

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE ELASTÓMEROS DE  
POLIURETANO OBTENIDOS A PARTIR DE MDI POLIMÉRICO Y ACEITE  
DE RICINO MODIFICADO CON GLICEROL PARA DEFINIR CRITERIOS DE  
APLICABILIDAD COMO MATERIAL INDUSTRIAL**

**JENNY PAOLA ARAQUE FERREIRA  
LINA DAYANY BUITRAGO MARTÍNEZ**

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

**2013**

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE ELASTÓMEROS DE  
POLIURETANO OBTENIDOS A PARTIR DE MDI POLIMÉRICO Y ACEITE  
DE RICINO MODIFICADO CON GLICEROL PARA DEFINIR CRITERIOS DE  
APLICABILIDAD COMO MATERIAL INDUSTRIAL**

**JENNY PAOLA ARAQUE FERREIRA  
LINA DAYANY BUITRAGO MARTÍNEZ**

Trabajo de grado para optar título de Ingeniero Químico

Director

**ÁLVARO RAMÍREZ GARCÍA**

Ingeniero Químico, PhD

Codirector

**LUIS ENRIQUE FUENTES PEREA**

Ingeniero Químico, PhD (C)

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

**2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Química por ofrecernos la oportunidad de formarnos como personas íntegras en los ámbitos personal y profesional.

A los doctores Álvaro Ramírez García y Gustavo Ramírez por su dedicación, enseñanza y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

A Carolina Ardila Suárez por su apoyo incondicional y al Grupo de Investigación en Polímeros que siempre estuvieron acompañándonos.

A los técnicos del laboratorio de procesos que siempre nos tendieron su mano para ayudarnos cuando lo necesitamos.

Al señor Reinaldo Villalba y al profesor Luis Enrique Fuentes por su apoyo en el transcurso de este trabajo.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	15
1. MARCO TEÓRICO .....	17
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	21
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.2 MODIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO .....	22
Fuente: autores. ....	23
2.3 OBTENCIÓN DE ELASTÓMEROS DE POLIURETANO.....	23
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELASTÓMEROS .....	24
2.4.1 PRUEBAS PRELIMINARES:.....	24
2.4.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN:.....	24
2.4.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA.....	24
Ensayo de absorción de agua: .....	24
Ensayo de densidad: .....	24
Ensayo de hinchamiento y ataque químico: .....	25
2.4.2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA .....	25
Ensayo de Tensión .....	25
Ensayo de Compresión.....	25
Ensayo de dureza:.....	25
Ensayo de resistencia dieléctrica:.....	25
2.4.2.3 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA.....	25
Análisis Termogravimétrico (TGA):.....	25
Ensayo de resistencia térmica:.....	26
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	27
3.1 OBTENCIÓN DE ELASTÓMEROS DE POLIURETANO.....	27
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELASTÓMEROS .....	28
3.2.1 PRUEBAS PRELIMINARES:.....	28

3.2.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN: .....	29
3.2.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA.....	29
Ensayo de absorción de agua y densidad: .....	29
Ensayo de hinchamiento y ataque químico: .....	30
3.2.2.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA .....	32
Ensayos de tensión, compresión, dureza y resistencia dieléctrica: .....	32
3.2.2.3 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA.....	33
Análisis Termogravimétrico (TGA):.....	33
Ensayo de resistencia térmica: .....	35
4. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS ELASTÓMEROS.....	37
CONCLUSIONES .....	40
RECOMENDACIONES.....	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
ANEXOS.....	45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cantidades de reactivos usados en la transesterificación del aceite de ricino. ....	22
Tabla 2. Índice de hidroxilo para cada uno de los polioles utilizados.....	23
Tabla 3. Resultados del proceso de elección de relaciones NCO/OH. ....	27
Tabla 4. Condiciones usadas en la elaboración de elastómeros de poliuretano. ....	28
Tabla 5. Resultados pruebas mecánicas de elastómeros con relación NCO/OH=1. ....	32
Tabla 6. Temperaturas de descomposición de elastómeros de poliuretano obtenidos a partir de aceite de ricino natural y modificado con glicerol. ....	35
Tabla 7. Comportamiento de los elastómeros obtenidos frente a elastómeros comerciales.....	39
Tabla 8. Cantidad de reactivos usados en la preparación de elastómeros.....	50
Tabla 9. Dimensiones de las probeta del ensayo de tensión.....	54
Tabla 10. Resultados promedio prueba de hinchamiento:.....	56
Tabla 11. Resultados promedio prueba de ataque químico:.....	56
Tabla 12. Resultados promedio prueba de absorción de agua:.....	56
Tabla 13. Resultados promedio prueba de densidad:.....	56
Tabla 14. Posicionamiento de los elastómeros de poliuretano dentro del rango de valores de Resistencia a la tensión.....	59
Tabla 15. Posicionamiento de los elastómeros de poliuretano dentro del rango de valores de Resistencia térmica y dureza. ....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reacción de polimerización entre un grupo hidroxilo y un grupo isocianato para formar un grupo uretano. ....	17
Figura 2. Estructura química del ácido ricinoleico.....	19
Figura 3. Reacción de transesterificación entre el aceite de higuera (ricino) y glicerol. ....	20
Figura 4. Metodología para la elaboración, caracterización y evaluación técnica de elastómeros de poliuretano.....	21
Figura 5. Etapas del proceso de elaboración del pre polímero.....	23
Figura 6. Relaciones no aceptadas NCO/OH >1,1, presencia de burbujas .....	28
Figura 7. Resultados de pruebas preliminares a) Dureza Shore A b) Resistencia a la tensión.....	29
Figura 8. Resultados ensayo de absorción de agua y densidad de elastómeros de poliuretano con relación NCO/OH=1.....	30
Figura 9. Probetas después de realizado el ensayo de hinchamiento y ataque químico. ....	30
Figura 10. Hinchamiento de elastómeros de poliuretano con relación molar NCO/OH=1. ....	31
Figura 11. Diagramas termogravimétricos de los elastómeros. ....	33
Figura 12. Resultados ensayo de resistencia térmica para elastómeros de poliuretano con relación NCO/OH=1 a) Dureza b) Resistencia a la tensión....	36
Figura 13. Montaje para la reacción de transesterificación de aceite de ricino con glicerol.....	46
Figura 14. Forma de probetas para ensayo de tensión. ....	53
Figura 15. Gráficas Esfuerzo-deformación del ensayo de tensión para elastómeros de poliuretano: a) EP Polioliol 1K, b) EP Polioliol 3K,c) EP Polioliol 5K. .	57
Figura 16. Gráficas Esfuerzo- deformación del ensayo de compresión para elastómero de poliuretano a) EP Polioliol 1K, b) EP Polioliol 3K, c) EP Polioliol 5k. ....	58

