentan los resultados obtenidos de promediar las pruebas hidrostáticas a una temperatura de 22 °C

**Figura 15. Evaluación de la presión de trabajo en el tiempo.**

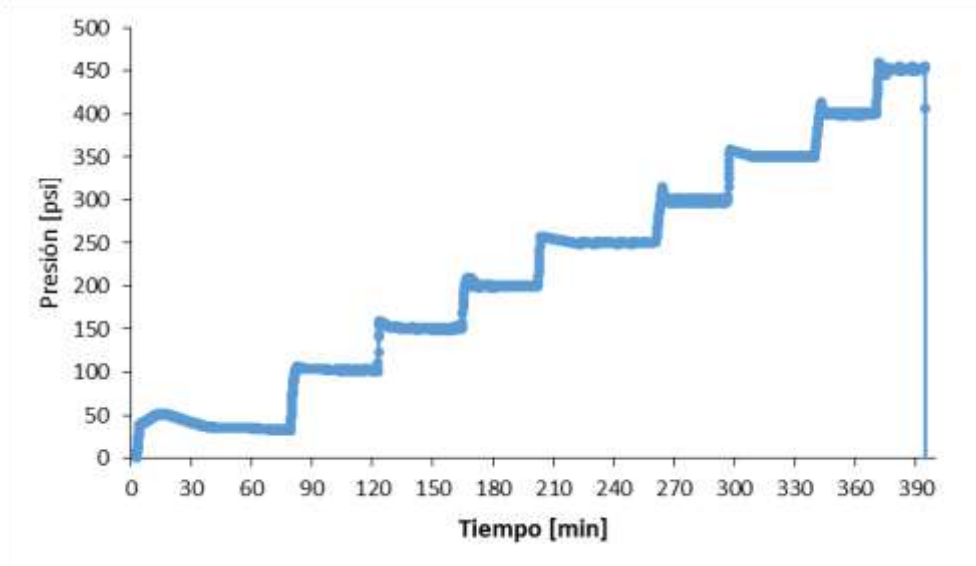


Después de las 4 horas mínimas que estipula la norma para evaluar la presión de trabajo establecida, se dejó el sistema por 8 horas más sin presentar caídas de presión ni daños en el material, por lo tanto las pruebas hidrostáticas fueron satisfactorias.

## **2.10. PRESIÓN DE FUGA DEL KIT A UNA TEMPERATURA DE 90 °C**

En la figura 16 se presentan los resultados obtenidos de promediar las pruebas hidrostáticas realizadas al kit de reparación, las cuales se realizaron con el objetivo de hallar la máxima presión de fuga del sistema a una temperatura de 90 °C. El tiempo de estabilización de la temperatura del fluido fue de 2 horas. El sistema presentó variaciones de temperatura de  $\pm 1$  °C, las cuales se manifestaron en fluctuaciones de presión al inicio de cada rampa.

