

**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**

**ARON ABEL GARCIA PAJARO
LEONARDO RAFAEL MACHADO MENDOZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE UN
POLIURETANO REFORZADO, PRODUCIDO A PARTIR DE ACEITE DE
RICINO, Y SU COMPETITIVIDAD TÉCNICA DE USO COMO MATERIAL DE
APLICABILIDAD INDUSTRIAL**

**ARON ABEL GARCÍA PAJARO
LEONARDO RAFAEL MACHADO MENDOZA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

**ALVARO RAMIREZ GARCIA
Ingeniero Químico PhD**

Codirector

**LUIS ENRIQUE FUENTES
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA.

Hoy que he culminado una etapa más en mi vida, quiero dedicar este triunfo a:

A Dios por darme una vida saludable y sabiduría para lograrlo.

A mi madre, Zorayda María, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional en todos los años de mi vida.

A mi padre, Dissan, que a pesar de la distancia, siempre me ha brindado su apoyo incondicional y una voz de aliento.

A mis hermanos, Alain y Gesman, por el amor y comprensión, espero tenerlos siempre.

A mis amigos, por su alegría y compañerismo que me brindaron en los buenos y malos

Momentos.

LEONARDO MACHADO MENDOZA

DEDICATORIA.

*Hoy que he terminado esta etapa de mi vida, quiero dedicar este logro
a:*

A Dios por darme la paciencia, salud y sabiduría para lograrlo.

*A mi padre, Eduardo, por su paciencia, sacrificio y apoyo en cada uno
de los días de este proceso y durante toda mi vida.*

*A mi madre, Genelia, porque siempre tenía las palabras apropiadas
para motivarme a seguir adelante, por su amor y apoyo incondicional.*

A mis hermanos, Natanael y Daniel, por su apoyo y comprensión.

*A mis amigos, porque gracias a ellos fue más fácil este proceso, por
siempre brindarme su compañerismo y ayuda en los buenos y malos
momentos*

Momentos.

Aron Abel García Pájaro

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

El profesor Luis Fuentes por su dirección, orientación y paciencia que hicieron posible la realización de este proyecto.

El ingeniero Reinaldo Villalba por su orientación y valioso aporte para la realización de este trabajo.

Los profesores Álvaro Ramírez y Gustavo Ramírez por sus apreciaciones y consejos para la realización de este proyecto.

La aspirante a magister Carolina Ardila y al grupo de investigación en polímeros de la escuela de ingeniería química de la universidad industrial de Santander, por su compañerismo y apoyo.

La escuela de ingeniería química de la universidad industrial de Santander y la universidad misma por su excelente formación y calidad académica que nos brindo

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 Objetivo general	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. MARCO TEÓRICO	19
3. METODOLOGÍA	26
3.1 SÍNTESIS DEL POLIURETANO CON/SIN REFUERZO	27
3.1.1 Selección y caracterización de reactivos	27
3.1.2 Pruebas preliminares	27
3.1.3 Selección de relaciones NCO/OH y aceite/refuerzo	28
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIURETANO CON/SIN REFUERZO	28
3.2.1 Caracterización físico-química	29
3.2.2 Caracterización físico-mecánica	29
3.2.3 Caracterización térmica	30
3.3 VIABILIDAD TÉCNICA	30
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.	31
4.1 SÍNTESIS DEL POLIURETANO CON/SIN REFUERZO	31
4.1.1 Pruebas preliminares	31
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIURETANO CON/SIN REFUERZO	32
4.2.1 Caracterización Fisicoquímica	32
4.2.2 Caracterización físico-mecánica	36
4.2.3 Caracterización Térmica	39
4.3 viabilidad técnica	42
5. CONCLUSIONES	44
6. RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Matriz de experimental	28
Tabla 2. Resultados Cualitativos de la prueba química.	32
Tabla 3. Estudio técnico	43

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Reacción de polimerización entre un grupo hidroxilo y un grupo isocianato para formar un grupo uretano	20
Figura 2. Estructura química del ácido ricinoleico.	22
Figura 3. Metodología Experimental	26
Figura 4. Muestras del material con una proporción NCO/OH = 1	31
Figura 5. Porcentaje de hinchamiento del material luego de la inmersión	33
Figura 6. Efecto de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno en absorción de agua, después de 24 horas (a) y 7 días (b)	34
Figura 7. Efecto de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno en la densidad.	35
Figura 8. Efecto de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno en la resistencia a la tensión	36
Figura 9. Fotografías de fallas de las muestras PU1K09FV14 Y PU1K09FV23.	37
Figura 10. Ensayo de compresión, porcentaje de relleno vs resistencia a la compresión	38
Figura 11. Efecto de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno en la dureza.	39
Figura 12. Efecto de la temperatura sobre la dureza del material	40
Figura 13. Efecto de la temperatura sobre la resistencia a la tensión a diferentes temperaturas.	41

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Propiedades físico-químicas de reactivos	50
Anexo B. Granulometría de la fibra de vidrio	51
Anexo C. Cálculo de las proporciones molares de polioliol y disocianato	52
Anexo D. Procedimiento de síntesis del poliuretano reforzado	53
Anexo E. Protocolos Ensayos de caracterización	57
Anexo F. Resultados prueba de absorción de agua.	60
Anexo G. Resultados prueba de densidad	65
Anexo H. Resultados prueba de dureza.	67
Anexo I. Resultados prueba química	69
Anexo J. Gráficas Esfuerzo- deformación del ensayo de tensión para elastómero de poliuretano	73
Anexo K. Gráficas Esfuerzo- deformación del ensayo de compresión para elastómero de poliuretano	76
Anexo L. Resultados de la prueba térmica.	79

RESUMEN

TITULO: 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*

AUTORES: Leonardo Rafael Machado Mendoza, Aron Abel García Pájaro **

PALABRAS CLAVE: ACEITE DE RICINO, COMPOSITE, ISOCIANATO, CARACTERIZACION.

DESCRIPCIÓN:

En este proyecto se sintetizó un poliuretano producido a partir de aceite de ricino sin modificar por y metil difenil isocianato usando proporciones molares de 0,8 y 0,9. estos poliuretanos se reforzaron con viruta de material epóxico reforzado con fibra de vidrio, en unas proporciones en peso de refuerzo y matriz de 14 y 23%, variando estas cantidades se obtuvo una matriz de materiales para su posterior caracterización, también se incluyó los poliuretanos sin refuerzo para ver el efectos que el material particulado causa sobre las propiedades del material, posteriormente se realizó una caracterización físico-química, físico-mecánica y térmica, la caracterización físico-química incluyo las pruebas de absorción de agua, resistencia química densidad. La caracterización físico-mecánica incluyo los ensayos de tensión, dureza y compresión. Para la caracterización térmica se realizó un ensayo modificado para determinar la temperatura máxima que soporta el material sin que disminuyan sus propiedades mecánicas, para esto se sometieron cupones del material a diferentes temperaturas y se le realizaron ensayos de dureza y tensión, buscando la temperatura hasta la que estas propiedades no disminuyen, luego se realizó una evaluación técnica donde se comparó los poliuretanos obtenidos con materiales de uso industrial, para evaluar que tan competitivo es el material en la industria y elegir posibles aplicaciones.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director Prof. Álvaro Ramírez García; Codirector Prof. Luis Enrique Fuentes Pulido.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF PHYSICAL-MECHANICAL BEHAVIOR OF A REINFORCED POLYURETHANE, PRODUCED FROM CASTOR OIL, AND ITS TECHNICAL COMPETITIVENESS AS MATERIAL OF INDUSTRIAL APPLICABILITY *

AUTORES: Leonardo Rafael Machado Mendoza, Aron Abel García Pájaro **

PALABRAS CLAVE: CASTOR OIL, COMPOSITE, ISOCYANATE, CHARACTERIZATION.

DESCRIPTION:

In this project aims to produce and characterize a composite type material that combines the properties obtained after insertion of glass fiber fillers in the matrix of the polyurethane obtained from the reaction of castor oil and unmodified methylene diphenyl diisocyanate (MDI) commercial grade by using mole ratios of 0.8 and 0.9. These polyurethanes were reinforced epoxy chip reinforced fiberglass, in proportions by weight of reinforcement and matrix of 14 and 23%, varying these amounts was obtained matrix materials for further characterization also included polyurethanes without reinforcement to see the effects of particulate material causing in the material properties, later was made a physical-chemical, physic-mechanical and thermal, physical and chemical characterization tests include water absorption, chemical resistance, density. Physic-mechanical characterization include tensile testing, hardness and compression. For thermal characterization modified assay was performed to determine the maximum temperature that the material support without impairing their mechanical properties for this material coupons were subjected to different temperatures (100°C, 120°C and 150°C) and were performed testing the hardness and tension seeking to temperature that these properties do not decrease, then conducted a technical evaluation which compared the polyurethanes obtained with industrial materials, to evaluate how competitive the industry material and choose possible applications.

* Work Degree

** Physical Chemistry Engineering Faculty, Chemical Engineering School. Director Prof. Álvaro Ramírez García; Co-director Prof. Luis Fuentes Pulido

INTRODUCCIÓN

La obtención de polímeros a partir de fuentes naturales o renovables se ha convertido en una alternativa viable para aliviar el impacto sobre el medio ambiente y disminuir la notoria dependencia de materiales producidos a partir de materia prima petroquímica. Hoy día, se ha encontrado que los aceites naturales tales como los de linaza, girasol, ricino, soya, y de palma, entre otros son una opción viable para la producción de biopolímeros con características competitivas con los materiales producidos a partir del petróleo [9, 32], adicionalmente, estos materiales presentan propiedades biodegradables y en muchos casos son más económicos a la hora de sintetizarlos.

El poliuretano es uno de los biopolímeros más utilizados en la industria, dados sus diversas aplicaciones tecnológicas en forma de espumas, elastómeras, adhesivos y recubrimientos [36, 16]. Este tipo de materiales se caracteriza por tener el grupo de uretano en sus cadenas y es producto de la reacción de un grupo hidroxilo y un grupo de isocianato.

Como fuente renovable de grupos hidroxilos para la producción de poliuretanos se utiliza el aceite de ricino. Los grupos hidroxilo localizados en las distintas cadenas de la molécula hacen del aceite de ricino un monómero polifuncional para la obtención de poliuretanos entrecruzados en presencia de isocianatos. Sin embargo, en relación a la complejidad de la molécula, el número de hidroxilos es relativamente bajo, por consiguiente, las redes de poliuretano tendrán un relativo bajo grado de entrecruzamiento, obteniéndose materiales con bajo módulo de resistencia mecánica y baja energía de ruptura [31, 26].

En virtud a lo anterior, hoy en día el Grupo de Investigaciones en Polímeros de la Universidad Industrial de Santander ha desarrollado extensas investigaciones de

aprovechamiento del aceite de ricino para producir materiales de diferentes morfologías y propiedades mecánicas. Se ha modificado el grado de hidroxilación del aceite de ricino por varias vías: transesterificación con pentaeritritol, almidón de yuca, almidón de yuca glucoxilado y glicerina [18-34]. Al aumentar el número de grupos hidroxilos se forma un poliol que puede formar redes de poliuretano más entrecruzadas y por consiguiente de diferentes morfologías y propiedades mecánicas.

Otra alternativa ampliamente utilizada en la industria para mejorar las propiedades de los materiales, es la utilización de materiales compuestos, es decir, la unión de dos materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales [2-21]. Sin embargo, poca atención ha recibido este tipo de modificación para la obtención de poliuretanos compuestos. Estos composite nacen de la necesidad de obtener poliuretanos que combinen las propiedades ofrecidas por otros materiales (fibra de vidrio, fibra de carbón, fibras aramidadas, fibras naturales, etc.) con diferentes propiedades mecánicas.

En el presente trabajo se busca producir y caracterizar un material de tipo compuesto que combine las propiedades obtenidas después de la inserción de rellenos de fibra de vidrio dentro de la matriz del poliuretano obtenido a partir de la reacción aceite de ricino sin ninguna modificación y metil difenil diisocianato (MDI) de grado comercial.

Para tal fin, se desarrolló un diseño experimental que considerara la influencia de la relación NCO/OH y de las proporciones de mezcla con el material de refuerzo sobre la propiedades finales del composite obtenido. Adicionalmente, se analizó la posible competitividad del material final obtenido por medio de la comparación de sus propiedades con materiales de normal aplicación en la industria, con el fin de identificar eventuales oportunidades de aplicación.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Sintetizar y caracterizar poliuretanos reforzados producidos a partir de aceite de ricino, metil difenil diisocianato (MDI grado comercial) y fibra de vidrio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sintetizar elastómeros de poliuretano reforzado producidos a partir de aceite de ricino.
- Evaluar los elastómeros de poliuretanos reforzados producidos a partir de aceite de ricino.
- Confrontar las propiedades Físico-mecánicas de los poliuretanos obtenidos con materiales similares de uso industrial.

2. MARCO TEÓRICO

En los últimos años se ha tratado de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles como materia prima para obtención de polímeros, debido al incremento de costos, el daño al ambiente que la síntesis de estos ocasiona y a la escases de materias primas fósiles que se han presentado en las últimas décadas, por esto se han estudiado otras fuentes renovables para la síntesis de polímeros y así contribuir al desarrollo sustentable en un futuro [7].

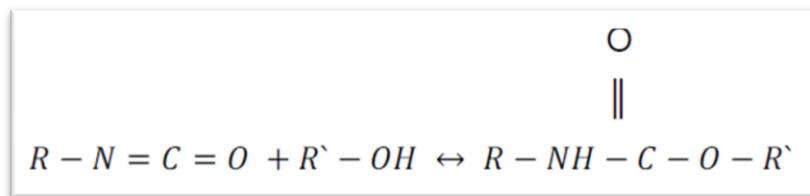
Utilizar materias primas renovables puede contribuir significativamente a un desarrollo sostenible, esto se interpreta como “actuar de manera responsable para satisfacer las necesidades del presente sin perjudicar la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” [22]. Con respecto a los problemas de eliminación de residuos, así como al agotamiento de los oleoquímicos no biodegradables, se han desarrollado y comercializado biopolímeros que tienen como base ácido poliláctico, plásticos de celulosa, almidón termoplástico y Aceites vegetales [24]. Entre ellos, ha habido una creciente tendencia en la utilización como materia prima los aceites vegetales debido a sus ventajas, aplicaciones, bajo costo, biodegradabilidad y disponibilidad.