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Propiedades físico-químicas de reactivos .....	45
<b>Anexo B.</b> Modificación del aceite de ricino mediante reacción de transesterificación con glicerol .....	46
<b>Anexo C.</b> Cálculo índice de hidroxilo.....	47
<b>Anexo D.</b> Cálculo de relación estequiométrica NCO/OH .....	49
<b>Anexo E.</b> Listado de cantidad de reactivos usados en la preparación de elastómeros de poliuretano.....	50
<b>Anexo F.</b> Ensayos de caracterización .....	51
<b>Anexo G.</b> Resultados pruebas decisivas.....	56
<b>Anexo H.</b> Comparación de elastómeros de poliuretano vs elastómeros comerciales.....	58

## RESUMEN

**TITULO:** SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE ELASTÓMEROS DE POLIURETANO OBTENIDOS A PARTIR DE MDI POLIMÉRICO Y ACEITE DE RICINO MODIFICADO CON GLICEROL PARA DEFINIR CRITERIOS DE APLICABILIDAD COMO MATERIAL INDUSTRIAL.\*

**AUTORES:**

JENNY PAOLA ARAQUE FERREIRA\*\*  
LINA DAYANY BUITRAGO MARTÍNEZ

**PALABRAS CLAVE:** Aceite de ricino, glicerol, poliuretano, entrecruzamiento.

**DESCRIPCIÓN:**

El presente trabajo se centró en definir criterios de aplicabilidad industrial de elastómeros de poliuretano empleando un isocianato comercial tipo MDI (Metil-Difenil-Isocianato) y aceite de ricino modificado con glicerina. La metodología experimental se dividió en tres etapas; en la primera etapa se sintetizaron elastómeros usando aceite de ricino con diferentes grados de modificación mediante reacción de transesterificación con glicerina grado USP para observar la influencia que tiene el aumento de la funcionalidad del aceite sobre las propiedades de los materiales. En la segunda etapa se caracterizaron los elastómeros, teniendo en cuenta las principales propiedades reportadas en bases de datos comerciales y por último se realizó una evaluación técnica mediante comparación con materiales elastoméricos de uso industrial. Los resultados muestran que los elastómeros obtenidos a partir de aceite de ricino con un alto grado de modificación presentan un aumento considerable de sus propiedades mecánicas y químicas en comparación a los obtenidos con aceite de ricino sin ningún grado de modificación no observándose el mismo comportamiento con las propiedades térmicas, hecho atribuido al uso de glicerina debido a que es uno de los alcoholes poli hidroxílicos más volátiles. En relación a la evaluación técnica de los elastómeros se logró clasificarlos dentro de un espectro de materiales industriales superando en algunas propiedades a muchos de ellos dejando a consideración la posibilidad de su uso como material industrial.

---

\* Proyecto de grado. Modalidad investigación

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

## ABSTRACT

**TITLE:** SYNTHESIS AND BASIC CHARACTERIZATION OF POLYURETHANE ELASTOMERS OBTAINED FROM POLYMERIC MDI AND CASTOR OIL MODIFIED GLYCEROL APPLICABILITY CRITERIA TO DEFINE MATERIAL AS INDUSTRIAL.\*

**AUTHORS:**

JENNY PAOLA ARAQUE FERREIRA\*\*  
LINA DAYANY BUITRAGO MARTÍNEZ

**KEYWORDS:** Castor oil, glycerol, polyurethane, crosslinking.

**DESCRIPTION:**

This present document was focused on defining criteria for industrial application of polyurethane elastomers using a commercial type isocyanate MDI (Methyl Diphenyl Isocyanate) and castor oil modified with glycerin. The experimental methodology was divided into three stages; in the first stage, elastomers were synthesized using castor oil with different degrees of modification through transesterification reaction with USP grade glycerin in order to observe its influence on the increased functionality of the oil on the material properties. In the second stage elastomers were characterized, taking into account the main properties reported in commercial databases and finally was conducted a technical evaluation by comparison with elastomeric materials for industrial use. The results show that the elastomers obtained from castor oil with a high degree of modification exhibit a considerable increase its mechanical and chemical properties compared to those obtained with castor oil without any degree of modification not observed the same behavior with the thermal properties act attributed to the use of glycerin because it is one of the most volatile polyhydroxilic alcohols. Regarding the technical elastomers, sorting was achieved within a range of industrial materials surpassing in some properties to many of them leaving consideration the possibility of its use as an industrial material.

---

\* Degree Project. Research Mode.

\*\* Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director Álvaro Ramírez García. Co-director Luis E. Fuentes.

## INTRODUCCIÓN

Con el fin de disminuir la creciente demanda de materiales industriales provenientes de fuentes petroquímicas, como lo son la mayoría de los polímeros, se han venido realizando modificaciones en los procesos de obtención, comenzando por el uso de fuentes de materias primas renovables que, además de ofrecer ventajas en el ámbito medioambiental y económico, puedan generar nuevos materiales de similar o superior competitividad que los convencionales.

Los poliuretanos abarcan un amplio rango de aplicaciones en la industria, debido a la extensa gama de productos que ofrecen y a la consecuente amplia variedad de propiedades. Dentro de este grupo se encuentran los elastómeros de poliuretano, también llamados poliuretanos flexibles; los materiales industriales de este tipo están formados por polioles de cadena larga de tipo éter o éster y poliisocianatos tipo MDI. Mientras que los poliisocianatos derivan de fuentes petroquímicas, los polioles tienen la ventaja de poder ser generados a partir de aceites vegetales extraídos del ricino, la soja o el girasol, siendo el aceite de ricino una excelente opción, al no necesitar tratamiento previo para su uso como polioliol por su elevado grado de pureza.