**Figura 16. Presión de fuga del kit de reparación a una temperatura de 90 °C**

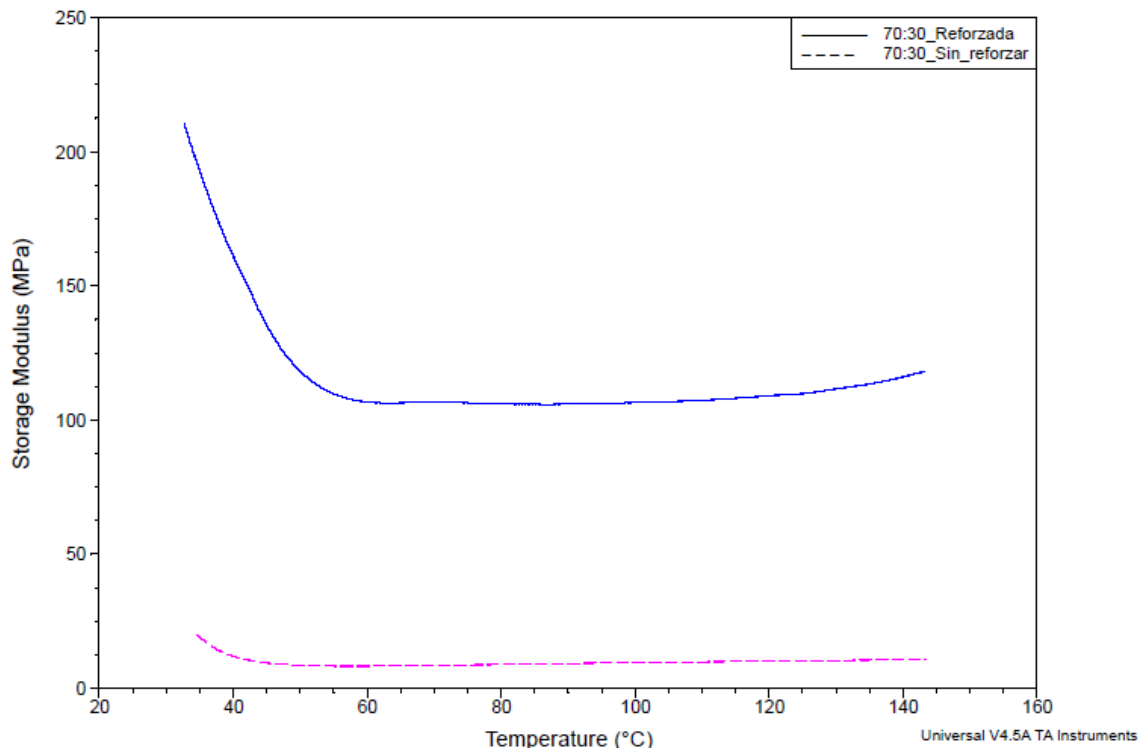


A una presión de 450 psi se presentó fuga en el sistema, debido a que la cura y la banda se rompieron (Figura 17). Esta falla en el material se debe a que el módulo de almacenamiento disminuye con el aumento de la temperatura; cabe resaltar que al reforzar el material con fibra de vidrio se mejoran considerablemente sus propiedades mecánicas (Figura 18).

**Figura 17. Daños en el material a una presión de 450 psi y una temperatura de 90 °C**



**Figura 18. Módulo de almacenamiento de la relación molar de polioles 70:30, con y sin refuerzo de fibra de vidrio.**

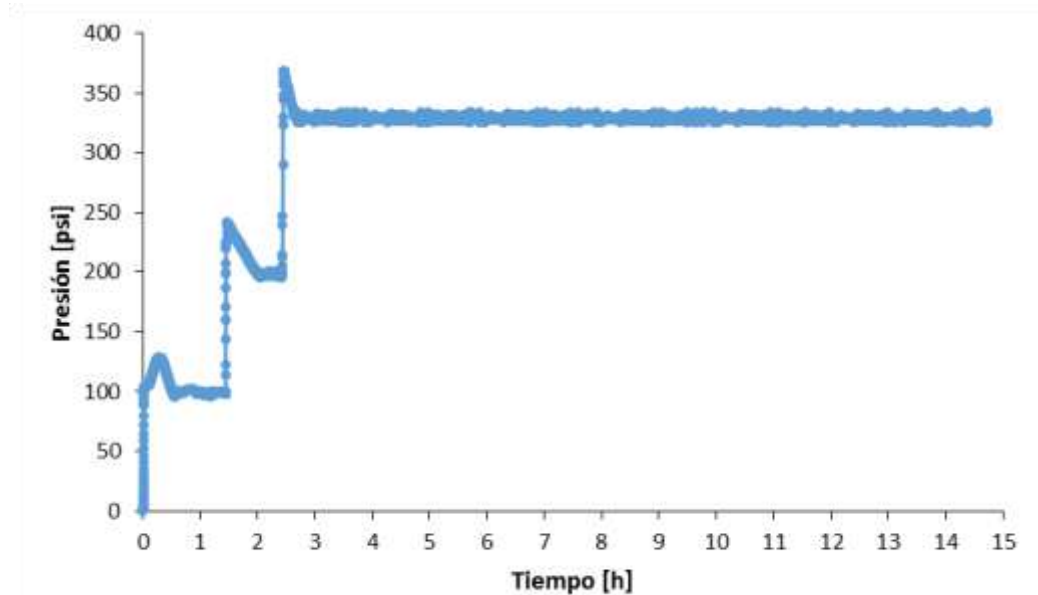


### **2.11. PRESIÓN DE TRABAJO DEL KIT A UNA TEMPERATURA DE 90 °C**

La presión de trabajo del kit a 90 °C es de 330 psi, teniendo en cuenta un factor de seguridad del 25% [7]. Con el fin de verificar la presión de trabajo, se realizaron pruebas hidrostáticas manteniendo el sistema a 330 psi por un tiempo mínimo de 4 horas [7].

En la figura 19 se presentan los resultados obtenidos de promediar las pruebas hidrostáticas a una temperatura de 90 °C.

Figura 19. Evaluación de la presión de trabajo en el tiempo a una T= 90 °C.



La temperatura se estabilizó en un tiempo de 2 horas, luego se presurizó el sistema según el protocolo establecido por la norma ASTM E 1003, durante este proceso se presentaron fluctuaciones de temperatura y por ende de presión al inicio de cada una de las rampas. La presión de trabajo se alcanzó al cabo de un tiempo de 2,7 horas, manteniéndose por 12 horas sin presentar daños en el material ni fugas en el sistema; por lo que se puede afirmar que las pruebas fueron satisfactorias.

## 2.12. REPARACIÓN DE TUBERÍAS DE GRADO API 5L CON FALLAS DE DIAMETRO DE 0,59 IN UTILIZANDO EL KIT DISEÑADO

La reparación utilizando el kit diseñado consta de:

- Un composite de poliuretano reforzado con fibra de vidrio, el cual es la cura cuadrada y la banda rectangular de relación molar de polioles 70:30.
- Un material de relleno, el cual es un tapón poliuretano de relación molar de polioles 60:40.

- Un puente adherente, Sigmashield 880, el cual es un adhesivo epóxico.
- Un sustrato el cual es una tubería de grado API 5L de diámetro externo de 4,44 in, longitud de 10 in y un espesor de 0,23 in.
- Una preparación del sustrato hasta alcanzar un grado de limpieza SSPC-SP5.
- Un protocolo y curado de la reparación.