La versatilidad de los aceites vegetales se debe a que están compuestos por mezclas de ácidos grasos y ésteres de glicerol, lo que ha permitido aprovechar los aceites provenientes de la semilla de linaza, de ricino, de soya y de cártamo, entre otros [17], para la obtención de polímeros como poliuretano, poliamidas, resinas epoxicas entre otros, lo que hace a estos aceites un campo atractivo para ser investigado a fondo y buscar soluciones para cubrir los requerimientos de abastecimiento de polímeros y, a su vez, proteger el medio ambiente.

Además de la polimerización directa de aceites vegetales se han desarrollado varios métodos para la copolimerización de triglicéridos y ácidos grasos. Algunos ejemplos son resinas de poliéster, resinas alquídicas, poliuretanos, poliamidas, resinas epoxicas, y copolímeros de vinilo. Siendo el poliuretano de gran interés en la industria debido a su amplia gama de aplicaciones, como: espumas, elastómeros, pinturas, adhesivos recubrimientos entre otros.

Los poliuretanos son resinas sintéticas que se caracterizan por su escasa permeabilidad a los gases, alta resistencia química y excelente aislamiento térmico [27]; se obtienen por polimerización entre determinados compuestos que contienen el grupo isocianato $N=C=O$ y compuestos que tengan el grupo hidroxilo $OH-R$. La obtención de poliuretanos se basa en la gran reactividad del enlace doble del grupo isocianato que se adiciona fácilmente a compuestos con hidrógenos activos en reacciones de condensación como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Reacción de polimerización entre un grupo hidroxilo y un grupo isocianato para formar un grupo uretano



Fuente: Autores

Por lo general las propiedades asociadas a los poliuretanos dependen tanto del método de polimerización como de las características de los reactivos involucrados, encontrándose así materiales que van desde las formas duras y aptas para recubrimientos resistentes a los disolventes hasta cauchos sintéticos resistentes a la abrasión y espumas flexibles [29].

Dentro de la amplia gama de aplicaciones de estos materiales, son los elastómeros de poliuretano los que han tenido un amplio impacto en el mercado debido a que presentan comportamientos únicos, son elásticos y termoestables, se pueden encontrar en una gama de dureza incluso mayor que la de otros elastómeros, presentan propiedades únicas como resistencia a la abrasión (superior al acero) y elevada resistencia a hidrocarburos aromáticos; además, tienen una resistencia a la ruptura superior a la mayoría del resto de elastómeros, razón por la cual son utilizados en la elaboración de neumáticos, bandas transportadoras, sellos de válvulas, defensas de autos, maquinaria agrícola y muchas otras aplicaciones.

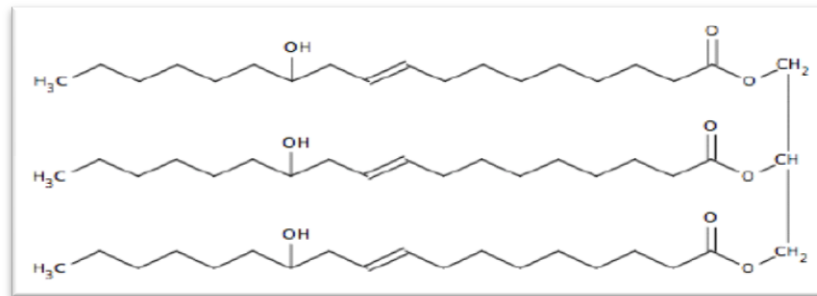
Inicialmente en la producción de poliuretanos eran utilizados como fuente de grupos hidroxilos polialcoholes derivados del petróleo como: poliéster, polieter, polietilenglicol y polialcoholes vinílicos, y diisocianatos comerciales como el TDI (diisocinato de tolueno) [10]. Pero como se mencionó anteriormente los aceites vegetales aparecen como una forma ecológica de producción de poliuretanos, disminuyendo así la dependencia de los derivados del petróleo para la síntesis de estos materiales.

El aceite de ricino ha sido una excelente opción como materia prima para la síntesis de poliuretanos ya sea en forma de espuma o como elastómeros, ya que es un aceite natural disponible comercialmente y de bajo costo, y dada su alta pureza no necesita tratamiento químico previo para su uso como polioli. Debido a las largas cadenas del ácido graso, el aceite de ricino imparte características no polares a poliuretanos que se ve reflejado en las propiedades resultantes de este, particularmente en la buena resistencia al agua y la flexibilidad.

El aceite de ricino es un triglicérido vegetal que se extrae de la semilla de la planta "*Ricinus communis*" que se puede encontrar en muchas áreas tropicales y subtropicales de Colombia [4]. El aceite de ricino es uno de los pocos glicéridos

naturales casi puros, ya que el 90% aproximadamente corresponde al ácido ricinoleico (ricinoleína) el cual contiene un doble enlace en los carbonos 9, 10 y un grupo hidroxilo en el carbono 7 (ver figura 2), el ácido ricinoleico se encuentra presente en el aceite en un porcentaje del 70% en forma de triglicérido y el restante en forma de diglicéridos y monoglicéridos. El 10% restante incluye los ácidos grasos no hidroxilados como el linoleico, oleico, esteárico, linolenico, palmítico y Dihidroxiestearico.

Figura 2. Estructura química del ácido ricinoleico.



Fuente: Autores

Debido a su composición química, el aceite de ricino conserva su viscosidad a altas temperaturas y resiste muy bajas sin congelarse, razón por la cual se emplea para motores de altas revoluciones, se usa en cosméticos, en productos medicinales y sirve de base para la preparación de líquidos para frenos y pinturas. La gran propiedad química del aceite de ricino, es que tiene tres grupos hidroxilos, lo cual permite que sea un compuesto de fácil transformación. Su estructura trihidroxílica permite la producción de sistemas de uretano entrecruzados [35].

Pero los poliuretanos obtenidos a partir de aceite de ricino presentan propiedades como bajo módulo de Young, baja resistencia a la ruptura y baja resistencia a tratamientos con alta temperatura. Estas propiedades son atribuidas principalmente al bajo número de grupos hidroxilos en relación a la complejidad de la molécula, esto origina poliuretanos con bajo grado de entrecruzamiento como

resultado de la poca presencia de grupos uretanos, y a que las largas cadenas de ácidos grasos presentes en el aceite interfieren con la reacción de los grupos funcionales originando poliuretanos de estructura irregular [10].

Se han usado diferentes técnicas buscando mejorar estas propiedades, [15-33]; la más empleada consiste en aumentar la funcionalidad del aceite usando alcoholes poli hidroxílicos como agentes modificantes los cuales rompen las cadenas de triglicéridos formando di y mono glicéridos con mayor presencia de grupos funcionales a partir de los cuales se han logrado obtener poliuretanos con propiedades mecánicas superiores a las presentadas con el aceite de ricino natural [6-11].

Otra forma de mejorar las propiedades del poliuretano a partir de aceite de ricino es usarlo como matriz para formar materiales compuestos, Se define como material compuesto a todo material combinado a partir de una unión no química de dos o más componentes, que da lugar a propiedades específicas que no tienen los componentes por si solos, estos componentes no pueden disolverse ni fusionarse unos con otros [23]. La característica de los materiales compuestos, que los hace ser los materiales más atractivos, es su capacidad de proporcionar resistencia y rigidez incrementadas en pesos más pequeños que los necesarios en los materiales convencionales. La reducción de su peso permite mejoras significativas en aplicaciones militares, civiles, aeronáuticas, automovilísticas y de construcción.

Los materiales compuestos pueden clasificarse según el tipo de su matriz, siendo las matrices más comunes las matrices metálicas, cerámicas y poliméricas. El refuerzo puede ser agregado de diversas formas: fibras, partículas y láminas. Las propiedades del material compuesto dependen de la forma del refuerzo, la proporción refuerzo-matriz, la orientación del refuerzo dentro de la matriz y de las características de los componentes. Entre los refuerzos más usados están la fibra

de vidrio, fibra de carbono y fibras aramidicas o kevlar [5] siendo la fibra de vidrio la más usada por su relativo bajo costo.

En algunos estudios se han reforzados el elastómeros de poliuretano con fibra de vidrio en polvo [13, 14], donde se demuestra que la función de los refuerzos participados es aumentar la dureza y rellenar los espacios vacíos dentro del material haciendo un material más compacto y con mejores propiedades mecánicas, uno de los objetivos de este trabajo es producir un material compuesto con una matriz de poliuretano a partir de aceite de ricino y como refuerzo partículas de fibra de vidrio; posteriormente el polímero obtenido será caracterizado para poder suponer posibles usos y aplicaciones en la industria.

La caracterización de las propiedades de los elastómeros esta, en su mayoría, sujeta a normas nacionales e internacionales una de las principales normas son la *ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials)*. Para conocer el comportamiento mecánico de los materiales se realizan habitualmente ensayos de tensión, compresión o flexión, donde se evalúa la resistencia del plástico a ser deformado y la magnitud de esa deformación en el punto donde se rompe el material, si es el caso, y en el punto donde cambia su comportamiento, pasando de un comportamiento elástico a plástico. También obtenemos información de su módulo de elasticidad, el cual indica si el material es rígido o flexible. Otra característica, como la dureza del material se puede determinar mediante un durómetro (dureza Shore) o el método *Rockwell* (penetración de una bola). El comportamiento mecánico de los polímeros reforzados, es diferente según la cantidad y tipo de refuerzo que contengan.

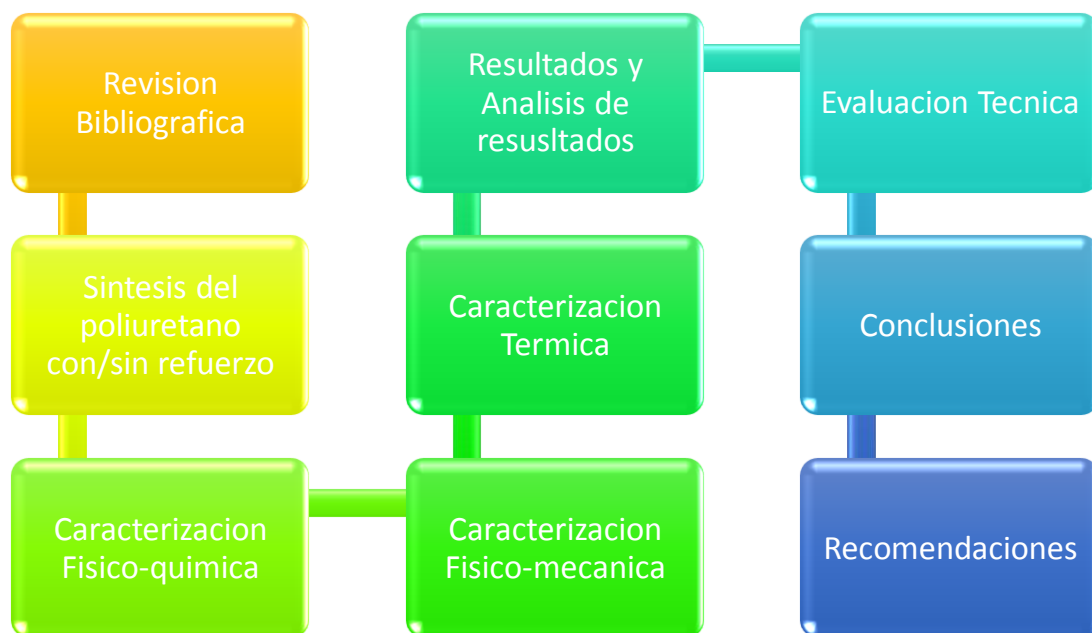
Dada la gran sensibilidad que presentan los polímeros frente a la temperatura, la caracterización térmica es tan importante como la mecánica. Las técnicas de termoanálisis proporcionan gran cantidad de información sobre la estructura y composición del polímero, así como la temperatura máxima de trabajo del

material. También se tiene en cuenta la resistencia química que tiene el polímero a diferentes reactivos como ácidos, bases y sales, con esto se determina en que medios el material puede funcionar eficientemente.

3. METODOLOGÍA

En la figura 3 se muestra un diagrama secuencial del trabajo experimental que soporta este proyecto, desde la preparación del material polimérico hasta su caracterización y evaluación.

Figura 3. Metodología Experimental



Fuente: Autores.

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las etapas de la batería experimental mostrada en la figura 3. Una descripción más completa de las pruebas experimentales se puede consultar en los anexos.

Revisión bibliográfica. En esta etapa se consultó información de poliuretanos reforzados, haciendo énfasis en los poliuretanos producidos a partir de aceite de ricino, también se consultó los métodos de caracterización de materiales no metálicos, centrándose en las normas ASTM (*American Society for Testing and*

Materials), por último se consultó información disponible acerca de las características y comportamientos que presentan elastómeros con aplicación industrial.

3.1 SÍNTESIS DEL POLIURETANO CON/SIN REFUERZO

El material de poliuretano se obtuvo por la reacción del aceite de ricino y el metil difenil isocianato (MDI). Para obtener el poliuretano se vertió poliol en un vaso de vidrio de 250 mL y a este se le adiciono el MDI. Para permitir el mezclado se utilizó un agitador mecánico a 350 rpm durante 1 minuto. Una vez se alcanzó una mezcla homogénea se procedió a realizar vacío para retirar el aire presente luego se vertió la mezcla en un molde de 150x150x3 mm de profundidad. El periodo de curado consto de dos etapas la primera a temperatura ambiente (25 °C) y la segunda a 90 °C, ambas durante 24 horas.

3.1.1 Selección y caracterización de reactivos. Para la síntesis se utilizaron los siguientes reactivos: Aceite de ricino grado USP (AR, numero hidroxilo 160 mg KOH/g, suministrado por Laboratorios León S. A., Colombia.), metil difenil isocianato MDI (Rubinate® 5005/suprasec® 5005: Distribuido por laboratorios HUNSTMAN. Cartagena. Funcionalidad aprox. 2.7, contenido NCO (%) 30.2-31.5) y fibra de vidrio en polvo residuo que queda del proceso de fabricación de sellos hidráulicos en la empresa DIACOR S.A. (ver anexos A y B).