Actualmente los poliuretanos flexibles obtenidos a partir del aceite de ricino natural, presentan propiedades que los hacen poco competitivos en el mercado, situación que ha motivado la realización de numerosos estudios con el fin de encontrar métodos que permitan aumentar el grado de entrecruzamiento de los elastómeros. Entre estos estudios se destacan los realizados por el grupo de investigación en polímeros de la Universidad Industrial de Santander, en el que se han desarrollado métodos de laboratorio para la síntesis de poliuretanos a partir de aceite de ricino sometido a un proceso de transesterificación con diferentes agentes modificantes, logrando

obtener materiales cuyas propiedades dependen de la naturaleza misma de los reactivos y del grado de entrecruzamiento que alcance la red polimérica (1) (2) (3).

A través de los citados estudios se ha logrado identificar el comportamiento del material, pero no ha sido realizada una caracterización básica enfocada a establecer un primer acercamiento que permita evaluar su viabilidad técnica en la industria, y se han limitado al uso de isocianatos analíticos.

El objetivo de este proyecto fue sintetizar y caracterizar elastómeros de poliuretano a partir de un poliisocianato comercial MDI y aceite de ricino modificado con glicerol. Adicionalmente, comparar las propiedades físicas de los elastómeros de poliuretano con materiales similares de uso industrial.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizó una matriz de experimentos que permitiera determinar la relación estructura-propiedades de los elastómeros, considerando el uso de polioles con diferente grado de modificación para lo cual se varió la proporción diisocianato/aceite (NCO/OH).

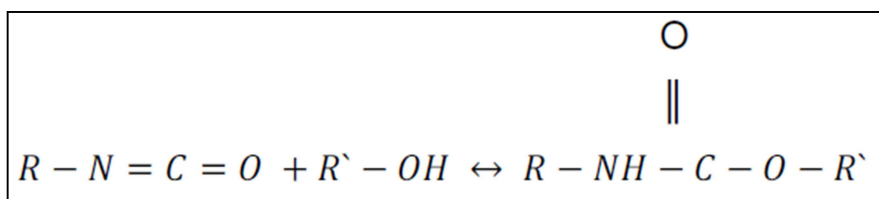
Los ensayos realizados para la caracterización de los nuevos materiales, se ajustaron a la normativa ASTM y se determinaron las propiedades que se consideraban más significativas para realizar la viabilidad de aplicación en la industria.

## 1. MARCO TEÓRICO

Han transcurrido varias décadas desde que autores como Otto Bayer y colaboradores publicaron sus primeros trabajos sobre poliuretanos (4); desde entonces el interés en estos materiales ha estado en constante crecimiento debido a su amplia gama de aplicaciones en la industria como espumas, elastómeros, pinturas, adhesivos y 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 (5); se obtienen por polimerización entre determinados compuestos que contienen el grupo isocianato  $N=C=O$  y compuestos que tengan el grupo hidroxilo  $OH$ . 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 este tipo de materiales 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 (6).

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 como 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.

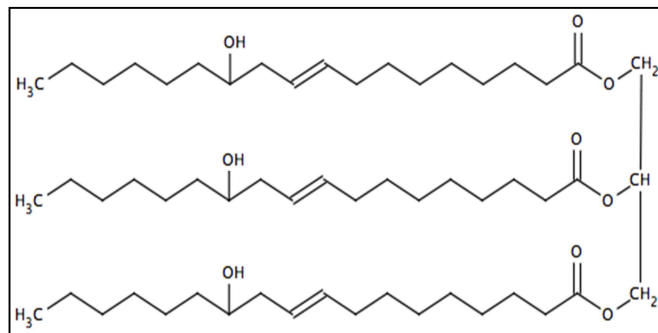
Actualmente este tipo de materiales, al igual que la mayoría de los polímeros presentes en la industria, son sintetizados a partir de materias primas provenientes del petróleo, generando un problema ambiental debido a la baja degradabilidad que presentan (7); sumando además la crisis del sector de los hidrocarburos, se ha buscado reemplazar esta fuente de materia prima por otras que generen nuevos materiales menos contaminantes, igual o más competitivos que los tradicionales, y que además tengan bajos costos de producción.

Sin embargo, éste no ha sido un tema reciente. Se han encontrado estudios de hace más de 30 años basados en la búsqueda de nuevas alternativas viables para la producción de materiales que sean más amigables con el medio ambiente (8) (9) (10); dentro de los numerosos estudios realizados, se ha encontrado viable el uso de aceites vegetales como fuentes alternativas lográndose obtener materiales más biodegradables y menos tóxicos (11) (12).

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 (13) (14), es un aceite natural disponible comercialmente y de bajo costo, además dada su alta pureza no necesita tratamiento químico previo para su uso como polioliol y su estructura química le permite tener alta capacidad de modificación, lográndose obtener materiales con un amplio rango de propiedades.

El aceite de ricino es un triglicérido de ácidos grasos que contiene ácido ricinoleico como mayor constituyente (90%) y triglicéridos de los ácidos linoleico, oleico, palmítico, esteárico, 9,10-dihidroxiesteárico, eicosaneico y linolénico (Figura 2).

**Figura 2. Estructura química del ácido ricinoleico.**



**Fuente:** (15).

Los grupos hidroxilo localizados en las diferentes cadenas hacen de la molécula de aceite de ricino un monómero poli funcional apto para la obtención de poliuretanos; el doble enlace presente ofrece oportunidades adicionales de formar reacciones por injerto y las cadenas largas de ácidos grasos le imparten flexibilidad y resistencia a la hidrólisis. Sin embargo con relación a la complejidad de la molécula, el número de hidroxilos (OH) es relativamente bajo, por consiguiente, las redes de poliuretano tendrán un bajo grado de entrecruzamiento. Como resultado de una menor presencia de grupos uretano, los segmentos de cadena entre puntos de entrecruzamiento son largos y la misma extensión de los brazos de la molécula del aceite de ricino sirve de interferencia para la reacción de los grupos hidroxilo e isocianato. De lo anterior se puede esperar lo que experimentalmente ha sido observado: un material con bajo módulo de resistencia mecánica y baja resistencia térmica (16).