**2.12.1 Preparación de los sustratos:** Se limpian las tuberías con Sandblasting hasta alcanzar una limpieza SSPC-SP 5 (Figura 20), con una arena de Peña Sogamoso tipo I, clase A y grado 3 (produce un perfil de rugosidad entre 2.0 y 3.5 mils). En la figura 21 se muestra la tubería después del proceso de limpieza.

**Figura 20. Metal Blanco**



**Fuente:** CYM MATERIALES S.A. Informes Técnicos: Preparación de superficie-Norma SSPC [en línea]. (Agosto, 2015: Argentina). 8 p. Disponible en: <<http://docplayer.es/19992214-Preparacion-de-superficie-norma-sspc.html>>

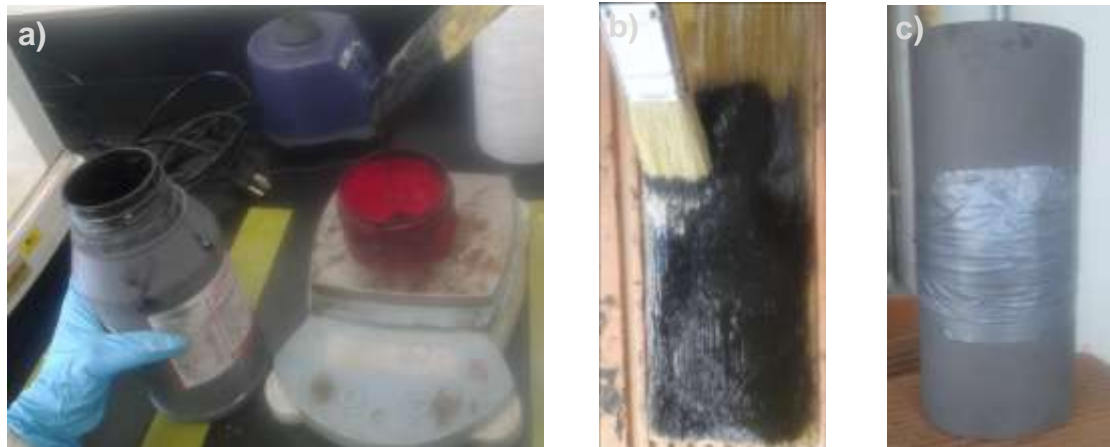
**Figura 21. Tubería limpia - Grado metal blanco**



Luego se realizan 10 mediciones de la rugosidad al poliuretano, utilizando un rugosímetro análogo, se promedian y se encuentra el perfil de anclaje. Se lija el material polimérico en el mismo sentido con una lija n 24 hasta alcanzar un perfil de anclaje promedio de 2,1 a 3,1 mils [27].

**2.12.2 Reparación:** Se calienta la superficie de la tubería utilizando una cinta calefactora hasta  $90 \pm 5$  °C, alcanzada esta temperatura se inserta completamente el tapón en la falla utilizando un martillo. Durante el calentamiento se registran las condiciones ambientales del lugar con un termohigrometro. Se determinan las cantidades máxicas de base y endurecedor (3:1) del Sigmashield 880 [27], se homogeniza la mezcla y se aplica con una brocha sobre el polímero hasta lograr un espesor de película húmeda uniforme de 4 mils, lo cual se verifica mediante una galga. Se adhiere la cura y la banda a la tubería, e inmediatamente se cubre la reparación con cinta americana. Finalmente se deja la tubería reparada en el horno durante 12 h a 100 °C (Figura 22).

**Figura 22. (a) Preparación y (b) Aplicación del puente adherente. (c) tubería reparada**



### 3. CONCLUSIONES

Las pruebas hidrostáticas realizadas a 22 °C permitieron seleccionar las partes que debía incluir el kit de reparación diseñado: un tapón de cabeza semiesférica de relación molar de polioles 60:40, una cura cuadrada de área 17,06 in<sup>2</sup> y una banda rectangular de área 43,78 in<sup>2</sup>, ambas reforzadas con fibra de vidrio y de relación molar de polioles 70:30; sistema que soportó la mayor presión de fuga (750 psi). Además, se logró verificar que la fibra de vidrio y la presencia de glicerol en la matriz polimérica mejoran las propiedades mecánicas del material, tales como la rigidez y el módulo de almacenamiento; sin embargo, la combinación de las variables presión y temperatura disminuyen dichas propiedades afectando el comportamiento del material en las pruebas realizadas.

El Sigmashield 880 presentó un 99,5 % de adherencia entre la superficie metálica y el poliuretano, teniendo en cuenta las condiciones establecidas en el protocolo de reparación, por lo tanto es adecuado utilizarlo como puente adherente entre los substratos.

El kit diseñado, sintetizado y evaluado es una alternativa fácil, rápida, confiable y segura para reparar fallas con áreas menores a 0,27 in<sup>2</sup> en tuberías de grado API 5L utilizadas para el transporte de fluidos incompresibles, que operan a presiones y temperaturas de trabajo menores o iguales a 330 psi y 90 °C, respectivamente.