3.1.2 Pruebas preliminares. Pruebas experimentales iniciales permitieron seleccionar las condiciones ideales de proporciones molares NCO/OH y cantidad de relleno para la realización de un diseño experimental que permitiera la evaluación de la influencia de estas variables en las propiedades finales del composite obtenido, se probaron relaciones NCO/OH entre 0,7 y 1,0. El criterio para la selección de estas condiciones de síntesis fue la homogenización de las partículas de fibra de vidrio y la aparición de burbujas en la matriz del composite

resultante, condición no deseada por la presencia de irregularidades que propiciaba la formación puntos concentradores de esfuerzos.

3.1.3 Selección de relaciones NCO/OH y aceite/refuerzo. Después de realizadas las pruebas preliminares, se escogieron las siguientes relaciones molares NCO/OH: 0,8 y 0,9, esta relación lo que quiere decir que en estos materiales quedan grupos OH sin reaccionar, por ejemplo una proporción de 0,9 quiere decir que el 10% de los grupos OH no reaccionaron, y estos grupos OH libres y pueden interactuar con el refuerzo o algunos solventes, explicando algunos comportamientos del material. Estas relaciones fueron reforzadas con viruta de material compuesto epóxico reforzado con tejido de vidrio NEMA G11, en cantidades de 14% y 23% en peso, con lo cual se construyó la siguiente matriz experimental para su posterior ensayo.

Tabla 1. Matriz de experimental

Nombre	Grado entrecruzamiento*	Relación NCO/OH	Porcentaje Fibra de vidrio
PU1K08FV0	1K	0.8	0
PU1K08FV14	1K	0.8	14
PU1K08FV23	1K	0.8	23
PU1K09FV0	1K	0.9	0
PU1K09FV14	1K	0.9	14
PU1K09FV23	1K	0.9	23

* El término 1K hace referencia al grado de modificación en el índice de hidroxilo del polioli, siendo el 1K el polioli no modificado. Esto se usó para que haya trazabilidad con trabajos anteriores y posteriores en el grupo de investigación.

Fuente: Autores

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIURETANO CON/SIN REFUERZO

Para la caracterización del poliuretano reforzado y sin refuerzo se realizaron pruebas mecánicas, químicas y térmicas. Siguiendo los protocolos del anexo E.

3.2.1 Caracterización físico-química

- **Ensayo de hinchamiento y ataque químico.** Este ensayo se ajustó a la Norma ASTM D543-87 y se realizó con la finalidad de evaluar los efectos que Causan algunos solventes químicos al estar en contacto con el material. Los resultados de la prueba se muestran en el anexo I.
- **Ensayo de absorción de agua.** Este ensayo se ajustó a la norma ASTM D570-98; consistió en establecer qué tan permeable al agua es el material, teniendo en cuenta que el contenido de humedad de un plástico está íntimamente relacionado con propiedades tales como resistencias al aislamiento eléctrico, pérdidas dieléctricas, esfuerzos mecánicos, aspecto y dimensiones.
- **Ensayo de densidad.** Esta prueba se realizó con base al principio de Arquímedes, el cual consiste en medir un volumen conocido de un líquido con densidad conocida, para este caso se usó agua destilada, luego se sumerge el sólido de masa también conocida, y se observa la variación del volumen.

3.2.2 Caracterización físico-mecánica

- **Ensayo de Tensión.** Realizado acorde con los lineamientos de la norma ASTM D638 mediante el uso de una máquina Universal de ensayos modelo WEW20E, ubicada en las Unidades Tecnológicas de Santander. La velocidad de deformación utilizada en el ensayo fue de 25 mm/min y una carga aplicada de 400 N.
- **Ensayo de Compresión.** Ajustado según la norma ASTM D695 usando una máquina Universal de ensayos modelo WEW20E, ubicada en las Unidades Tecnológicas de Santander. El ensayo se realizó a una velocidad de 2 mm/min y fue aplicada una carga 400 N para elastómeros elaborada a partir de aceite de ricino.

- **Ensayo de dureza.** Este ensayo se llevó a cabo conforme a la norma ASTM D758; se realizó con la finalidad de determinar su capacidad a ser penetrado O rayado. La prueba de dureza se realizó sobre un cupón del material, midiendo la dureza del material con un durómetro shore A. en 3 zonas diferentes en la superficie del material y se tomó la dureza del material como el promedio de las 3 mediciones

3.2.3 Caracterización térmica

- **Ensayo de resistencia térmica.** Este ensayo no normalizado se realizó con el fin de encontrar la temperatura máxima de operación a la cual el material no presentara disminución respecto al valor de dureza y resistencia a la tensión medida a temperatura ambiente (25°C).

Para esto se diseñó una prueba donde se sometieron cupones a 3 temperaturas diferentes (100 °C, 120 °C y 150 °C), estas temperaturas se escogieron según las temperaturas a las que trabajan algunos polímeros comerciales, y luego se evaluaron sus propiedades mecánicas en este caso la dureza y la tensión.

3.3 VIABILIDAD TÉCNICA

Con la finalidad de definir criterios de viabilidad técnica del material objeto del presente trabajo, se realizó una comparación de las propiedades de los materiales obtenidos en el presente trabajo, con materiales comerciales de tipo elastómero comúnmente utilizados en la industria de los polímeros y cuyas propiedades son reportadas en bases de datos de fabricantes como MATWEB y BOECKER.

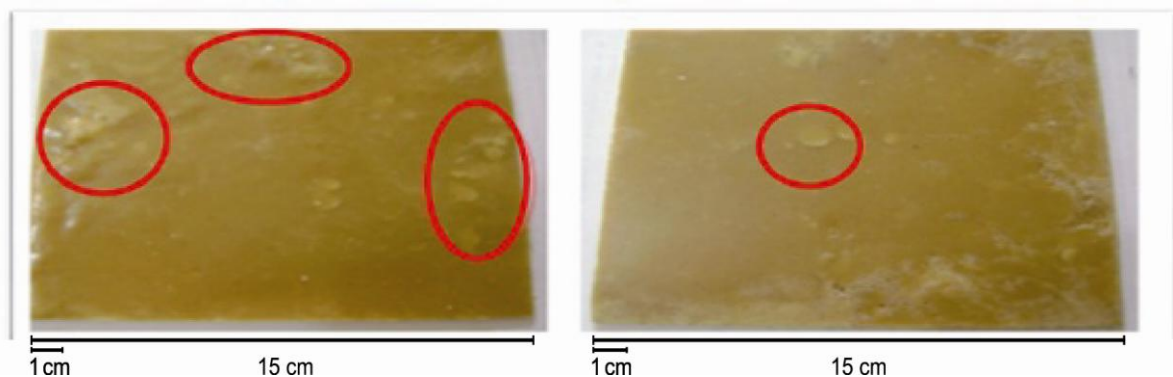
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.

4.1 SÍNTESIS DEL POLIURETANO CON/SIN REFUERZO

Se logró obtener elastómeros de poliuretano siguiendo el procedimiento del anexo D. con relaciones NCO/OH de 0.8 y 0.9 en proporción molar y cantidades de relleno de 14 y 23% en peso de refuerzo/poliuretano.

4.1.1 Pruebas preliminares. Se optó por un refuerzo particulado ya que en este la aparición de burbujas era mucho menor y era más fácil de producir que los refuerzos tipo tejido y la unión entre la matriz polimérica y este es mucho mejor. La proporción molar NCO/OH = 1 no fue escogida, ya que en esta proporción la fibra de vidrio no se esparcía uniformemente por la matriz, acumulándose en ciertos sectores e igualmente presentó gran cantidad de burbujas (ver figura 4). Esto se debe a que con una relación NCO/OH de 1 el poliuretano es más entrecruzado y no tiene suficientes espacios vacíos donde se puedan ubicar las partículas del relleno, por esta razón el relleno se acumula y no se homogeniza con el polímero.

Figura 4. Muestras del material con una proporción NCO/OH = 1



Fuente: Autores

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIURETANO CON/SIN REFUERZO

4.2.1 Caracterización Fisicoquímica

- **Ensayo de hinchamiento y ataque químico.** En esta tabla 2, se describe el comportamiento del material a la exposición en cada uno de los agentes químicos, definiendo como M un comportamiento deficiente del material o de uso no recomendado, y como B un buen comportamiento o de uso recomendado. El criterio utilizado para la evaluación del desempeño, se basó en los resultados de los ensayos de inspección visual, grado hinchamiento y evidencia de disolución en el medio. (Ver anexo E.)

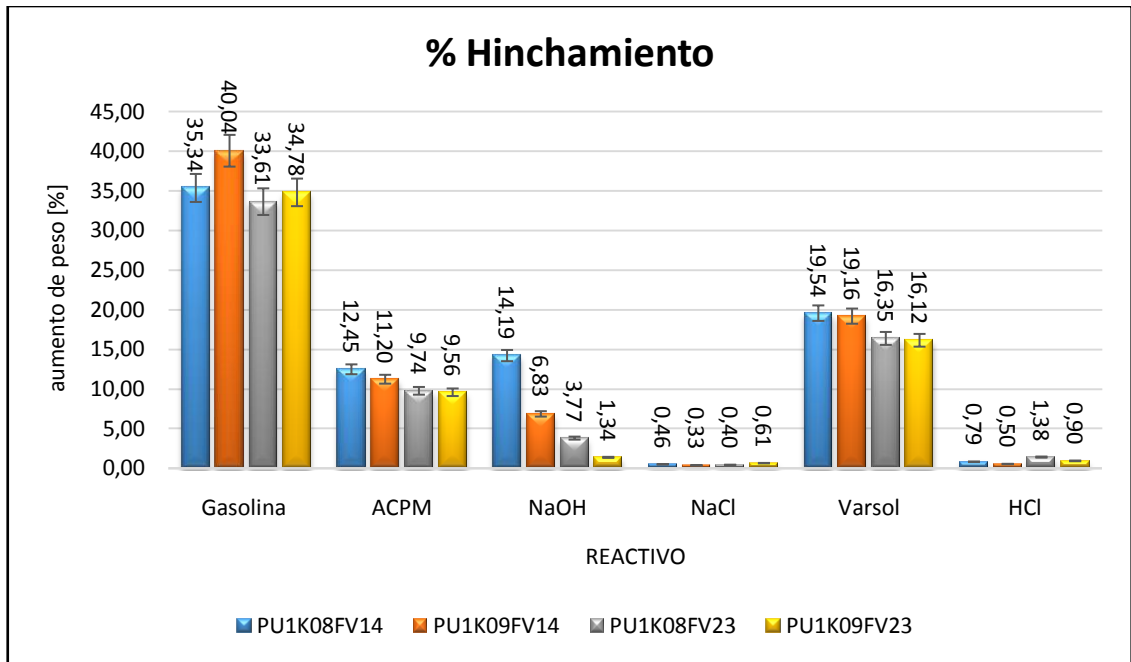
Tabla 2. Resultados Cualitativos de la prueba química.

Material	Gasolina	ACPM	NaOH	NaCl	Varsol	HCl
PU1K08FV14	M	M	M	B	M	B
PU1K09FV14	M	M	M	B	M	B
PU1K08FV23	M	M	M	B	M	B
PU1K09FV23	M	M	M	B	M	B

Fuente: Autores

La prueba química muestra que los materiales estudiados son resistentes las soluciones acidas y a las soluciones salinas, ya que presentan ausencia de defectos superficiales, bajo grado de hinchamiento y nula evidencia de disolución en estas sustancias. Los materiales presentan daños en su integridad física, al ser expuestos a Varsol, ACPM, Gasolina y Soluciones Básicas. También presenta un alto grado de hinchamiento para todos los reactivos orgánicos y muestra evidencias que se disuelve en la Gasolina.

Figura 5. Porcentaje de hinchamiento del material luego de la inmersión

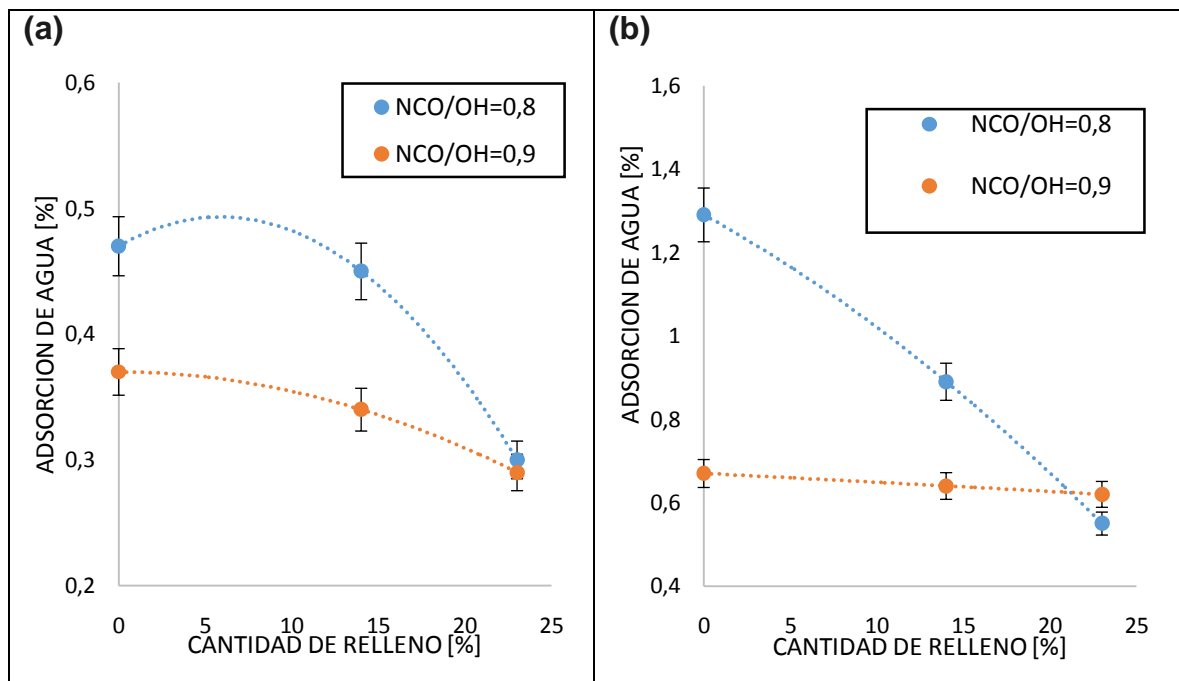


Fuente: Autores

Los resultados de la prueba química muestran que los materiales pueden ser expuestos bajo inmersión en medios inorgánicos como los ácidos y las sales, pero no exhiben un buen desempeño en presencia de soluciones básicas, ya que presentaron grietas y daños superficiales al ser sumergidos en estos medios, situación similar a la exhibida bajo inmersión en hidrocarburos. Los poliuretanos presentan un alto grado de hinchamiento a los hidrocarburos debido a que tienen cadenas de carbonadas y estas son afines con cadenas de los hidrocarburos alifáticos. Este comportamiento también fue observado en la muestras sin reforzar concluyéndose que el refuerzo no tiene efectos en la resistencia química. [1]

- **Prueba absorción de agua.** A continuación se muestran los resultados de porcentaje de incremento de peso después de 24h y 7 días.