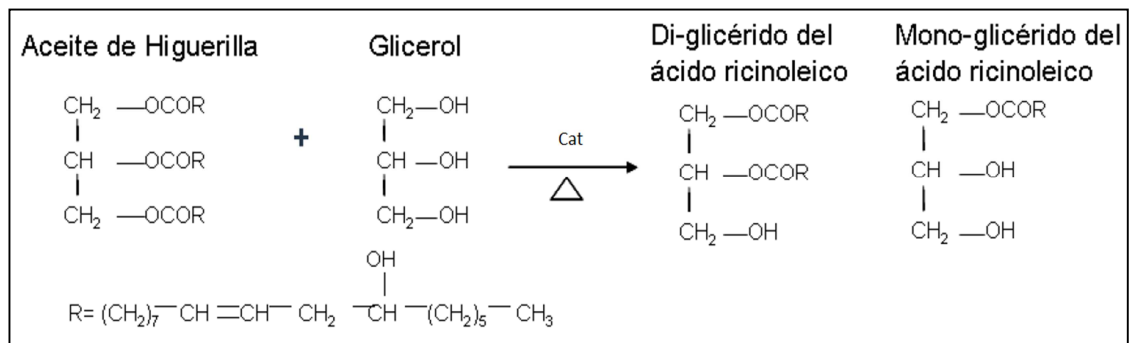
Se han usado diferentes técnicas buscando mejorar estas propiedades, (17) (18) (19) (20); la más empleada consiste en aumentar la funcionalidad del aceite usando alcoholes poli hidroxílicos como agentes modificantes los cuales rompen las cadenas de triglicéridos formando di y mono glicéridos con mayor presencia de grupos funcionales (OH) a partir de los cuales se han logrado

obtener poliuretanos con propiedades mecánicas superiores a las presentadas con el aceite de ricino natural (21) (22) (23) (24) (25).

En el ámbito local, el Grupo de Investigación en Polímeros de la Universidad Industrial de Santander ha encaminado proyectos con el fin de obtener poliuretanos a partir de aceite de ricino modificado usando alcoholes polihidroxilados que además de modificar el aceite, actúan como relleno. Tal es el caso del almidón de yuca, la glicerina y pentaeritritol (26) (27) (28) (29) (30), logrando modificar algunas de las propiedades de estos materiales.

Como un aporte a estos estudios, en el presente trabajo se sintetizaron elastómeros de poliuretano a partir de reactivos netamente comerciales; MDI polimérico (grado comercial) como isocianato, aceite de ricino (grado USP) y glicerina (grado USP) como agente modificante; la modificación del aceite de ricino se realizó mediante la reacción de transesterificación con glicerina (Figura 3), permitiendo obtener una gran gama de materiales de diferentes morfologías y con diferente grado de entrecruzamiento.

**Figura 3. Reacción de transesterificación entre el aceite de higuera (ricino) y glicerol.**



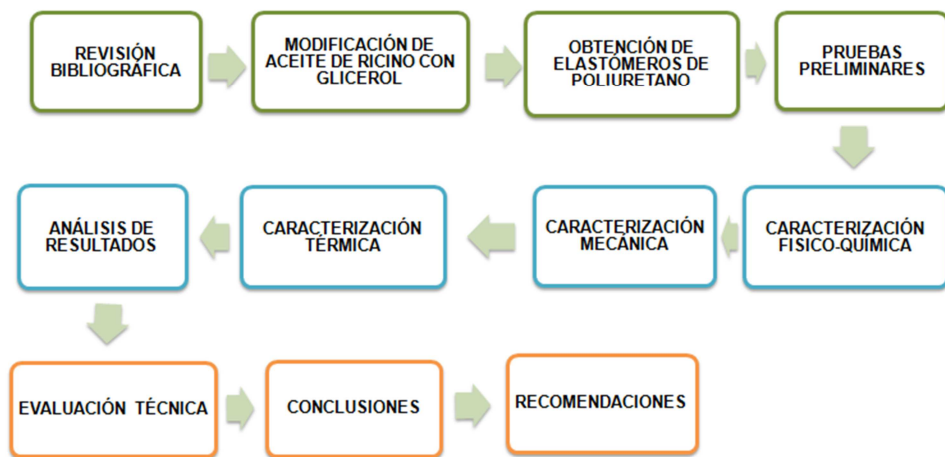
Fuente: (31).

Una vez se tuvieron los elastómeros producidos a partir del aceite de ricino modificado y el MDI comercial, se realizó una caracterización que permitiera definir criterios de aplicabilidad como materiales de uso industrial mediante comparación con otros elastómeros que se encuentran disponibles en el mercado.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La Figura 4 muestra de forma global la metodología que se desarrolló durante la realización del proyecto, cada etapa está dividida de tal forma que el proceso secuencial permitiera alcanzar los objetivos propuestos comenzando por la elaboración de elastómeros pasando por su caracterización y terminando con una evaluación técnica como material de uso industrial.

**Figura 4. Metodología para la elaboración, caracterización y evaluación técnica de elastómeros de poliuretano.**



Fuente: autores.

### 2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se consultó documentación comercialmente disponible acerca de las características y comportamientos que presentan elastómeros con aplicación industrial.

Se consultaron algunas propiedades físico-químicas de las materias primas a utilizar (Anexo A) y se procedió a estudiar diferentes métodos tanto para aumentar el índice de hidroxilo del aceite como para la elaboración de elastómeros, haciendo énfasis en aquellos que habían usado glicerol como agente modificante y en las características de los materiales obtenidos,

escogiendo el método de transesterificación como el más viable para la modificación del aceite.