#### 4. RECOMENDACIONES

- Evaluar el kit de reparación diseñado a diferentes diámetros de fallas, realizando las modificaciones de diseño pertinentes a cada una de sus partes.
- Se recomienda estudiar el uso de aditivos que mejoren las propiedades mecánicas y por ende aumenten la presión de expulsión del tapón.
- Realizar pruebas hidrostáticas a temperaturas entre 22 °C y 90 °C, para determinar las presiones de trabajo en dicho rango y así ampliar la aplicabilidad del kit.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] USAQUÉN LÓPEZ, Jairo. Principales problema operacionales para el transporte de crudo pesado a través del oleoducto Velásquez- Galán y recomendaciones para sus posibles soluciones Campo Velásquez. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2004, p. 54-55. Disponible en: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/717/2/114327.pdf>>

[2] MORALES VELASCO, Mauricio. Propuesta para la reparación del oleoducto primario existente en el campo Marginal Tiguino a cargo de la empresa Petrobell Inc. Grantmining S.A basado en la norma ANSI/ASME B31G. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2011, p.105-106. Disponible en: <<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4961/1/T-ESPE-032998.pdf>>

[3] BELZONA INDUSTRIAL PROTECTIVE COATINGS AND COMPOSITES. Composite Repair Solutions for Corrosion Under Insulation [en línea], Mayo 2014 [Citado en 30 de Julio de 2016], p. 10-19. Disponible en: <<http://www.nace-jubail.org/Meetings/Composite%20Repair%20Solutions%20for%20Corrosion%20Under%20Insulation%20-%20NACE%20Jubail%20May%202014%20-%20Copy.pdf>>

[4] TRAXCO. Reparación de tuberías sin obras, venda repara tuberías [en línea]. Disponible en: <<http://www.traxco.es/tienda/venda-repara-tuberias>>.[Citado en 28 de Noviembre de 2016].

[5] RUMICHE, F. y INDACOCHEA, E. Estudios de Caso de Fallas y Accidentes en Gasoductos y Oleoductos [en línea], s.f [citado en 28 de Noviembre de 2016]. University of Illinois at Chicago, 6 p. Disponible en:

<<http://claridadpuertorico.com/documents/articles/01%20Gasoductos%20y%20oleoductos-%20estudio%20fallas.pdf>>

[6] ROHEM, N.R.F et al. Development and qualification of a new polymeric matrix laminated composite for pipe repair. En: Composite Structure. [En línea]. Vol 152, (28 - Mayo 2016); 1 .p. Disponible en: <<http://ezproxy.uis.edu.co:2052/science/article/pii/S0263822316307140>>

[7] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.4: Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids [en línea]. Revisión de ASME B31.4-1998. New York, 2002. p. 53-54. Disponible en: <<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/asme.b31.4.2002.pdf>>

[8] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Repair of Pressure Equipment and Piping [en línea]. ASME PCC-2-2008. Revisión de ASME PCC-2-2006. New York, 2008. p. 131-160. Disponible en: <<https://es.scribd.com/document/235452757/ASME-PCC-2-2008-Repair-of-Pressure-Equipment-and-Piping>>

[9] DA MATTOS COSTA, H.S et al. Analysis of a glass fibre reinforced polyurethane composite repair system for corroded pipelines at elevated temperatures. En: Composite Structure. [En línea]. Vol 114, (30- Abril. 2014); p. 117-118. Disponible en: <<http://ezproxy.uis.edu.co:2052/science/article/pii/S0263822314001822?>>

[10] CRUZ RIAÑO, Luis Javier; JARAMILLO, Franklin y GIL PILONIETA, Angélica. Poliuretanos degradables a partir de aceite de higuera. En: Scientia et Technica. [En línea]. Vol 1, no. 36 (Septiembre 2007); p. 1-4. Disponible en: <<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4855/2789>>

[11] AGUILAR, Cristóbal, et al. Aceites vegetales: una fuente renovable y económica para obtener plásticos. En: Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. [En línea]. Vol. 4, no. 8 (2012); p. 24- 27. Disponible en: <<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/Documentos/AQM/AQM8/3.pdf>>

[12] GARCÍA, Aarón y MACHADO, Leonardo. Evaluación del comportamiento físico-mecánico de un poliuretano reforzado, producido a partir de aceite de ricino, y su competitividad técnica como material de aplicabilidad industrial. Trabajo de grado ingeniero químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2013, 16 p. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/148366.pdf>>

[13] AIMARETTI, Nora et al. Aprovechamiento de la glicerina obtenida durante la producción de biodiesel. En: Invenio Revista de Investigación Académica de la universidad del Centro Educativo Latinoamericano. [En línea]. Vol 11, no 020 (Junio 2008); p. 137-144. Disponible en: <<http://es.slideshare.net/IvanHinojosa1/aprovechamiento-de-la-glicerina-obtenida-durante-la-produccion-de-biodiesel>>

[14] LÓPEZ, Sergio y TELLEZ, Mayra. Uso de poliuretano a partir de aceite de ricino y glicerol de la síntesis y caracterización de composites reforzados con tejidos naturales de yute y lona. Trabajo de grado ingeniero químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2016, p. 17-49. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2016/163499.pdf>>