Figura 6. Efecto de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno en absorción de agua, después de 24 horas (a) y 7 días (b)



Fuente: Autores

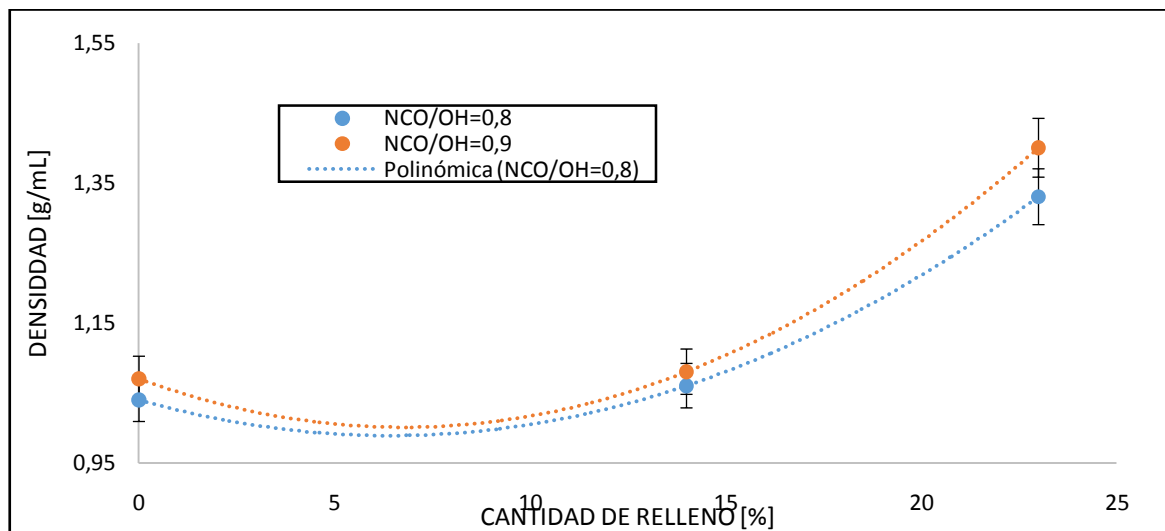
Los resultados de la figura 6 muestran la dependencia de la absorción de agua por la cantidad de relleno, a mayor cantidad de relleno menor absorción de agua, comportamiento que puede ser explicado por la reducción de la cantidad de espacios libres presentes en la matriz del composite resultante, dada la ocupación de estos con partículas de relleno. Este comportamiento es observado en todas las relaciones de NCO/OH estudiadas; sin embargo, una menor cantidad de absorción de agua es observada en las muestras con relación NCO/OH mayor (0,9), comportamiento que está relacionado con el grado de entrecruzamiento del material y la cantidad de OH libres que poseen estas relaciones NCO/OH, es decir, al existir una mayor relación de NCO/OH existirá una mayor probabilidad de puntos de encuentros o de reacción entre los grupos isocianatos y los grupos hidroxilo del aceite, obteniéndose un material más entrecruzado y con una menor cantidad de OH libres; por tanto un mayor entrecruzamiento proporciona una

menor cantidad de espacio libre para el alojamiento de agua y una menor cantidad de grupos hidroxilos libres para que interactúen con el agua.

Los datos obtenidos son muy alentadores debido a que poliuretanos comerciales tienen porcentajes de absorción de agua de 0.960 - 1.22 % para los que no tienen refuerzo y 0.2 - 0.3 % para los que tienen rellenos con cantidades de relleno de 10% a 50%. (Fuente: <http://www.matweb.com>).

- **Prueba de densidad.** En la figura 7. representa de la tendencia del cambio de la densidad en función de la cantidad de relleno, para materiales con diferentes relaciones de NCO/OH.

Figura 7. Efecto de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno en la densidad.



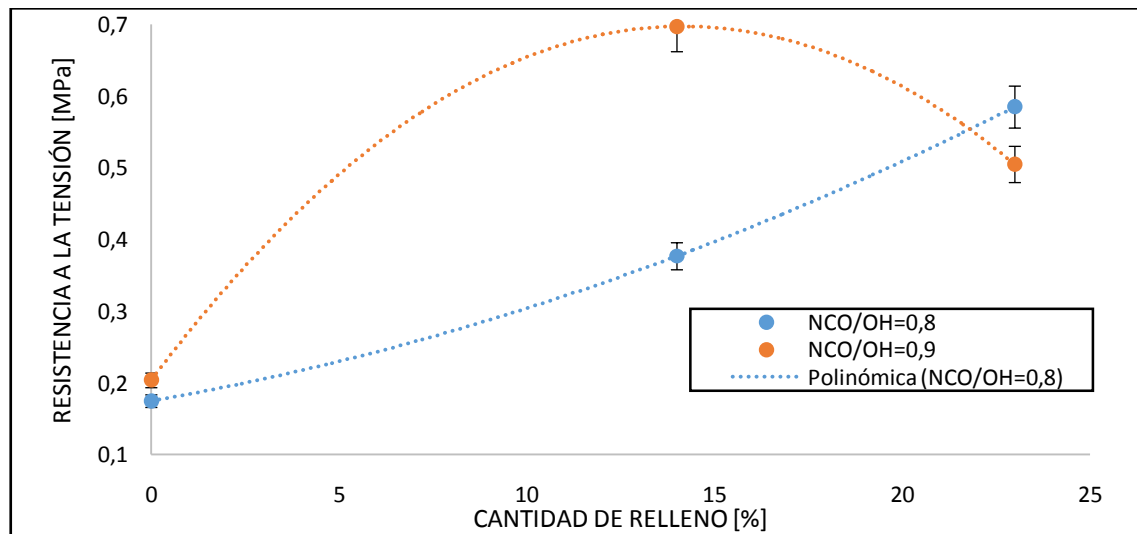
Fuente: Autores

Claramente se observa que la densidad aumenta en forma leve con el aumento de la relación de NCO/OH, y en forma más contundente con la cantidad de relleno presente en el material. Esto porque la adición de relleno aumenta el peso del material y llena los espacios vacíos en su estructura.

4.2.2 Caracterización físico-mecánica

- **Ensayo de Tensión.** A continuación se presentan los resultados de las muestras sometidas a ensayo de tensión, y su variación en función de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno adicionada al material.

Figura 8. Efecto de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno en la resistencia a la tensión

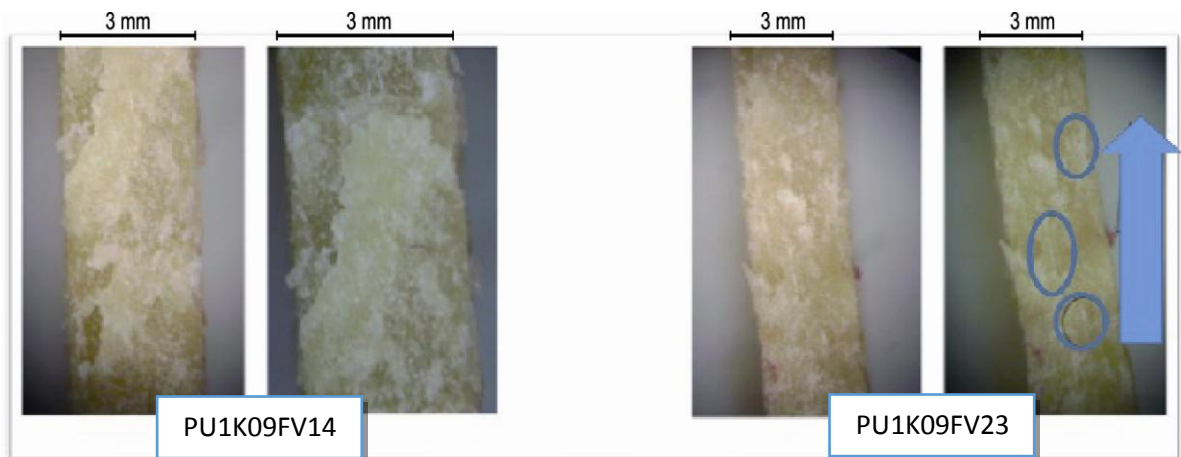


Fuente: Autores

En la figura 8 se observa la influencia de la cantidad de relleno en la resistencia a la tensión del material producto. Para una relación de NCO/OH = 0,8 existe una tendencia creciente de la resistencia a la tensión en forma proporcional con el contenido de relleno, y en términos generales, un aumento del entrecruzamiento del polímero refleja un aumento en el nivel de resistencia a la tensión. Como situación interesante en el poliuretano con relación NCO/OH = 0,9 se pudo establecer que la cantidad de relleno aumenta la resistencia, y hay un punto óptimo o de equilibrio a partir del cual el efecto es contrario, situación que probablemente es ocasionada porque el mayor grado de entrecruzamiento existente en la red, no permite la existencia de suficiente espacio libre para el alojamiento del material de relleno y éste causa acumulaciones e irregularidades

en la matriz, que actúan como concentradores de esfuerzos. Este resultado está acorde con lo mencionado en el enunciado 3.3.1, donde se menciona la no escogencia de la relación de mezcla NCO/OH = 1, dada la aparición de una mayor cantidad de irregularidades ocasionadas por el mayor grado de entrecruzamiento de esta red y cantidades de relleno excesivas para esta condición de síntesis (14% y 23%).

Figura 9. Fotografías de fallas de las muestras PU1K09FV14 Y PU1K09FV23.



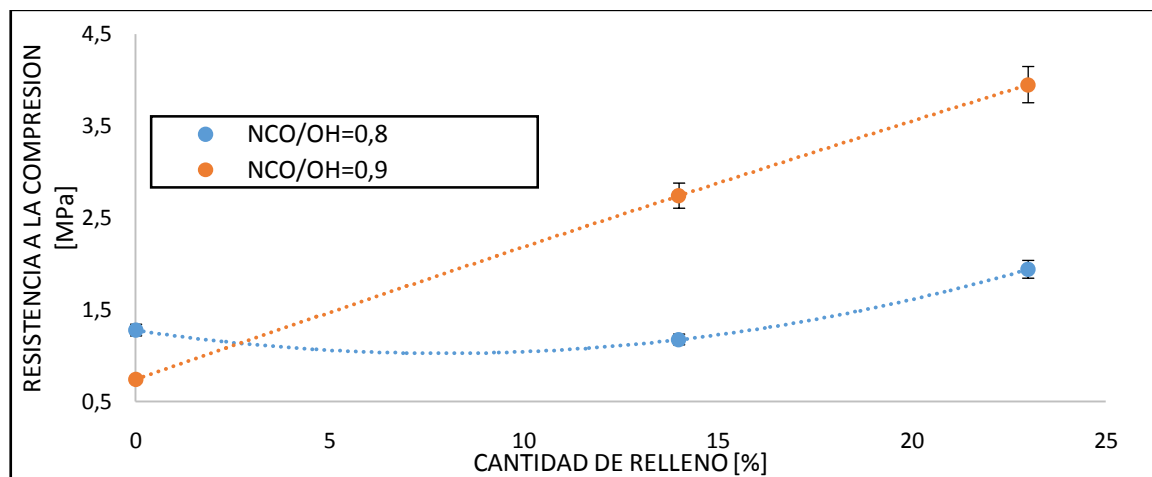
Fuente: Autores

En la figura 9, se observa que la muestra PU1K09FV14 se fractura en menos zonas que la muestra PU1K09FV23, lo que indica que la acumulación de fibras en algunas zonas, como se resalta en la figura 9, concentran los esfuerzos haciendo que este material falle con mayor facilidad. En la imagen también se ve que la orientación de las partículas es diferente en ambas muestras; vemos que en las muestra PU1K09FV14 las partículas están acomodadas de manera anisotrópica, lo cual le imprime al material disponer de resistencia mecánica en diferentes direcciones; por su parte, la muestra PU1K09FV23 los rellenos están acomodados de manera isotrópica, lo que se traduce en disponer de resistencia mecánica en una sola dirección.

En consecuencia, el aumento del grado de entrecruzamiento y la cantidad de relleno inciden en el aumento de la resistencia a la tensión de un poliuretano sintetizado acorde con los parámetros de este estudio, pero hay un punto de inflexión según el grado de entrecruzamiento, a partir del cual el nivel de relleno actúa de manera nociva en la resistencia a la tensión del poliuretano.

- **Ensayo de Compresión.** Los resultados obtenidos (ver figura 10) muestran que en los poliuretanos sin presencia de relleno, la resistencia a la compresión es inversamente proporcional al grado de entrecruzamiento, lo que se debe a que el material menos entrecruzado tiene más espacios en su estructura interna lo que le proporciona movilidad permitiéndole tener mayor resistencia a la compresión. Al aplicar relleno, la resistencia a la compresión aumenta de manera contundente para las muestras con mayor grado de entrecruzamiento (NCO/OH=0.9), mientras que para el muestras con una relación NCO/OH de 0.8, la tendencia también es al aumento pero con cambios no tan grandes a aumentar la cantidad de relleno, porque el material al tener más espacios vacíos acomoda mejor el relleno conservando movilidad en su estructura.