Por último, se recopiló la normativa ASTM (American Society for Testing and Materials) y se elaboraron los respectivos protocolos a seguir para cada ensayo de caracterización. Es importante aclarar que aunque los ensayos se ajustaron a la normativa ASTM, en materia de capacidad tecnológica y facilidades de acceso a los equipos, se necesitó generar y discutir nuevas ideas y estrategias para determinar el comportamiento de este tipo de materiales durante los distintos ensayos, de tal manera que algunos protocolos se ajustaron a los objetivos de evaluación técnica del material.

## 2.2 MODIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO

La modificación del aceite de ricino con glicerol mediante reacción de transesterificación se llevó a cabo usando óxido de plomo (PbO) como catalizador; se obtuvo dos tipos de polioliol variando la cantidad de glicerol suministrada a la reacción denominados Polioliol 3K y Polioliol 5K; en la Tabla 1 se observan las cantidades de reactivos usadas en la modificación del aceite, el procedimiento y las condiciones de reacción se encuentran en el Anexo B.

**Tabla 1. Cantidades de reactivos usados en la transesterificación del aceite de ricino.**

NOMBRE	PESO DE REACTIVOS (gramos)		
	Aceite de ricino	Glicerol	Catalizador PbO
POLIOL 1K	400	0	0
POLIOL 3K	400	21	0,2
POLIOL 5K	400	39	0,2

Fuente: autores.

Los índices de hidroxilo se hallaron siguiendo la norma ASTM D 1957-86 (Anexo C); en la Tabla 2 se observan los valores de índice de hidroxilo de cada uno de los polioliol incluyendo el de aceite de ricino sin modificar (Polioliol 1K).

Tabla 2. Índice de hidroxilo para cada uno de los poliols utilizados.

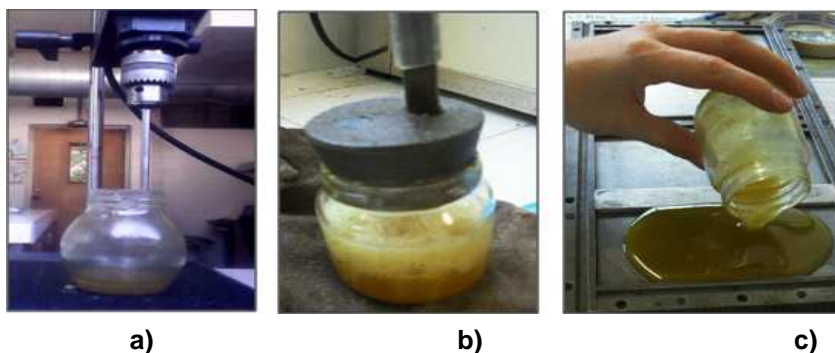
NOMBRE	ÍNDICE DE HIDROXILO (mg de KOH/g de muestra)
POLIOL 1K	160
POLIOL 3K	232
POLIOL 5K	250

Fuente: autores.

### 2.3 OBTENCIÓN DE ELASTÓMEROS DE POLIURETANO

El primer paso para la elaboración de los elastómeros consistió en calcular la cantidad de reactivos a utilizar según una relación molar NCO/OH previamente escogida (Anexo D); posteriormente se adicionaron en recipientes de vidrio, poliols y diisocianato MDI en su respectiva proporción, seguido de un proceso de agitación mecánica a 220 rpm (Figura 5a); una vez se tuvo homogeneizada la mezcla, se aplicó vacío para retirar la humedad presente (Figura 5b). Seguidamente, se suspendió el vacío y se procedió a verter el producto sobre un molde de placas paralelas (Figura 5c). Finalmente se sometió el pre polímero a dos etapas de curado, la primera a temperatura ambiente de laboratorio (25°C) hasta su endurecimiento parcial y la segunda a 90°C durante 24 horas.

Figura 5. Etapas del proceso de elaboración del pre polímero.



Fuente: autores.

Se varió las relaciones molares NCO/OH hasta encontrar aquellas que permitieran obtener láminas de elastómeros bajo los siguientes criterios: ausencia de concentradores de esfuerzos (burbujas) y tiempo de curado a

temperatura ambiente inferior a 24 horas. El listado de las relaciones NCO/OH y las cantidades de reactivos usadas se muestran en el Anexo E.

## **2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELASTÓMEROS**

El proceso de caracterización de los elastómeros se realizó en dos etapas:

**2.4.1 PRUEBAS PRELIMINARES:** Teniendo una matriz de experimentos con diferentes relaciones posibles para cada tipo de polioliol, se procedió a evaluar la influencia del grado de modificación del aceite y la relación NCO/OH usada sobre las propiedades de los elastómeros. Se definieron los ensayos de dureza y tensión como básicos preliminares, en virtud a que permiten establecer la resistencia a la penetración, visualizar el comportamiento elasto-plástico y la potencial aplicabilidad estructural del material.

**2.4.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN:** En esta etapa se llevó a cabo una caracterización de los elastómeros que permitiera evaluarlos técnicamente frente a otros elastómeros. Se trabajó sólo con una relación NCO/OH por cada polioliol usado; la relación escogida fue aquella que presentó propiedades sobresalientes en las pruebas preliminares. A continuación se listan los ensayos realizados en esta etapa. Los respectivos procedimientos se encuentran en el Anexo F.

### **2.4.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA**

**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. En este caso se usó agua destilada, luego se sumerge el sólido de masa también conocida, y se observa la variación del volumen.

**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 algunas soluciones químicas al estar en contacto con el material. Como reactivos se usaron: HCl 10%[v/v], NaOH 10%[p/v], NaCl 35% [p/v], gasolina, varsol y ACPM.

#### **2.4.2.2 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 0,4KN para elastómeros elaborados a partir de aceite de ricino sin modificar (EP Poliol1K) y 10KN para elastómeros elaborados a partir de aceite de ricino modificado (EP Polioles 3K y 5K).

**Ensayo de dureza:** Este ensayo se llevó a cabo conforme a la norma ASTM D758 y se realizó con la finalidad de determinar su capacidad a ser penetrado o rayado.

**Ensayo de resistencia dieléctrica:** El ensayo se ajustó a la norma ASTM D149-09, se empleó exclusivamente para determinar el voltaje de ruptura dieléctrica del material, valor con el cual pasa de ser un aislante y se convierte inmediatamente en un conductor eléctrico. Para el ensayo se utilizó una rampa de crecimiento de 500V/s.