[15] IBAÑEZ, Paola y DELGADO, Leidy. Estudio de la influencia de la variación de la relación NCO:OH y el tipo de glicerol en las propiedades finales de poliuretano sintetizados a partir de aceite de ricino y glicerol. Trabajo de grado ingeniero químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de

ingenierías fisicoquímicas, 2015, p 16-47. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/159101.pdf>>

[16] BASF The Chemical Company. Elastómeros de poliuretano termoplástico: Propiedades del material. [En línea]. Disponible en: <[http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/en/function/conversions:/publish/content/group/Arbeitsgebiete\\_und\\_Produkte/Thermoplastische\\_Spezialelastomere/Infomaterial/elastollan\\_material\\_es.pdf](http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/en/function/conversions:/publish/content/group/Arbeitsgebiete_und_Produkte/Thermoplastische_Spezialelastomere/Infomaterial/elastollan_material_es.pdf)>

[17] BENAVENTE, R. Comportamiento mecanodinámico, relajaciones en polímeros [diapositivas]. España, 2011. 45 diapositivas. Disponible en: <[http://www2.ictp.csic.es/qf/ppcontrol/bibliografia/D23-Propiedades\\_DMTA\\_Rbenavente.pdf](http://www2.ictp.csic.es/qf/ppcontrol/bibliografia/D23-Propiedades_DMTA_Rbenavente.pdf)>

[18] GÓMEZ GARCÍA, Carmelo. Caracterización térmica y mecánica de polibutilentereftalato (PBT) reforzado con fibra de vidrio. Trabajo de grado Doctorado en materiales. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2012, p. 1-4. Disponible en: <<http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/3185/tfpfd7.pdf;jsessionid=B80132C80767D00DE95642399512877A?sequence=1>>

[19] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 5L: Specification for Line Pipe [en línea]. 3d. New York, 2004, p 1-3. Disponible en: <<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.5l.2004.pdf>>

[20] GELVES, Marcela. Análisis de resultados-Prueba hidrostática: Refuerzo mecánico PUR. (3-5, mayo, 2016: Bucaramanga). Corporación para la Investigación de la Corrosión, 2016. 2 p.

[21] POLO, Belkys. Informe parcial: Desarrollo y evaluación de un kit de reparación (hot-repair) para control de fugas. (25, Julio, 2016: Bucaramanga). Grupo de Investigación en Polímeros, 2016. 9 p.

[22] CUADROS VARGAS, Edwin Alirio y VARGAS CARVAJAL, Joan Alejandro. Síntesis, caracterización y evaluación de composites a partir de poliuretano y fibra de vidrio para su aplicación en reparación de tuberías metálicas. Trabajo de grado ingeniero químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2015. p. 17-49. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/160127.pdf>>

[23] DÍAZ ARCE, Édgar Fabián y MUÑOZ VEGA, Óscar Mauricio. Estudio de las variables de síntesis de poliuretano a partir de aceite de ricino y glicerol. Trabajo de grado ingeniero químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2014. p. 26-50. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/152151.pdf>>

[24] ECOPETROL. Normas de Ingeniería de Oleoductos: Prueba Hidrostática, Julio 1997 [Citado en 25 de Noviembre de 2016], p. 1-2.

[25] CUADROS Y VARGAS, Op cit, 52 .p.

[26] GARCÍA y MACHADO, Op cit, p 16-17.

[27] PPG PROTECTIVE & MARINE COATINGS. Hoja del producto Sigmashield 880/ Amerlock 880 [en línea]. Disponible en: <<https://docs.td.ppgpmc.com//download/550/1212/sigmashield-880--amerlock-880>>. [Citado en 8 Agosto de 2016].

[28] MONTAÑEZ, Javier. Evaluación del Puente de Adherencia. (22, Julio, 2015: Bucaramanga). Corporación para la Investigación de la Corrosión, 2015. 2 p.

[29] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM D3359-09: Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test [en línea], 2010, p. 1-7. Disponible en: <<http://tankpaint.com/wp-content/uploads/D3359-Substrate-Adhesion.pdf>>

[30] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM E 1003-95: Standard Test Method for Hydrostatic Leak Testing [en línea], 2000, p. 1-3. Disponible en: <<https://es.scribd.com/doc/170791870/ASTM-E1003-00-pdf>>

[31] MENARD, Kevin. Dynamic Mechanical Analysis: a practical introduction. 2 ed. New York: Taylor & Francis Group, 2008. 203. p. ISBN 978-1-4200-5312-8.