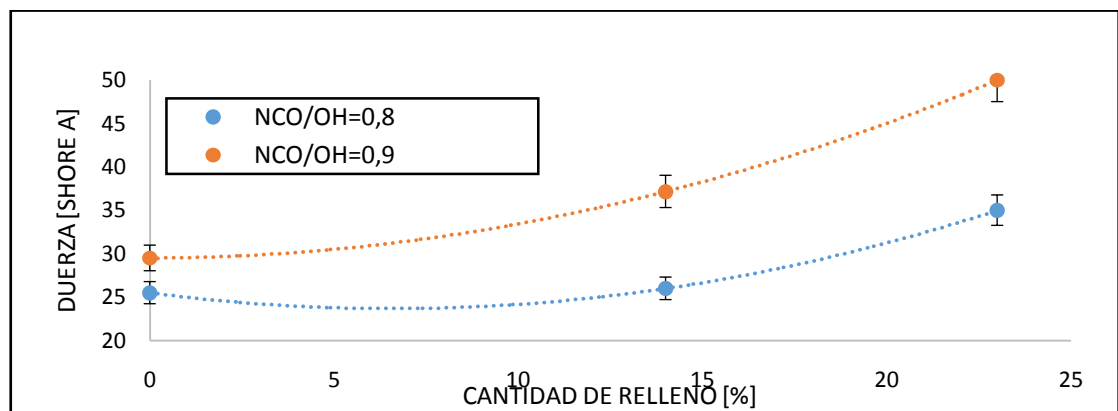
Figura 10. Ensayo de compresión, porcentaje de relleno vs resistencia a la compresión



Fuente: Autores

- **Prueba de dureza.** Como se observa en la figura 11. la dureza del poliuretano aumenta levemente con la relación NCO/OH, y esta proporción de aumento es muy similar en términos cuantitativos a la adición de relleno en el poliuretano con menor grado de entrecruzamiento. En el poliuretano con mayor grado de entrecruzamiento, la presencia de relleno impacta de manera importante un aumento de su dureza, hasta niveles del cien por ciento.

Figura 11. Efecto de la relación NCO/OH y la cantidad de relleno en la dureza.

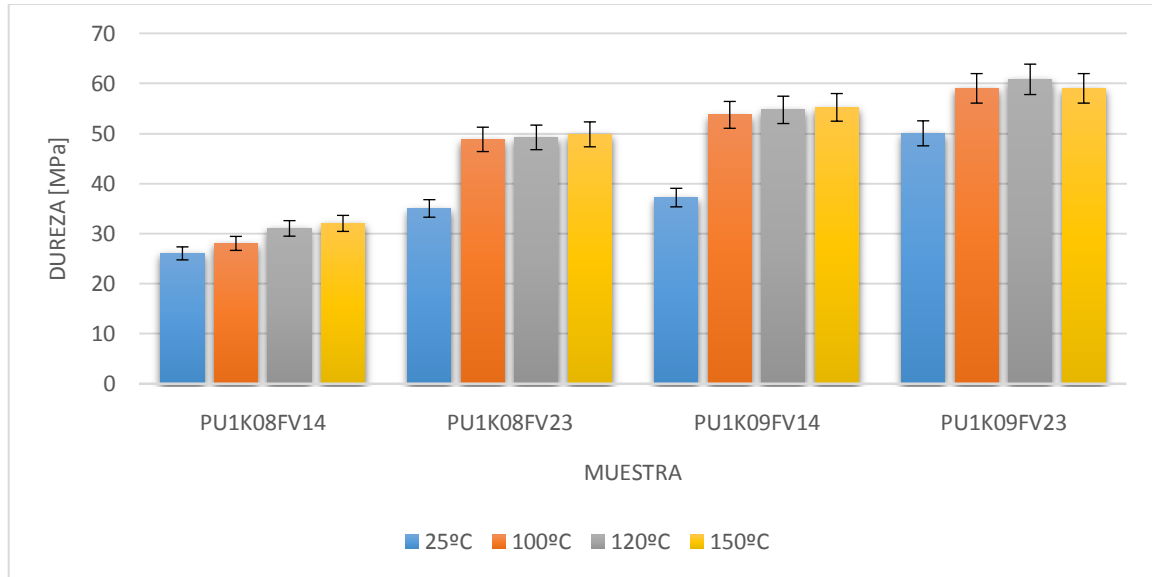


Fuente: Autores

4.2.3 Caracterización Térmica

- **Prueba Térmica.** En las figuras 12 y 13 se resumen los resultados de las pruebas de dureza y tensión realizadas a las diferentes probetas, posterior a la aplicación del ciclo de exposición a alta temperatura, para establecer la resistencia térmica de cada uno de los materiales, para este ensayo se denominó resistencia térmica a la temperatura a la cual se observó una disminución $\geq 10\%$ en una o las dos propiedades evaluadas a diferentes temperaturas.

Figura 12. Efecto de la temperatura sobre la dureza del material



Fuente: Autores

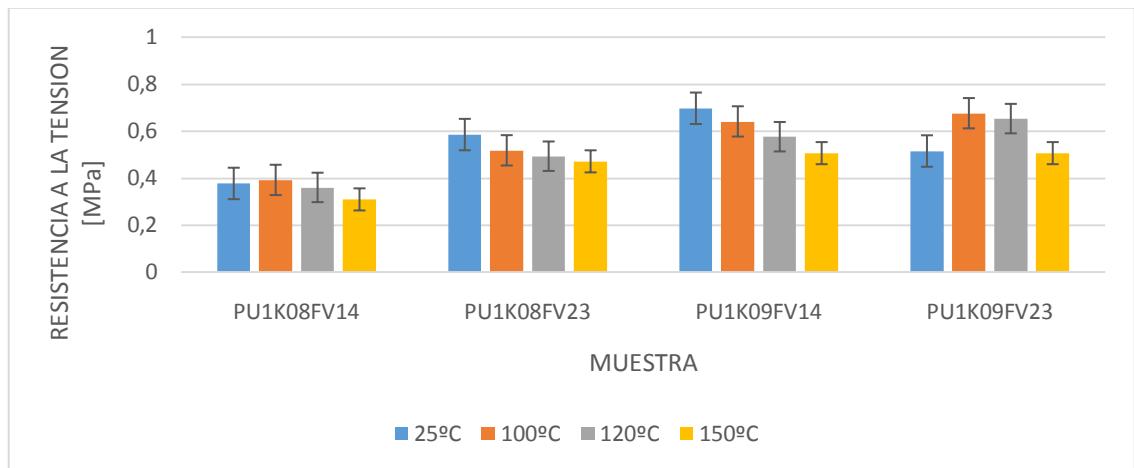
Puede verse claramente que la variación de la dureza luego de la exposición de las muestras a diferentes niveles de temperatura, no es un criterio aplicable en este caso, para definir la resistencia térmica de los materiales evaluados, en razón a que no hay pérdidas importantes de esta característica, respecto de las condiciones de dureza original.

El ensayo permite visualizar que para el poliuretano con la relación NCO/OH de 0,8 se presenta un proceso de pos-curado que contribuye a un aumento de dureza, hasta los 150°C. Para la relación de 0,9 por su parte, la condición anterior aplica pero sólo para un contenido de relleno del 14%, mientras que para 23% de relleno esta tendencia de pos-curado sólo es evidente hasta los 120°C.

Lo anterior es asimilable al hecho que al ser calentado el material, las dilataciones propician el acomodamiento del relleno, pero que cuando el entrecruzamiento es mayor y la cantidad de relleno es alta, habría un nivel de temperatura tope para el

cual, los esfuerzos térmicos vuelven a encontrar en los rellenos un efecto de concentración de esfuerzos que reducen su aguante a ser penetrados.

Figura 13. Efecto de la temperatura sobre la resistencia a la tensión a diferentes temperaturas.



Fuente: Autores

La variación de la resistencia a la tensión luego de la exposición de los poliuretanos a diferentes niveles de temperatura, sí es un criterio aplicable en este caso, para definir la resistencia térmica de los materiales evaluados, en razón a que hay pérdidas importantes de esta característica, respecto de las condiciones de resistencia a la tensión original.

Adoptando como criterio de admisibilidad, que la resistencia térmica del material corresponde a la temperatura para la cual, el valor máximo de resistencia a la tensión pos-ensayo es mayor al valor promedio de la resistencia original a 25°C, para dicho propósito se usó análisis estadístico (prueba t con $\alpha = 0.1$, ver anexo M), por tanto se puede aseverar que:

El PU1K08FV14 tiene una resistencia térmica $> 120^{\circ}\text{C}$ y $< 150^{\circ}\text{C}$

El PU1K08FV23 tiene una resistencia térmica $< 100^{\circ}\text{C}$

El PU1K09FV14 tiene una resistencia térmica $> 120^{\circ}\text{C}$ y $< 150^{\circ}\text{C}$

El PU1K09FV23 tiene una resistencia térmica $> 120^{\circ}\text{C}$ y $< 150^{\circ}\text{C}$

4.3 VIABILIDAD TÉCNICA

Para hacer la comparación escogimos el material PU1K09FV23 y PU1K0914, por que presentan mayor dureza, resistencia a la tensión, a la compresión, una buena resistencia a reactivos químicos y una baja absorción de agua.

Se comparó el material con elastómeros comerciales usados en la industria. Se destaca que los poliuretanos estudiados en este trabajo, presentan muy baja resistencia a la tensión al ser comparados con elastómeros posicionados en el mercado como el Fluoroelastomer (FKM)- Viton, Ethylene-propilene rubber (EPDM) y Styrene-Butadiene Rubber (SBR).

De otra parte, cabe señalar que el material PU1K09FV23 presenta mayor dureza que el EPDM, Acrylonitrile-Butadiene Rubber (NBR) y (Natural Rubber) NR y similar a la de materiales como el Neopreno y el SiliconeRubber (SI).

Térmicamente los poliuretanos estudiados presentan una resistencia térmica superior a los materiales comerciales identificados como SBR, NBR, Polychloroprene Rubber (CR) y NR.

Basados en lo anterior, podemos considerar que el poliuretano identificado como PU1K09FV23 tiene un cierto potencial como material de aplicabilidad industrial, ya que es comparable en varias de sus propiedades con varios materiales comerciales usados de manera importante en la industria.

En general el poliuretano a partir de aceite de ricino reforzado, presenta una potencial competitividad en la industria, máxime considerando que hay una

amplitud de mecanismos para mejorar sus niveles de cohesión mediante procesos de pos-curado, modificación del Polioli para aumentar el grado de entrecruzamiento, y la introducción al concepto como material compuesto mediante el uso de tejidos de refuerzo, enfocados más específicamente a incrementar su resistencia a la tensión y su resistencia química.

Tabla 3. Estudio técnico

MATERIAL	Resistencia térmica (°C)	Dureza (shore A)	Resistencia a la tensión (MPa)	Densidad (g/mL)	Compresibilidad (%)	Elongación (%)	Soluciones acidas	Soluciones Alcalinas	Hidrocarburos alifáticos
Fluoroelastomer (FKM)- Viton	205	75	11,3	1,9	3	150	B	B	B
SiliconeRubber (SI)	200	50-60	7,45	1,2	2	250	M	M	M
ChlorosulfonatedPolyethylene Rubber –Hypalon	135	65	2,8	1,13	45	430	B	-	B
ButylRubber	120	60	8	1,25	40	550	B	B	M
PU1K08FV14	>120	26	0,4	1,10	51	129	B	M	M
PU1K09FV14	>120	37,2	0,8	1,08	42	123	B	M	M
PU1K08FV23	<100	35	0,6	1,3	39	116	B	M	M
PU1K09FV23	>120	50	0,5	1,4	40,5	125	B	M	M
Polychloroprene Rubber (CR)	100	35-60	28	1,35	15	100	B	M	-
Ethylene- propilene rubber (EPDM)	100	40-60	5,5	0,86	3	170	B	B	-
Styrene-Butadiene Rubber (SBR)	90	35-50	7	0,95	25	125	M	M	B
Natural Rubber (NR)	80	30-100	28	0,95	30	100	M	-	M
Acrylonitrile-Butadiene Rubber (NBR)	76	30-95	6,86	1	5	120	B	B	-

Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

- La utilización de rellenos basados en fibra de vidrio como refuerzo de la matriz del poliuretano producido a partir de aceite de ricino mejora sus propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas.
- La variación de las condiciones de síntesis como la cantidad de relleno y el grado de entrecruzamiento permite controlar las propiedades de los elastómeros obtenidos y ajustarlas de acuerdo a una posible aplicación.
- Condiciones de síntesis con cantidades de relleno superior al 23% genera irregularidades en la matriz del polímero que actúan como concentradores de esfuerzo afectando propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión.
- La cantidad de grupos hidroxilo libres tiene gran importancia en el comportamiento del material, debido a que influencia directamente sus propiedades fisicoquímicas como por ejemplo la absorción de agua, ya que dependiendo la cantidad de OH libres el material puede absorber más o menos agua dependiendo el caso.
- El aumento del grado de entrecruzamiento de un poliuretano sintetizado a partir de aceite de ricino con adiciones de rellenos, mejora las propiedades fisicoquímicas pero requiere observación entre la relación NCO/OH y el contenido de relleno, puesto que este puede contribuir a la reducción de su resistencia a la tensión.

6. RECOMENDACIONES

- Basados en los resultados que indica la valoración técnica del poliuretano reforzado, se recomienda definir aplicaciones específicas a fin de realizar ensayos complementarios.
- Se recomienda realizar evaluaciones con el uso de polioles modificados con el fin de observar la variación en las propiedades del material.
- Realizar pruebas con diferentes refuerzos y usando isocianatos comerciales diferentes con el fin de observar el cambio en las propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

1. Araque, Jenny y Buitrago, Lina. Caracterización básica de poliuretanos obtenidos a partir de aceite de ricino modificado con glicerol, para definir criterios de aplicabilidad como material industrial. Bucaramanga: Proyecto de grado UIS, 2013.
2. Arun Kumar Rout, Alok Satapathy. Study on mechanical and tribo-performance of rice-husk filled glass–epoxy hybrid composites. *Materials and Design* 41 (2012) 131–141.
3. Castor oil based based polyurethanes: 1 Structural characterization of castor oil. Nature of intact glycerides and distribution of hydroxyl groups. TRAN, Ngoc Buu y Vialle, Jean and Pham, Quang. 10, Vietnam: Elsevier, 1997, Vol. 38.
4. Castor oil: a vital industrial raw material. Ogunniyi, D. 9, Ilorin: ELSEVIER, 2006, Vol. 97.
5. Ciencia e ingeniería de los materiales, Donald R. Askeland. 3° edición. Ed. International Thomson. 1998.
6. Correlation of mechanical property, crosslink density and thermogravimetric behavior of castor oil polyurethane–polystyrene divinyl benzene simultaneous IPN networks. V. G. Kumar, M. Rama Rao, T. R. Guruprasad, K. V. C. Rao. 5, s.l.: *Journal of Applied Polymer Science*, 1987, Vol. 34. 1803.
7. Cruz Karina, Sáenz Aidé aceites vegetales: una fuente renovable y económica para obtener plásticos, *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 2012 Volumen 4, No. 8
8. Fuentes LE, Pérez S, Martínez SI, Ramírez A. Redes poliméricas interpenetradas de poliuretano a partir de aceite de ricino modificado y poliestireno: miscibilidad y propiedades mecánicas en función de la composición. *Rev. Ion*, 2011; 24(2): 45.
9. G. F. Seniha, Y. Yusuf, *Prog. Polymer Science*: 31(2006) 633.