#### **2.4.2.3 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA**

**Análisis Termogravimétrico (TGA):** El comportamiento térmico de las muestras se determinó por termogravimetría; se usó una termo balanza TA

Instruments Universal Analysis 2000 a las siguientes condiciones: velocidad de calentamiento 10°C/min, rango de temperatura entre 25°C y 800°C y flujo de nitrógeno de 50ml/min; se usaron muestras con peso entre 10 y 15 mg.

**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 medidos a temperatura ambiente (25°C).

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 OBTENCIÓN DE ELASTÓMEROS DE POLIURETANO

Se logró obtener elastómeros para un rango de relación NCO/OH entre 0,7 y 1,1; sin embargo sólo las relaciones de 0,8 a 1,0 cumplieron con los criterios de selección establecidos (Tabla 3).

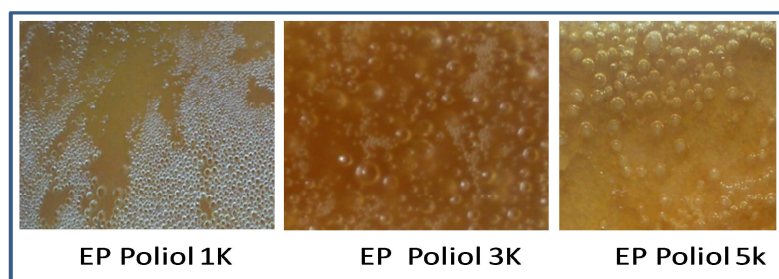
Tabla 3. Resultados del proceso de elección de relaciones NCO/OH.

NOMBRE	RELACIÓN NCO/OH	Tiempo de curado a temperatura ambiente (Horas)	presencia de burbujas
EP Polioli 1K	0,7	36	NO
	0,8	23	NO
	0,9	22	NO
	1,0	22	NO
	1,1	20	SI
EP Polioli 3K	0,7	28	NO
	0,8	20	NO
	0,9	19	NO
	1,0	18	NO
	1,1	16	SI
EP Polioli 5K	0,7	25	NO
	0,8	10	NO
	0,9	11	NO
	1,0	13	NO
	1,1	13	SI

Fuente: autores.

Los elastómeros elaborados usando relaciones NCO/OH superiores a 1,1 presentaron un proceso de polimerización casi instantáneo, lo cual imposibilitó retirar el pre polímero del recipiente de vidrio, mientras que los elaborados usando relaciones NCO/OH inferiores a 0,7 nunca presentaron endurecimiento parcial (Figura 6).

**Figura 6. Relaciones no aceptadas NCO/OH >1,1, presencia de burbujas**



Fuente: autores.

Después de encontrar las relaciones que cumplían con los criterios de selección establecidos, se elaboraron láminas de 15x15 cm de lado y 3 mm de espesor; las condiciones para el proceso de obtención de los elastómeros se establecieron mediante experimentación, presentadas en la Tabla 4.

**Tabla 4. Condiciones usadas en la elaboración de elastómeros de poliuretano.**

NOMBRE	RELACIÓN NCO/OH			TIEMPO DE VACIO (MIN)	TIEMPO DE MEZCLADO (MIN)	TIEMPO DE CURADO A T AMBIENTE (HORAS)
	1,0	0,9	0,8			
EP Polioliol 1K	1,0	0,9	0,8	35	0,5	20
EP Polioliol 3K	1,0	0,9	0,8	8	0,5	17
EP Polioliol 5K	1,0	0,9	0,8	3	0,5	11

Fuente: autores.

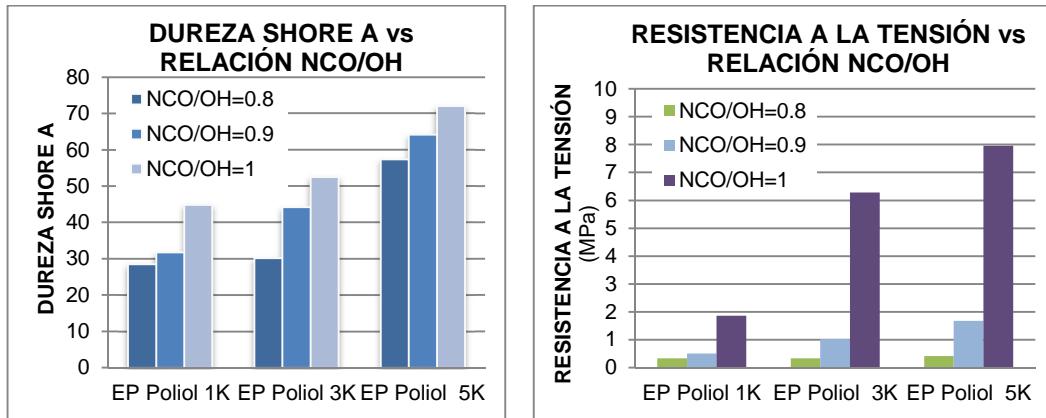
### 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELASTÓMEROS

**3.2.1 PRUEBAS PRELIMINARES:** Como se observa en la Figura 7, los resultados presentaron características típicas en estos tipos de materiales: dureza moderada y valores medios de resistencia a la tensión.

Comparando los elastómeros obtenidos variando la relación NCO/OH para un mismo polioliol, los valores mayores de resistencia a la tensión y dureza se presentaron para los elastómeros con relación NCO/OH=1, debido a que una relación 1:1 entre los grupos funcionales NCO-OH favorece un crecimiento de las cadenas poliméricas aumentando así la estabilidad de la red.

También se pudo observar el efecto que tiene el grado de modificación del aceite sobre las propiedades medidas, logrando incluso aumentar la resistencia a la tensión más del 100% en comparación a los elastómeros obtenidos con aceite de ricino sin modificar.