## BIBLIOGRAFÍA

AHMED MOHAMMED, Issam et al. Structure-Property Studies of Thermoplastic and Thermosetting Polyurethanes Using Palm and Soya Oils-Bases Polyols [en línea]. Journal of Oleo Science. 2013. vol. 62, no. 12, p. 1059-1072. ISSN 1345.8957. Disponible en: <[https://umexpert.um.edu.my/file/publication/00013586\\_133309.pdf](https://umexpert.um.edu.my/file/publication/00013586_133309.pdf)>

BARLOW, Peter & DARWIN, Darvid. Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures. [En línea]. American Concrete Institute. ACI 224.1R-07. 22 p. Disponible en: <[http://mwengineering.net/wp-content/uploads/2241r\\_07.pdf](http://mwengineering.net/wp-content/uploads/2241r_07.pdf)>

CRUZ ALDACO, Karina et al. Aceites vegetales: Una fuente renovable y económica para obtener plásticos. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. 2012. vol. 4, no. 8, p. 24-31.

CYM MATERIALES S.A. Informes Técnicos: Preparación de superficie-Norma SSPC [en línea]. (Agosto, 2015: Argentina). 8 p. Disponible en: <<http://docplayer.es/19992214-Preparacion-de-superficie-norma-sspc.html>>

GARCÍA QUESADA, Juan Carlos. Tema 3. Viscoelasticidad lineal [en línea], Junio 2008 [Citado en 7 de Diciembre de 2016], 33 p. Disponible en: <<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3624/1/tema3RUA.pdf>>

HYDRATICA. Informe final prueba hidrostática [en línea]. (27, Noviembre, 2014: Gualanday-Colombia). 11 p. Disponible en: <<http://documents.mx/documents/informe-final-prueba-hidrostatica.html>>

MAFLA, Manolo. Procedimiento para pruebas hidrostáticas de líneas de proceso [en línea]. (9, Julio, 2015: Quito-Ecuador). Inspecciones Técnicas Petroleras S.A. 12 p. Disponible en: <<http://www.itpsa.com.ec/pdf/6.pdf>>

MOLY-VEN. Hoja de datos de seguridad: Aceite hidráulico ISO 32, 46, 68. 100 [en línea]. Disponible en: <<http://www.italcol.com/inventarios/documentos/maw.pdf>>

NAVAS OLALLA, Jorge Roberto y SOLIS SOLIS, Sandra Guadalupe. Evaluación de defectos por corrosión en líneas de transporte de hidrocarburos. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Escuela de ingeniería, 2007, 157 p. Disponible en: <<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/478/1/CD-0849.pdf>>

OGUNNIYI, D.S. Castor Oil: A vital industrial raw material. Bioresource Technology. Mayo, 2005. no. 97, p. 1086-1091. Disponible en: <[https://www.researchgate.net/publication/7822982\\_Castor\\_oil\\_A\\_vital\\_industrial\\_raw\\_material](https://www.researchgate.net/publication/7822982_Castor_oil_A_vital_industrial_raw_material)>

PEMEX. Prueba Hidrostática a Tuberías y Accesorios [en línea]. (22, Noviembre, 2005: México). 21 p. Disponible en: <<http://www.pep.pemex.com/prebases/lists/licitaciones/attachments/389/dco-pgi-t-401.pdf>>

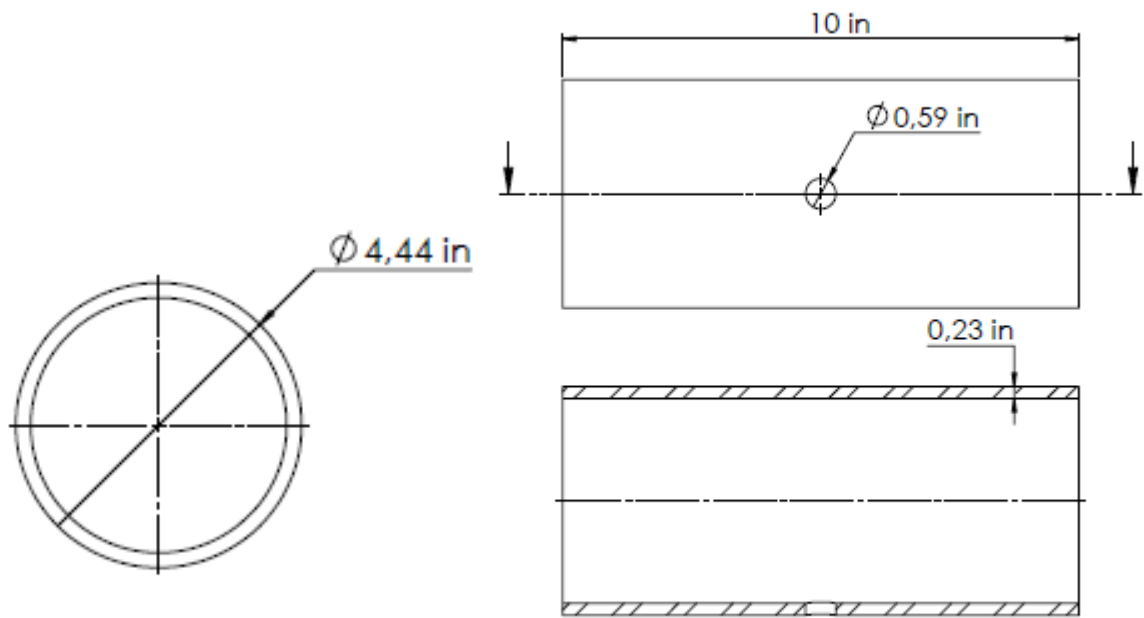
RINCÓN MARTÍNEZ, Édison Humberto. Algoritmo para el cálculo de impactos por fugas de líquidos y gas en tuberías de hidrocarburos. Trabajo de grado ingeniero metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales, 2011, 68 p. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/138992.pdf>>