10. Gil Angélica. M, Jaramillo Franklin, Cruz Luis.J, Poliuretanos degradables a partir de aceite de higuera. *Scientia Et Technica*, Año XIII, N° 36, 2007.
11. H, Yeganeh. S.I Synthesis and properties of biodegradable elastomeric epoxy modified polyurethanes based on poly(ϵ -caprolactone) and poly(ethylene glycol)..: *European Polymer Journal*, 2005, Vol. 41.
12. H, Yeganeh. S.I. Preparation and properties of novel biodegradable polyurethane networks based on castor oil and poly(ethylene glycol: *Polymer Degradation and Stability*, 2007, Vol. 92.
13. Huibo Zhang, W. Li. Development of polyurethane elastomer composite materials by addition of milled fiberglass with coupling agent. *Materials Letters* 61 (2007) 1358–1362.
14. Huibo Zhang, W. Lic, Xujie Yang. Microstructural characterizations and mechanical behavior of polyurethane elastomers strengthened with milled fiberglass, *Journal of Materials Processing Technology* 190 (2007) 96–10.
15. Interpenetrating polymer networks based on oil modified castor oil polyurethane and polymethyl methacrylate. Athawale, V y Kolekar, S. 10, Mumbai: Elsevier Science, 1998, Vol. 34. 1447-1451.
16. J. M. E. Rodrigues et al. *Thermochimica Acta* 427 (2005) 31.
17. Jin FL, Park S J. 2007. Thermal and rheological properties of vegetable oil-based epoxy resins cured with thermally latent initiator. *Journal Ind. Eng. Chem.*13: 808-814.
18. K. Prashantha, K. Vasanth Kumar Pai, *B Bull. Mater. Sci.* 24 (2001) 535.
19. M. F. Valero, J. E. Pulido, A. Garcia y Z. Cheng. *J. Elastomers and Plastics*, 41 (2009) 223.
20. M. F. Valero, J. E. Pulido, A. Garcia y Z. Cheng. *Rev. Iberoam. Polim.*, 9 (2008) 149.
21. M. Sánchez-Soto, P. Pages, T. Lacorte, K. Briceño, F. Carrasco. Curing FTIR study and mechanical characterization of glass bead filled trifunctional epoxy composites. *Composites Science and Technology* 67 (2007) 1974–1985.

22. Meier M. A. R., Metzgerb J O. 2007. Schubert U. S., Plant oil renewable resources as green alternatives in polymer science. *Chemical Society Reviews*. 36: 1788-1802.
23. Michael, Wegener, Capella. *Tecnología de los composites/ platicos reforzados*, Editorial Hanser, Barcelona, 1992.
24. Miyagawa H, Jurek R J, Mohanty A K, Misra M , Drzal L T. 2006. Biobased epoxy/clay nanocomposites as a new matrix for CFRP. *Compos. Pt. A*. 37: 54-62.
25. Morales. R, Daniel y Zuluaga.C, Hector. Estudio de propiedades térmicas y mecánicas en espumas de mezclas poliméricas entre copolímero de etileno-acetato de vinilo (EAV) y caucho natural. 37, Cali: *Revista Facultad de Ingenieria Universidad del Valle*, 2006.
26. N. D. Ghatge, V. B. *J. Appl. Polym. Sci.*, 11 (1964) 629.
27. Oertel, Günter. *Polyurethane Handbook* 2da edicion. s.l.: Hanser, 1994.
28. Prashantha P., Vasanth Kumar Pai K., Sherigara B.S. y Prasannakumar S. Interpenetrating polymer networks based on polyol modified castor oil polyurethane and poly (2-hydroxyethylmethacrylate): Synthesis, chemical, mechanical and thermal properties. India: *Indian Academic of Sciences*, 2001, Vol. 24.
29. *Proyectado, Asociación técnica del poliuretano. El libro blanco del poliuretano.* Madrid: ATEPA, 2009.
30. Rodríguez, Sandra y Higueta, Luz Stella. *Elastómeros de Poliuretano a partir de aceite de higuera y almidón de yuca modificado químicamente: síntesis y propiedades fisicoquímicas y térmicas.* Bucaramanga: Proyecto de grado UIS, 2008.
31. S. R. Zoran, F. Dragica, *J. Appl. Polym. Sci.*, 29 (1984) 1031.
32. S. Vinay, P. P. Kundu, *Prog. Polymer Science* 33 (2008) 1199.
33. Structure-property relationship in polyurethane elastomers containing starch as a crosslinker. Sonal, Desai, I.M, Thakore, B.D y Sarawade, Shureka. 5, s.l.: *Polym.Eng.Sci*, 2000, Vol. 40.

34. Valero, Manuel Fernando, y otros Estudio de las propiedades mecánicas, térmicas, reológicas y morfología de poliuretanos a partir de aceite de higuera modificado por transesterificación. 3, s.l.: Revista Iberoamericana De Polímeros, 2008, Vol. 9. ISSN: 0121-665.
35. Vu, Cung. Castor Oil based polyurethanes for bridge deckings and related applications. United States Patents, 1989.
36. W. Sultan and J. P. Busnel, J. Therm. Anal. Cal. 83 (2006) 355.
37. W.T. Wang, T.Y. Kam. Material characterization of laminated composite plates via static testing. Composite Structures 50 (2000) 347-352.

ANEXOS

Anexo A. Propiedades físico-químicas de reactivos

Aceite de ricino: distribuido por laboratorios León, Bucaramanga.

- Índice de hidroxilo: 160 mg KOH/g de aceite
- Índice de acidez: 2,33 mg KOH/g de aceite
- Grado USP

Rubinate® 5005 / suprasec® 5005: isocianato para sistemas de poliuretano
Distribuido por laboratorios HUNSTMAN. Cartagena.

- Funcionalidad aprox: 2,7
- Peso equivalente isocianato: 133
- Contenido NCO (%): 30,2 – 31,5
- Peso molecular promedio: 340 g/mol
- Acidez (ppm HCl): 50-250
- Viscosidad (25 °C): 170-250 cps
- Gravedad específica (25 °C): 1,23
- Punto de inflamación: 218 °C (medido en Copa Cleveland)
- Presión de vapor a 25 °C, mm Hg máximo 1×10^{-4} .

Anexo B. Granulometría de la fibra de vidrio

La fibra de vidrio en polvo es un residuo que queda del proceso de fabricación de sellos hidráulicos en la empresa DIACOR S.A., el cual esencialmente es viruta de material compuesto epóxico reforzado con tejido de vidrio NEMA G11.

Para calcular la granulometría de la fibra de vidrio se tomó una muestra de 20 g y se tamizo con diferentes tamaños de malla. Con los tamaños de malla y cantidad de fibra que queda en cada una se puede hacer una distribución de tamaños.

Granulometría de la fibra de vidrio en polvo

Malla	Peso	%	Tamaño (in)
	5,35	26,75	< 0,139
45	1,45	7,25	0,139-0,117
50	5,03	25,15	0,117-0,098
60	0,29	1,45	0,098-0,083
70	0,96	4,8	0,083-0,07
80	0,61	3,05	0,07-0,049
120	4,48	22,4	> 0,049

Anexo C. Cálculo de las proporciones molares de polioliol y disocianato

Es importante en un material polimérico conocer las proporciones molares de los grupos funcionales que lo conforman para así tener una idea del grado de polimerización del material.

Cálculo de relación estequiometría NCO/OH

$$\text{Relación NCO/OH} = \frac{\# \text{ moles NCO}}{\# \text{ moles OH}}$$

Para el cálculo de la cantidad de moles de OH

$$\# \text{ moles OH} = \frac{g \text{ polioliol} * IH(\text{mg KOH/g polioliol})}{1000 * 56,1 \text{ g KOH/mol}}$$

Donde IH es el índice de hidroxilo del polioliol según el anexo x es 160

Para el cálculo de la cantidad de moles del grupo isocianato se tiene

$$\# \text{ moles NCO} = \frac{g \text{ isocianato} * \text{funcionalidad}}{\text{peso molecular de isocianato (g/mol)}}$$

En el anexo A se tiene que el peso molecular del isocianato es de 340 g/mol y funcionalidad es aproximadamente 2,7.

Con esto tenemos que para un porcentaje en peso de polioliol disocianato de 28% la proporción molar es de **0,8** y para un 32% en peso es **0.9**.

Anexo D. Procedimiento de síntesis del poliuretano reforzado

1) **Pesar el aceite de ricino.** para hacer una placa de poliuretano de 150cm x 15cm x 3 mm se necesitan 70 gr de aceite de ricino.



2) **Pesar la fibra de vidrio.** Se agrega la fibra de vidrio dependiendo el porcentaje en peso de aceite y fibra de vidrio que se desee.



3) **Mezclar el aceite y la fibra de vidrio.** Se busca conseguir una mezcla homogénea, para esto se agita la mezcla durante 2min.



4) **Pesar el isocianato (MDI).** La cantidad de isocianato depende de la proporción en peso de aceite e isocianato que se desee.



5) **Mezclar el isocianato con el aceite y la fibra de vidrio.** Se mezcla por 2 min para conseguir una mezcla homogénea de los 3 componentes.



6) **Aplicar vacío.** Se aplica vacío a la mezcla para retirar el aire y así evitar que aparezcan burbujas en el material. Se aplica vacío durante 25 min.



7) **Aplicar calor.** Se aplica calor para ayudar sacar el aire de la mezcla y para evitar que se endurezca el polímero. Para esto se mete el frasco con polímero en agua a 70°C durante 2 minutos, esto se hace en el minuto 15 del proceso de vacío.



8) Verter la mezcla en el molde y dejar que cure durante 24h.



9) Retirar del molde y curar en un horno a 90°C durante 24h.

Anexo E. Protocolos Ensayos de caracterización

Aquí se describen los protocolos seguidos para realizar las pruebas de caracterización del material, estos protocolos están basados en las normas astm.

Prueba de absorción de agua. La prueba de absorción de agua fue realizada en base a la norma ASTM D570-98, se ensayó un número de 3 probetas por cada material.

Protocolo

- Realice la toma de muestra para el material a ensayar.
- Ingrese la muestra al horno a 50.
- Deje la muestra durante 24 horas.
- Retire la muestra y enfríela en un desecador.
- Pese la muestra con una tolerancia de 0.001 g.
- Prepare un recipiente a 23 °C para la inmersión.
- Sumerja completamente la muestra en un recipiente con agua destilada. apoyada en un borde. Mantenga durante 24 ½ h.
- Al finalizar el tiempo de inmersión, saque las muestras una a una.
- Secar la superficie con un trapo seco.
- pese la muestra con una tolerancia de 0.001 g.

Prueba de dureza. La prueba de dureza se realiza con el durómetro para plásticos blandos del laboratorio de procesos de la escuela de ingeniería química de la universidad industrial de Santander.

Protocolo

- Medir las dimensiones de la probeta.
- Medir la dureza en 3 zonas diferentes de la probeta

- Calcular la dureza como el promedio de las 3 zonas

Prueba de tensión. La prueba de tensión fue realizada en base a la norma ASTM D638 y fue llevada a cabo en una máquina de ensayos universales WDW-E Series ubicada en el laboratorio de materiales de las Unidades Tecnológicas de Santander.

El ensayo se llevó a cabo a una carga de 400 N y una velocidad de 15 mm/min.

Protocolo

- Verificar el tipo y las dimensiones de la probeta.
- Montar la probeta en la máquina de ensayo y sujetarla con las mordazas.
- Definir la velocidad de aplicación de la carga.
- Apretar las mordazas uniformemente a la medida de la muestra previniendo su desplazamiento durante la prueba.
- Colocar el indicador de extensión (extensómetro) para medir el módulo de Young.
- Aplicar tensión a la muestra.
- El proceso va hasta la ruptura.
- Acoplar los dos segmentos de la muestra
- Medición de la longitud final para calcular el porcentaje de elongación.
- Medición de la sección transversal para calcular el porcentaje de reducción de área.
- Llevar a cabo los cálculos.

Prueba de compresión. La prueba de compresión fue realizada según la norma ASTM D695 –10 en una máquina de ensayos universales WDW-E Series ubicada en el laboratorio de materiales de las Unidades Tecnológicas de Santander.

El ensayo se llevó a cabo a una carga de 400 N y una velocidad de 15 mm/min.

Protocolo

- Verificar tipo y dimensiones de la probeta
- Montar la probeta en la maquina
- Definir la velocidad de aplicación de la carga
- Aplicar la carga de compresión hasta que la probeta llegue al punto de rotura o esfuerzo de rotura por compresión.
- Definir resistencia a la compresión del material
- Formulas

Prueba de densidad. La prueba de densidad se llevó a cabo según la norma ASTM D792.

Protocolo

- Medir la dimensiones de las probetas
- Pesar cada probeta con una tolerancia de 0,001 g
- Medir el volumen de cada probeta según el principio de Arquímedes. En una bureta rotulada.
- Calcular la densidad de cada probeta.

Prueba térmica. Para la prueba térmica se realizó una prueba no estandarizada, donde se calentaron probetas a diferentes temperaturas, para este caso se escogieron temperaturas de 100, 120 y 150°C, y posteriormente realizar la prueba de tensión y dureza sobre esta probetas.

Anexo F. Resultados prueba de absorción de agua.