**Figura 7. Resultados de pruebas preliminares a) Dureza Shore A b) Resistencia a la tensión.**



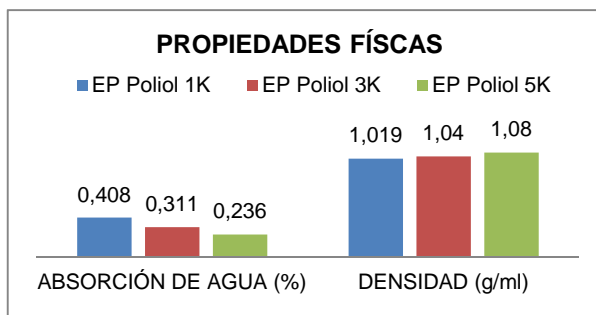
Fuente: autores.

**3.2.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN:** Según los resultados de las pruebas preliminares, se escogieron para la etapa de caracterización y su posterior comparación con materiales de aplicabilidad industrial, elastómeros elaborados con la relación molar NCO/OH=1.

### 3.2.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

**Ensayo de absorción de agua y densidad:** Como se observa en la Figura 8, un aumento en el grado de modificación del aceite implicó una disminución de 23% en la cantidad de agua absorbida por los elastómeros usando un grado medio de modificación del aceite (Polioliol 3K), y de un 42% usando un grado alto de modificación (Polioliol 5K) en comparación a los elastómeros elaborados a partir de aceite de ricino sin modificar (Polioliol 1K); esto se debe a que al presentarse una red de poliuretano más entrecruzada, el proceso de difusión se hace más lento, disminuyendo así la permeabilidad del material.

Figura 8. Resultados ensayo de absorción de agua y densidad de elastómeros de poliuretano con relación NCO/OH=1.

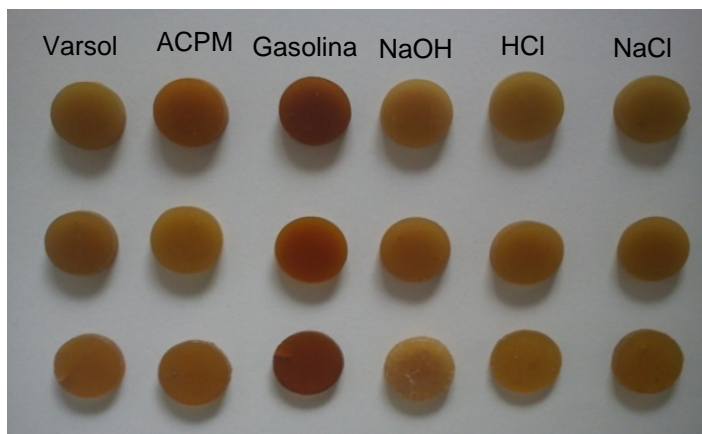


Fuente: autores.

A diferencia de los resultados obtenidos en el ensayo de absorción de agua, la densidad de los elastómeros no presentó un aumento significativo.

**Ensayo de hinchamiento y ataque químico:** Como se observa en la figura 9, las muestras que más presentaron cambios físicos fueron las sumergidas en gasolina, las cuales tomaron una tonalidad similar a la del reactivo y las muestras sumergidas en NaOH que presentaron decoloración y agrietamiento superficial.

Figura 9. Probetas después de realizado el ensayo de hinchamiento y ataque químico.



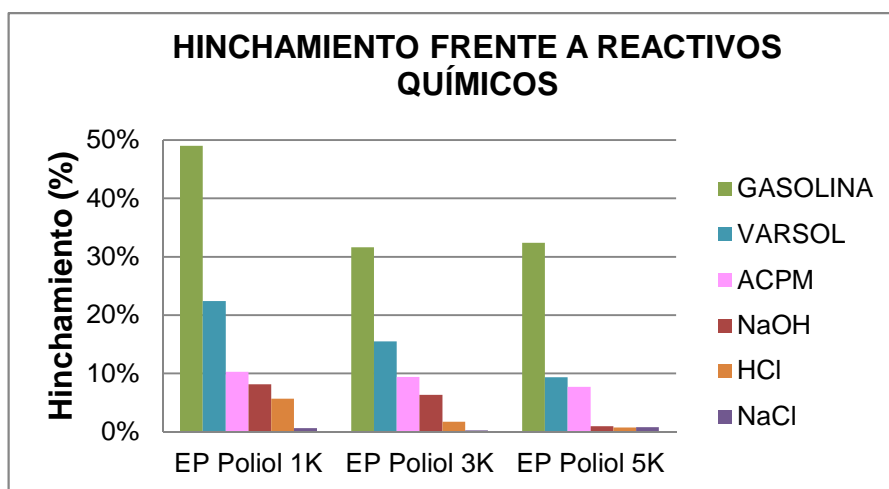
Fuente: autores.

Los resultados del ensayo de hinchamiento se muestran en la Figura 10; no se presentó variación significativa en el peso de las muestras que fueron sumergidas en reactivos inorgánicos (hidróxido de sodio (NaOH) en solución al 10%p/v, ácido clorhídrico (HCl) en solución al 10% v/v, y cloruro de sodio

(NaCl) en solución al 35% p/v); mientras que en el caso de reactivos orgánicos (gasolina, varsol y ACPM), se presentó un aumento considerable de peso debido a la afinidad de estos materiales con sustancias de su misma naturaleza.

Se observó además que el hinchamiento disminuyó con el aumento del grado de modificación del aceite, como resultado de una mayor densidad de entrecruzamiento de las cadenas poliméricas, y, por ende, una menor cantidad de espacios dentro de la red limitando la difusión del reactivo dentro de la red polimérica.

Figura 10. Hinchamiento de elastómeros de poliuretano con relación molar NCO/OH=1.



Fuente: autores.

El ataque químico a las muestras se determinó eliminando la cantidad de reactivo absorbida para lo cual se expusieron las muestras a una temperatura de 50°C durante 4 horas y posteriormente se midió el cambio de peso.

Como resultado se obtuvo que las muestras sumergidas en reactivos inorgánicos a pesar de ser las que presentaban menor hinchamiento, fueron las únicas que reportaron una leve pérdida de peso, mientras que las muestras sumergidas en reactivos orgánicos las cuales presentaban los valores de hinchamiento más altos, recuperaron su peso inicial (Anexo G); esto permitió inferir que el hinchamiento no necesariamente indica un ataque químico por

parte de los solventes hacia el polímero sino que incluso puede traer ventajas al momento de hallarle una posible aplicación.