UR-REHMAN, Fazal. Synthesis and Characterization of Speciality Polyurethane Elastomers. Tesis de doctorado en Química. Pakistan: University of Agriculture. Departament of Chemistry & Biochemistry, 2010, 147 p. Disponible en: <[http://www.pmahome.org/files/8714/1468/0979/Synthesis\\_and\\_Characterization.pdf](http://www.pmahome.org/files/8714/1468/0979/Synthesis_and_Characterization.pdf)>

VALERO, Manuel et al. Estudio de las propiedades mecánicas, térmicas, reológicas y morfología de óliuretanos a partir de aceite de higuera modificado por transesterificación. Revista Iberoamericana de Polímero. 2008. vol. 9, no. 2, p. 102-118. Disponible en: <<http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/MAR08/valero.pdf>>

YPF. Ficha técnica N°054: Hidráulico BP [en línea]. Disponible en: <<http://www.ypf.com/ProductosServicios/Documents/Hidraulico%20BP.pdf>>

# ANEXO A. PLANO TUBERÍA GRADO API 5L



## ANEXO B. PROTOCOLO DE SÍNTESIS DEL POLIURETANO

- **Pretratamiento de los reactivos:**

1. Inicialmente se elimina el agua presente en el aceite de ricino y el glicerol, utilizando un rotoevaporador. Las condiciones de trabajo de este se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 1. Condiciones de trabajo del rotoevaporador*

SUSTANCIA	T [°C]	P <sub>Vacío</sub> [mbar]	Rotación [rpm]	Tiempo [min]
Aceite de ricino	80	80	80	30
Glicerol				40

2. Se realiza un proceso de secado de los polioles utilizando el montaje experimental de la figura 1, a las siguientes condiciones:

*Tabla 2. Condiciones de secado de los polioles.*

Relación molar de polioles [CO:GP]	T [°C]	P <sub>Vacío</sub> [inHg]	Rotación [rpm]	Tiempo [min]
60:40	60	22	750	40
70:30				25

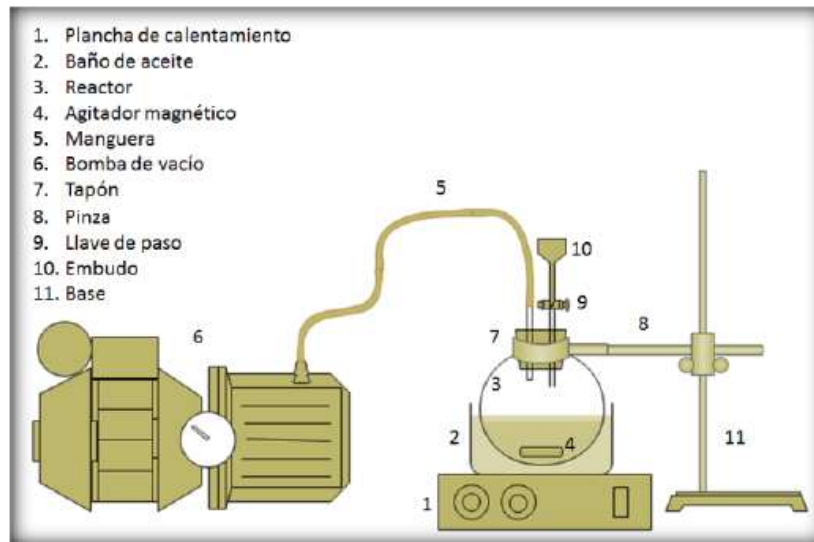
- **Reacción:**

3. Se adiciona la cantidad calculada de MDI al reactor utilizando el embudo y la llave de paso del montaje experimental (Figura 1), teniendo en cuenta la siguientes condiciones:

*Tabla 3. Condiciones de reacción*

T [°C]	P <sub>Vacío</sub> [inHg]	Rotación [rpm]	Tiempo [min]
60	22	1000	1:50

**Figura 1. Montaje experimental**



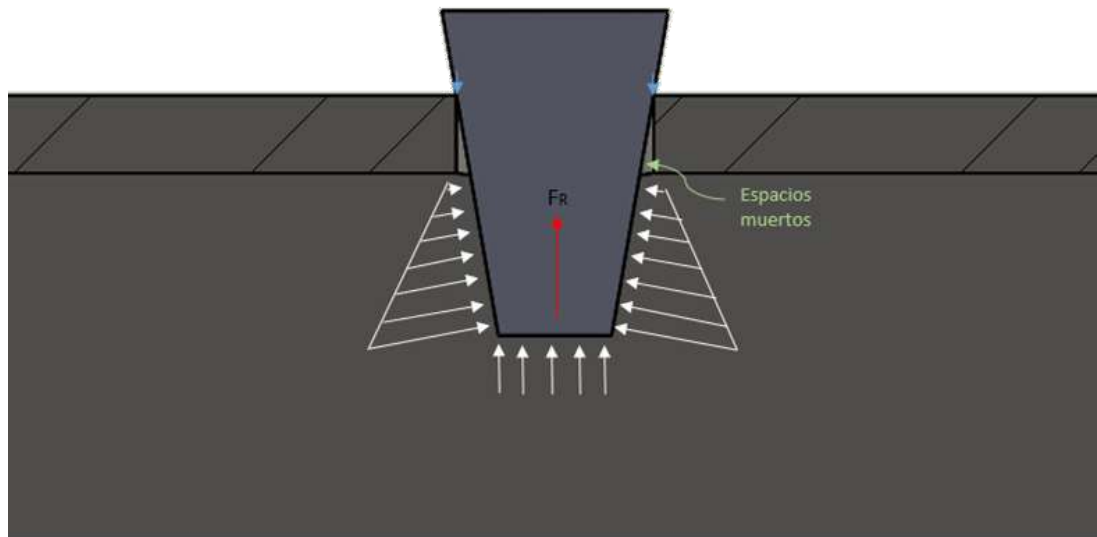
**Fuente:** DÍAZ ARCE, Édgar Fabián y MUÑOZ VEGA, Óscar Mauricio. Estudio de las variables de síntesis de poliuretano a partir de aceite de ricino y glicerol. Trabajo de grado ingeniero químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2014, 27 p. Disponible en: <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/152151.pdf>>

- **Vertimiento y Curado:**

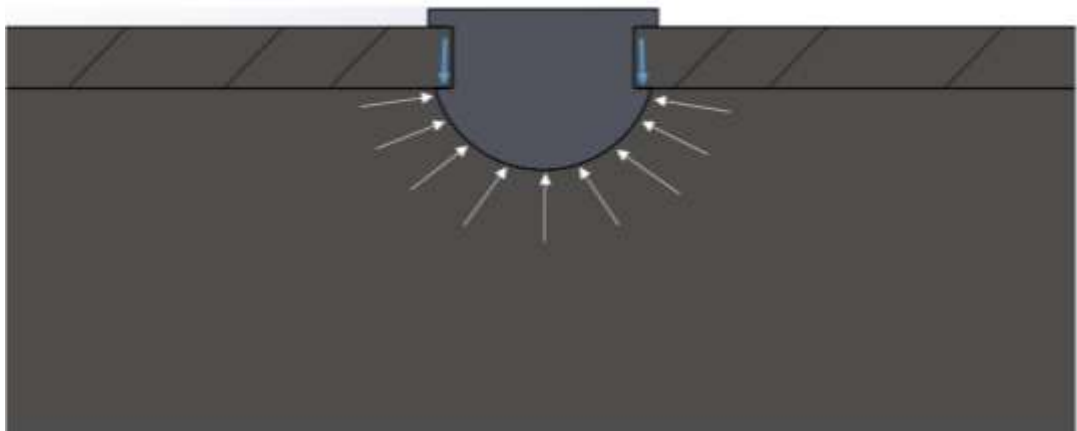
4. Antes de realizar el vertimiento del poliuretano, se deben calentar los moldes de silicona por un tiempo de 10 minutos a una temperatura de 100 °C.
5. El material se deja curando 3 días a una temperatura de 100 °C.

## ANEXO C. DIAGRAMA DE FUERZAS EJERCIDAS POR EL FLUIDO DE TRABAJO SOBRE EL TAPÓN EN EL INTERIOR DE LA TUBERÍA

- **Modelo Base**



- **Modelo Propuesto**



## ANEXO D. PRUEBA DE INSERCIÓN DE LOS TAPONES

1. Se calentó la superficie metálica hasta una temperatura de 90 °C, utilizando una cinta calefactora (Figura 1).
2. Se insertó completamente el tapón en la falla de diámetro de 0,59 in utilizando un martillo (Figura 2) y se observó si el material sufría daños en su integridad.
3. Se utilizó un calibrador para medir cada una de las partes del tapón (cabeza, tronco y base), con el fin de comparar las dimensiones antes y después de la inserción, y así cuantificar los daños en el material.

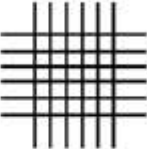
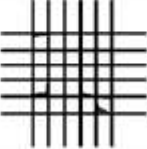


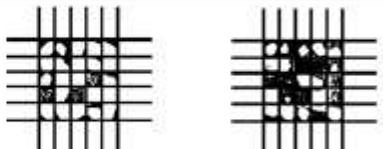
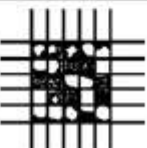
**Figura 1. Calentamiento de la superficie metálica.**



**Figura 2. Inserción del tapón en la falla**



## ANEXO E. CLASIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CORTE ENREJADO SEGÚN LA NORMA ASTM D3359-09

CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS		
CLASSIFICATION	PERCENT AREA REMOVED	SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGE BY PERCENT
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 – 15%	
2B	15 – 35%	
1B	35 – 65%	
0B	Greater than 65%	

**Fuente:** AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM D3359-09: Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test, 2010, 4 .p.