Tipo de muestra: **Lamina**

Largo: **75mm** Ancho: **25mm** Grosor: **3mm**

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Temperatura: 25°C

Datos de la prueba de absorción de agua del PU1K08FV14

Tiempo de inmersión: 24h

Muestra	Peso Seco (g)	Peso húmedo (g)	% Incremento de peso	% H₂O abs.
1	7,0862	7,1166	0,43	0,43
2	6,7011	6,7275	0,39	0,39
3	6,904	6,9401	0,52	0,52
		Promedio	0,44	0,44

Tiempo de inmersión: 1 semana

Muestra	Peso Seco (g)	Peso húmedo (g)	% Incremento de peso	% H₂O abs.
1	7,0862	7,142	0,78	0,78
2	6,7011	6,7641	0,94	0,94
3	6,904	6,969	0,94	0,94
		Promedio	0,88	0,88

Datos de la prueba de absorción de agua del PU1K09FV23

Tiempo de inmersión: 24h

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% Inc. de peso	% H ₂ O abs.
1	7,4716	7,4953	0,32	0,32
2	6,8114	6,8364	0,37	0,37
3	7,4151	7,435	0,27	0,27
		Promedio	0,30	0,30

Tiempo de inmersión: 1 semana

Muestra	Peso Seco (g)	Peso Húmedo (g)	% Incremento de peso	% H ₂ O abs.
1	7,4716	7,5186	0,63	0,63
2	6,8114	6,8559	0,65	0,65
3	7,4151	7,457	0,57	0,57
		Promedio	0,61	0,61

Datos de la prueba de absorción de agua del Pu1k08fv23

Tiempo de inmersión: 24h

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% incremento de peso	% H ₂ O abs.
1	6,718	6,7401	0,33	0,33
2	6,3254	6,3439	0,29	0,29
3	6,922	6,9345	0,18	0,18
		Promedio	0,27	0,27

Tiempo de inmersión: 7 días

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% incremento de peso	% H ₂ O abs.
1	6,718	6,7592	0,61	0,61
2	6,3254	6,3563	0,49	0,49
3	6,922	6,9592	0,54	0,54
		Promedio	0,55	0,55

Datos de la prueba de absorción de agua del Pu1k09fv14

Tiempo de inmersión: 24h

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% incremento de peso	% H ₂ O abs.
1	7,3317	7,364	0,44	0,44
2	6,4716	6,4936	0,34	0,34
3	6,7562	6,7726	0,24	0,24
		Promedio	0,34	0,34

Tiempo de inmersión: 7 días

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% incremento de peso	% H ₂ O abs.
1	7,3317	7,3812	0,68	0,68
2	6,4716	6,5121	0,63	0,63
3	6,7562	6,7968	0,60	0,60
		Promedio	0,63	0,63

Datos de la prueba de absorción de agua del Pu1k08fv0

Tiempo de inmersión: 24h

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% Inc. de peso	% H ₂ O abs.
1	5,7229	5,7530	0,5260	0,5260
2	6,4214	6,4542	0,5108	0,5108
3	6,5720	6,5973	0,3850	0,3850
		Promedio	0,4739	0,4739

Tiempo de inmersión: 7 días

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% Incremento de peso	% H ₂ O abs.
1	5,7229	5,7967	1,29	1,29
2	6,4214	6,5127	1,42	1,42
3	6,572	6,6461	1,13	1,13
		Promedio	1,28	1,28

Datos de la prueba de absorción de agua del Pu1k09fv0

Tiempo de inmersión: 24h

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% Incremento de peso	% H ₂ O abs.
1	5,7993	5,8252	0,4466	0,4466
2	5,8856	5,9046	0,3228	0,3228
3	5,9025	5,9220	0,3304	0,3304
		Promedio	0,3666	0,3666

Tiempo de inmersión: 7 días

Muestra	Peso seco (g)	Peso húmedo (g)	% Inc. de peso	% H2O abs.
1	5,7993	5,8379	0,67	0,67
2	5,8856	5,9251	0,67	0,67
3	5,9025	5,9421	0,67	0,67
		Promedio	0,67	0,67

Anexo G. Resultados prueba de densidad

Tipo de muestra: **Lamina**

Largo: **75mm** Ancho: **25mm** Grosor: **3mm**

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Temperatura: 25°C

Datos de la prueba de densidad del Pu1k09fv14

Muestra	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)
1	7,3317	7	1,0473
2	6,4716	6	1,0786
3	6,7562	6	1,1260
		Promedio	1,0840

Datos de la prueba de densidad del Pu1k08fv23

Muestra	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)
1	6,718	5	1,3436
2	6,3254	5	1,2650
3	6,922	5	1,3844
		Promedio	1,3310

Datos de la prueba de densidad del Pu1k09fv23

Muestra	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)
1	5,8074	4	1,4518
2	5,6283	4	1,4070
3	6,6796	5	1,3359
		Promedio	1,3982

Datos de la prueba de densidad del Pu1k08fv14

Muestra	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad(g/mL)
1	5,5010	5	1,1002
2	5,2021	4,5	1,1560
3	5,2258	5	1,0452
		Promedio	1,1005

Datos de la prueba de densidad del Pu1k08fv0

MUESTRA	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)
1	5,7229	5,5	1,0405
2	6,4214	6	1,0702
3	6,572	6,5	1,0110
		promedio	1,0406

Datos de la prueba de densidad del Pu1k09fv0

Muestra	Peso (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)
1	5,7993	5,5	1,0544
2	5,8856	5,5	1,0701
3	5,9025	5,5	1,0732
		promedio	1,0659

Anexo H. Resultados prueba de dureza.

Tipo de muestra: **Lamina**

Largo: **75mm** Ancho: **25mm** Grosor: **3mm**

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Temperatura: 25°C

Datos de la prueba de dureza del PU1K08FV14

Muestra 1

Zona	Dureza (shore A)
1	26
2	26
3	26

Muestra 2

Zona	Dureza (shore A)
1	24
2	27
3	27

Datos de la prueba de dureza del PU1K09FV23

Muestra 1.

Zona	Dureza (shore A)
1	50
2	50
3	50

Muestra 2

Zona	Dureza (shore A)
1	51
2	50
3	51

Datos de la prueba de dureza del PU1K09FV14

Muestra 1

Zona	Dureza (shore A)
1	35
2	38
3	40

Muestra 2

Zona	Dureza (shore A)
1	35
2	39
3	36

Datos de la prueba de dureza del PU1K08FV23

Muestra 1

Zona	Dureza (shore A)
1	37
2	35
3	35

Muestra 2

Zona	Dureza (shore A)
1	34
2	33
3	36

Datos de la prueba de dureza del PU1K08FV0

Muestra 1

Zona	Dureza (shore A)
1	26
2	24
3	26

Muestra 2

Zona	Dureza (shore A)
1	26
2	25
3	26

Datos de la prueba de dureza del PU1K09FV0

Muestra 1

Zona	Dureza (shore A)
1	30
2	31
3	29

Muestra 2

Zona	Dureza (shore A)
1	28
2	30
3	29

Anexo I. Resultados prueba química

Datos de la prueba de resistencia química a la gasolina

Material	Peso antes de inmersión (g)	Peso después de inmersión (g)	% incremento de peso	Peso de material después del secado en el horno (g)	Daño
Pu1k08fv14	1,5084	2,0415	35,34	1,2625	Si
Pu1k09fv14	1,6912	2,3683	40,04	1,5787	Si
Pu1k08fv23	1,6123	2,1542	33,61	1,5444	Si
Pu1k09fv23	1,6342	2,2026	34,78	1,5786	Si

Datos de la prueba de resistencia química alACPM

Material	Peso antes de inmersión (g)	Peso después de inmersión (g)	% incremento de peso	Peso de material después del secado en el horno (g)	Daño
Pu1k08fv14	1,5024	1,6895	12,45	1,6345	Si
Pu1k09fv14	1,5149	1,6846	11,20	1,6388	Si
Pu1k08fv23	1,5616	1,7137	9,74	1,6604	Si
Pu1k09fv23	1,508	1,6521	9,56	1,6388	Si

Datos de la prueba de resistencia química a una solución 10% de NaOH

Material	Peso antes de inmersión (g)	Peso después de inmersión (g)	% incremento de peso	Peso de material después del secado en el horno (g)	Daño
Pu1k08fv14	1,5918	1,8176	14,19	1,5787	Si
Pu1k09fv14	1,6261	1,7371	6,83	1,6417	Si
Pu1k08fv23	1,4191	1,4726	3,77	1,5442	Si
Pu1k09fv23	1,5616	1,5825	1,34	1,4029	Si

Datos de la prueba de resistencia química a una solución 30% de NaCl









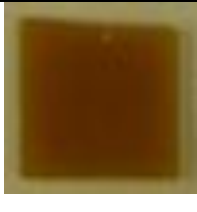















Material	Peso antes de inmersión (g)	Peso después de inmersión (g)	% incremento de peso	Peso de material después del secado en el horno (g)	Daño
Pu1k08fv14	1,6692	1,6769	0,46	1,6737	Si
Pu1k09fv14	1,5884	1,5937	0,33	1,5900	Si
Pu1k08fv23	1,7359	1,7428	0,40	1,7385	Si
Pu1k09fv23	1,5501	1,5595	0,61	1,5569	Si

Datos de la prueba de resistencia química al Varsol

Material	Peso antes de inmersión (g)	Peso después de inmersión (g)	% incremento de peso	Peso de material después del secado en el horno (g)	Daño
Pu1k08fv14	1,4929	1,7846	19,54	1,4895	Si
Pu1k09fv14	1,5081	1,7971	19,16	1,5275	Si
Pu1k08fv23	1,6091	1,8722	16,35	1,6494	Si
Pu1k09fv23	1,5954	1,8525	16,12	1,6409	Si

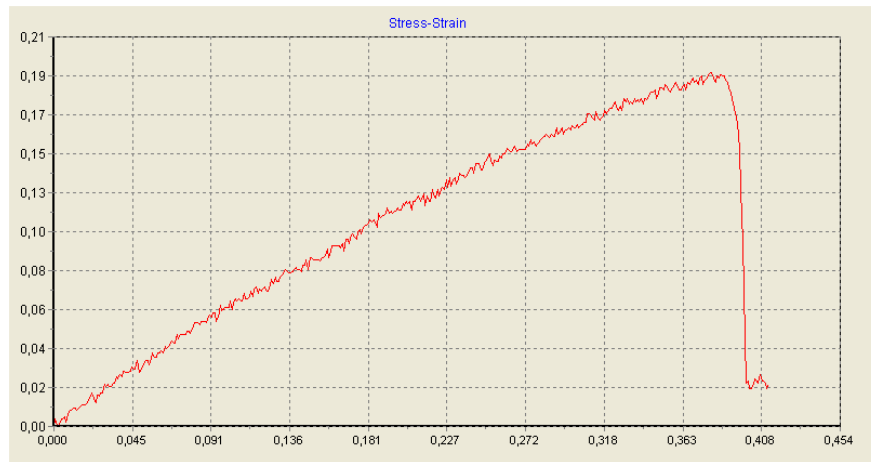
Datos de la prueba de resistencia química de solución de HCl al 10% en peso

Material	Peso antes de inmersión (g)	Peso después de inmersión (g)	% incremento de peso	Peso de material seco días después de la inmersión (g)	Daño
Pu1k08fv14	1,5414	1,5535	0,79	1,5486	No
Pu1k09fv14	1,6102	1,6183	0,50	1,5912	No
Pu1k08fv23	1,5831	1,6049	1,38	1,6128	No
Pu1k09fv23	1,3926	1,4051	0,90	1,3984	No

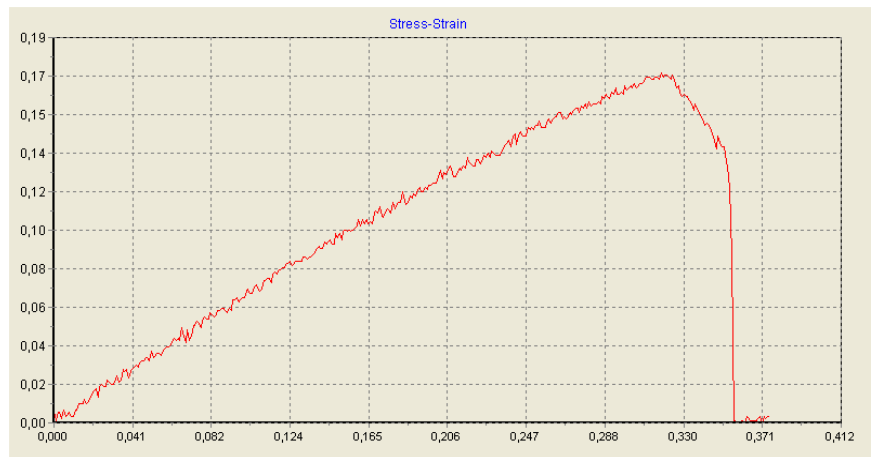
Muestras HCl		Muestras ACPM		Muestras NaCl	
					
PU1K08F V14	PU1K08FV2 3	PU1K08FV1 4	PU1K08FV2 3	PU1K08FV1 4	PU1K08FV 23
					
PU1K09F V14	PU1K09FV2 3	PU1K09FV1 4	PU1K09FV2 3	PU1K09FV1 4	PU1K09FV 23
Muestras Gasolina		Muestras HCl		Muestras Varsol	
					
PU1K08F V14	PU1K08FV2 3	PU1K08FV1 4	PU1K08FV2 3	PU1K08FV1 4	PU1K08FV 23
					
PU1K09F V14	PU1K09FV2 3	PU1K09FV1 4	PU1K09FV2 3	PU1K09FV1 4	PU1K09FV 23

Anexo J. Gráficas Esfuerzo- deformación del ensayo de tensión para elastómero de poliuretano

Grafica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k08fv0 sometida a tensión



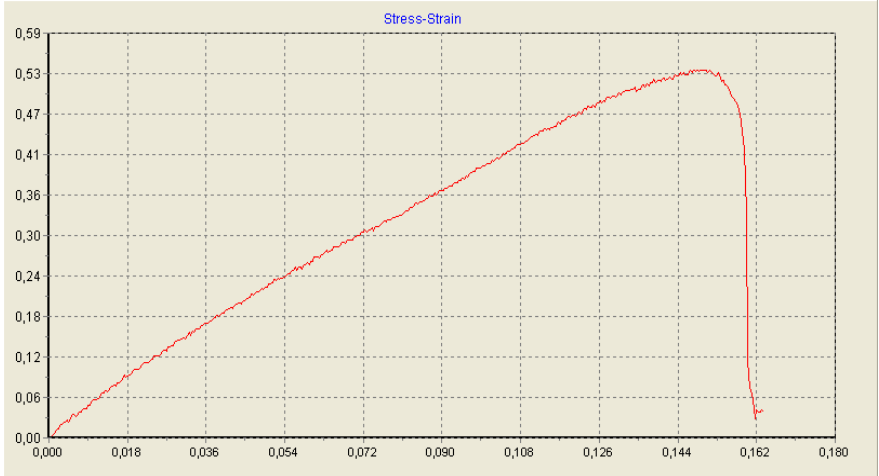
Grafica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k09fv0 sometida a tensión



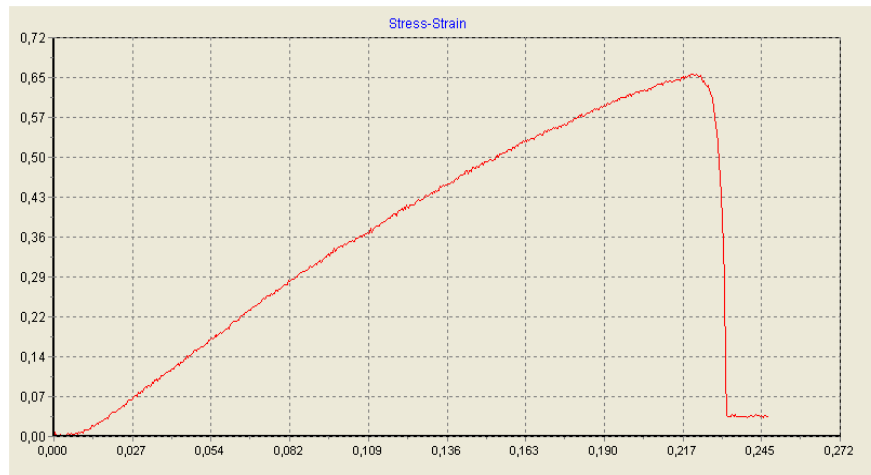
Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k08fv14 sometida a tensión.



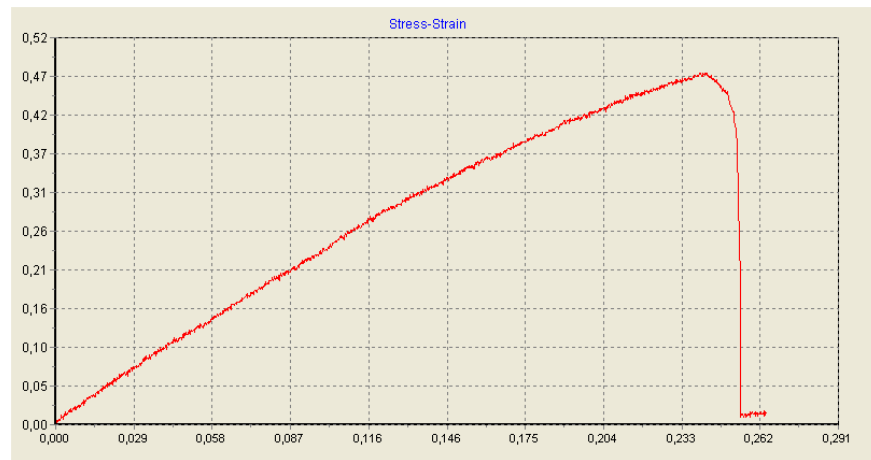
Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k08fv23 sometida a tensión.



Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k09fv14 sometida a tensión.

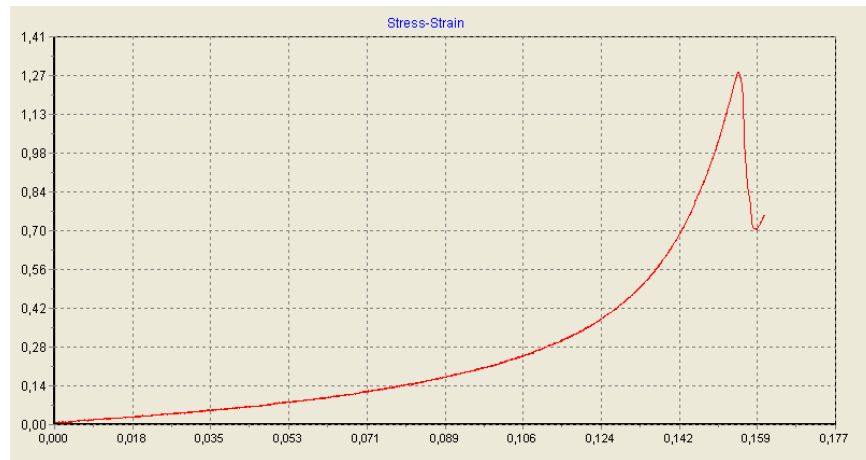


Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k09fv23 sometida a tensión.

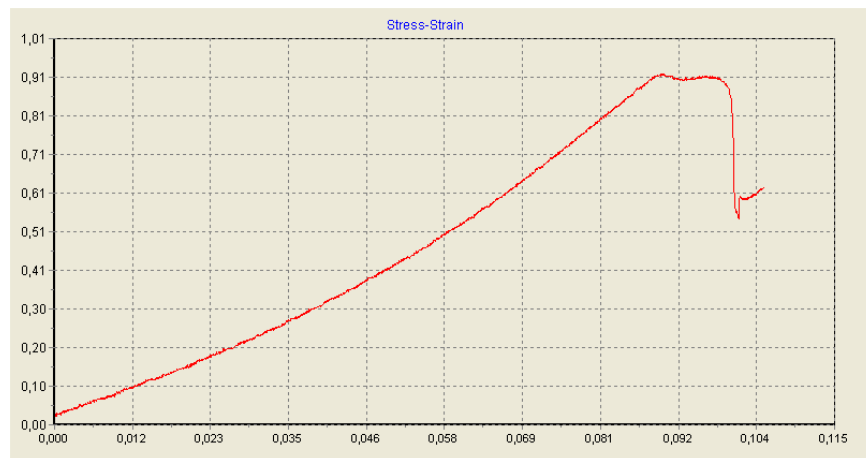


Anexo K. Gráficas Esfuerzo- deformación del ensayo de compresión para elastómero de poliuretano

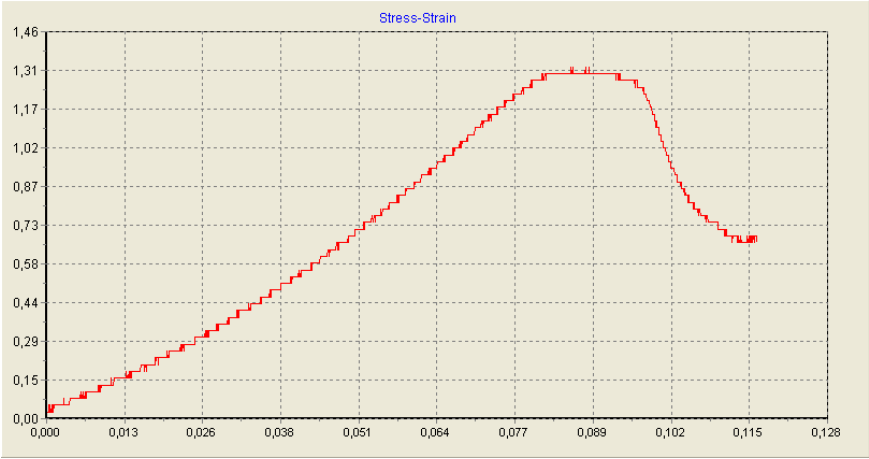
Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k08fv0 sometida a compresión



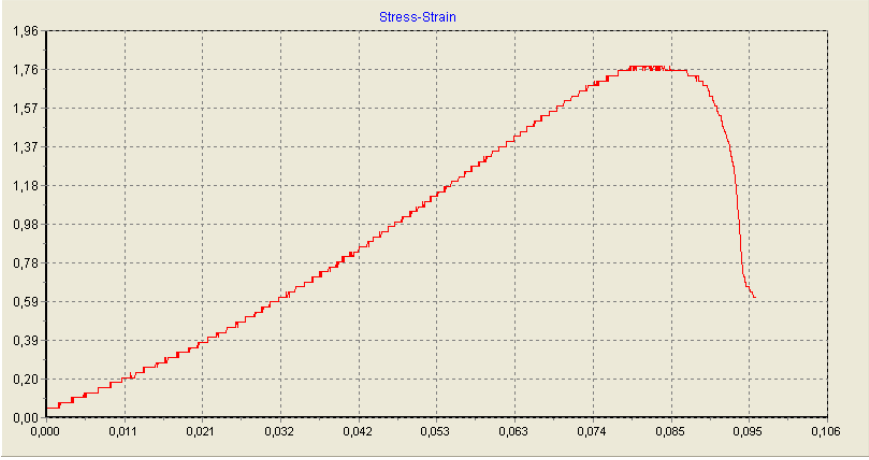
Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k09fv0 sometida a compresión



Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k08fv14 sometida a compresión



Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k08fv23 sometida a compresión



Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra Pu1k09fv14 sometida a compresión



Gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación para la muestra PU1K09FV23 sometida a compresión



Anexo L. Resultados de la prueba térmica.

Resultados promedio de la prueba de tensión a las probetas calentadas, resistencia a la tensión (MPa).

	PU1K08FV14	PU1K08FV23	PU1K09FV14	PU1K09FV23
25°C	0,377	0,585	0,697	0,515
100°C	0,392	0,518	0,641	0,676
120°C	0,36	0,493	0,576	0,653
150°C	0,309	0,471	0,506	0,506

Resultados de dureza de las probetas calentadas para la prueba térmica.

Temperatura: 100 °C

	Dureza (shore A)						
Material	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Dureza promedio
Pu1k08fv14	31	30	26	28	26	27	28
Pu1k08fv23	48	50	49	50	49	47	48,83333333
Pu1k09fv14	52	53	54	54	54	55	53,66666667
Pu1k09fv23	57	59	59	60	58	61	59

Temperatura 150 °C

	Dureza (shore A)						
Material	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Dureza promedio
Pu1k08fv14	32	31	31	32	33	33	32
Pu1k08fv23	50	46	49	59	48	47	49,83333333
Pu1k09fv14	57	55	54	53	56	56	55,16666667
Pu1k09fv23	57	58	57	60	60	62	59

Prueba t para muestras PU1K08FV14, para datos de muestras calentadas a 25 °C y 100 °C, $t_{\text{estadístico}} < t_{\text{crítico}}$ por lo tanto estadísticamente los valores son iguales.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,3765	0,392
Varianza	0,0214245	5E-05
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,01073725	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,14958401	
P(T<=t) una cola	0,44740744	
Valor crítico de t (una cola)	1,88561808	
P(T<=t) dos colas	0,89481489	
Valor crítico de t (dos colas)	2,91998558	

Prueba t para muestras PU1K08FV14, para datos de muestras calentadas a 25 °C y 120 °C, $t_{\text{estadístico}} < t_{\text{crítico}}$ por lo tanto estadísticamente los valores son iguales.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,3765	0,36
Varianza	0,0214245	0,000512
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,01096825	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,157548863	
P(T<=t) una cola	0,444640534	
Valor crítico de t (una cola)	1,885618083	
P(T<=t) dos colas	0,889281068	
Valor crítico de t (dos colas)	2,91998558	

Prueba t para muestras PU1K08FV14, para datos de muestras calentadas a 25 °C y 150 °C, $t_{\text{estadístico}} < t_{\text{crítico}}$ por lo tanto estadísticamente los valores son iguales.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,3765	0,3085
Varianza	0,0214245	4,5E-06
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,0107145	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,65693584	
P(T<=t) una cola	0,28935554	
Valor crítico de t (una cola)	1,88561808	
P(T<=t) dos colas	0,57871107	
Valor crítico de t (dos colas)	2,91998558	

Prueba t para muestras PU1K08FV23, para datos de muestras calentadas a 25 °C y 100 °C, $t_{\text{estadístico}} > t_{\text{crítico}}$ por lo tanto estadísticamente los valores son diferentes.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,5845	0,395
Varianza	0,0043245	0,001922
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,00312325	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	3,39082862	
P(T<=t) una cola	0,03852768	
Valor crítico de t (una cola)	1,88561808	
P(T<=t) dos colas	0,07705536	
Valor crítico de t (dos colas)	2,91998558	

Prueba t para muestras PU1K09FV14, para datos de muestras calentadas a 25 °C y 100 °C, $t_{\text{estadístico}} < t_{\text{crítico}}$ por lo tanto estadísticamente los valores son iguales.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,697	0,6405
Varianza	0,00405	0,0218405
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,01294525	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,49658458	
P(T<=t) una cola	0,33434646	
Valor crítico de t (una cola)	1,88561808	
P(T<=t) dos colas	0,66869292	
Valor crítico de t (dos colas)	2,91998558	

Prueba t para muestras PU1K09FV14, para datos de muestras calentadas a 25 °C y 120 °C, $t_{\text{estadístico}} < t_{\text{crítico}}$ por lo tanto estadísticamente los valores son iguales.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,697	0,576
Varianza	0,00405	0,00605
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,00505	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	1,70270606	
P(T<=t) una cola	0,11536682	
Valor crítico de t (una cola)	1,88561808	
P(T<=t) dos colas	0,23073363	
Valor crítico de t (dos colas)	2,91998558	

Prueba t para muestras PU1K09FV14, para datos de muestras calentadas a 25 °C y 150 °C, $t_{\text{estadístico}} > t_{\text{crítico}}$ por lo tanto estadísticamente los valores son diferentes.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,697	0,4375
Varianza	0,00405	0,0305045
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,01727725	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	1,974240484	
P(T<=t) una cola	0,093527225	
Valor crítico de t (una cola)	1,885618083	
P(T<=t) dos colas	0,18705445	
Valor crítico de t (dos colas)	2,91998558	

Prueba t para muestras PU1K09FV23, para datos de muestras calentadas a 25 °C y 100 °C, $t_{\text{estadístico}} < -t_{\text{crítico}}$ por lo tanto estadísticamente los valores son diferentes.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,5045	0,816
Varianza	0,0018605	0,0392
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,02053025	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-2,17400697	
P(T<=t) una cola	0,08087592	
Valor crítico de t (una cola)	1,88561808	
P(T<=t) dos colas	0,16175183	
Valor crítico de t (dos colas)	2,91998558	