### 3.2.2.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

**Ensayos de tensión, compresión, dureza y resistencia dieléctrica:** Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 5; en las pruebas de tensión se observa el mismo comportamiento presentado en las pruebas preliminares, dureza moderada, valores medios de resistencia a la tensión, bajo módulo elástico y % de elongación elevada; sin embargo, los valores obtenidos además de ser mayores son más confiables, debido que se usó un equipo que disminuía considerablemente el error que se podía cometer durante el ensayo.

El aumento del módulo elástico y % de elongación de los elastómeros indican que aunque la modificación del aceite le otorga mayor rigidez y dureza a la cadena polimérica, le ofrece la posibilidad de disipar la energía que absorbe a medida que se deforma.

**Tabla 5. Resultados pruebas mecánicas de elastómeros con relación NCO/OH=1.**

	EP Polioli 1K	EP Polioli 3K	EP Polioli 5K
<b>Resistencia a la tensión (MPa)</b>	0,77	1,20	5,54
<b>Elongación (%)</b>	143	184	209
<b>Módulo elástico (MPa)</b>	1,87	2,76	3,74
<b>Dureza Shore A (%)</b>	45	55	77
<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	1,59	70	71
<b>Módulo de compresión (MPa)</b>	3,86	18,21	34,82
<b>Rigidéz dieléctrica (KV/mm)</b>	13,40	16,30	23,20

**Fuente: autores.**

Durante el ensayo de tensión se observó además que la zona del cuello donde sucedía la ruptura no presentaba rasgado, hecho que justifica la curva esfuerzo- deformación donde los valores de esfuerzo de ruptura y esfuerzo de fluencia son los mismos (Anexo G); tampoco se presentó blanqueamiento o presencia de grietas en ninguna parte de la probeta lo que indica que durante el ensayo no hubo concentración de esfuerzo en ningún punto de la probeta.

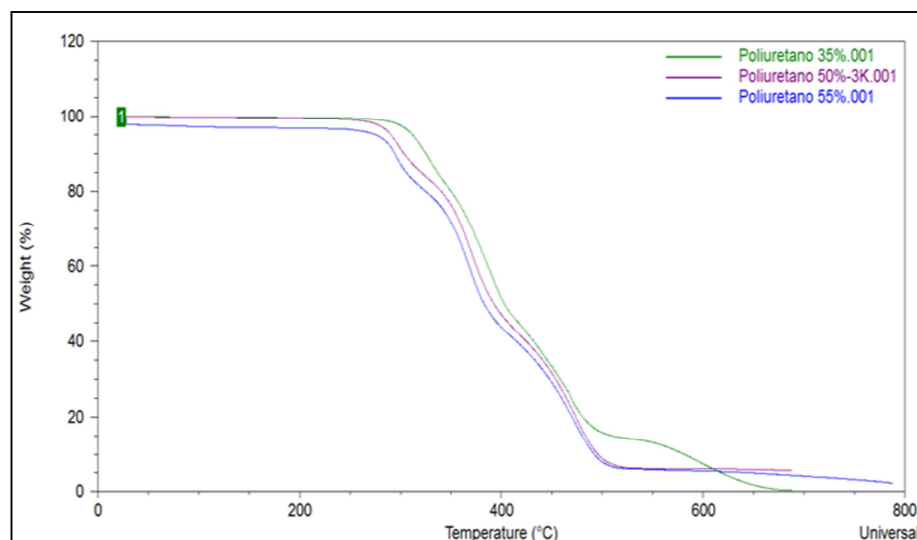
Como se observó en las pruebas preliminares, la dureza de los elastómeros aumentó con el incremento en el grado de modificación del aceite, hecho que se justifica por un mayor grado de entrecruzamiento de la red, proporcionándole además, alta capacidad de resistencia a la carga como se puede ver en los resultados de las pruebas de compresión.

Además, se observó que al aumentar el grado de entrecruzamiento de la red, el material aumenta sus propiedades dieléctricas ya que el elastómero EP Polioli 5K incrementa su rigidez dieléctrica aproximadamente en un 72% comparado con el elastómero EP Polioli 1K cuya estructura presenta el menor grado de entrecruzamiento, mientras que el EP Polioli 3K aumenta su rigidez dieléctrica 21%, afirmando la importancia del grado de entrecruzamiento en esta propiedad.

### 3.2.2.3 CARACTERIZACION TÉRMICA

**Análisis Termogravimétrico (TGA):** Mediante esta prueba se pudo establecer que todas las muestras analizadas son térmicamente estables por debajo de 250°C y pierden más del 90% de su peso después de los 500°C (Figura 11).

**Figura 11. Diagramas termogravimétricos de los elastómeros.**



**Fuente: autores.**

Al comparar los tres termogramas obtenidos de cada muestra se pudo observar que las curvas termo- gravimétricas presentaban el mismo comportamiento con tres regiones definidas:

La primera región corresponde al comienzo de la degradación del material donde volatilizan compuestos de cadena corta presentes en la muestra que no hacen parte de la red de poliuretano sino que simplemente actúan como relleno por ejemplo, compuestos presentes en el isocianato comercial y en el aceite; la segunda región corresponde a la volatilización de las ramificaciones presentes en las moléculas que forman los enlaces uretano pero que no alcanzaron a reaccionar, por ejemplo, secciones de ácidos, ésteres, e incluso grupos isocianato; la tercera región representa el fin del proceso de degradación de las muestras en el que, por efecto de las temperaturas elevadas, se rompen los enlaces uretano volatilizándose así la mayoría de los componentes de la red polimérica.

En la Tabla 6 se listan los puntos representativos del análisis hecho a cada una de las muestras. Se observa que aunque las muestras que provienen de elastómeros sintetizados a partir de aceite de ricino modificado presentan una disminución de peso menos marcada como resultado de un mayor entrecruzamiento de las redes, éstas se empiezan a degradar a temperaturas inferiores a la de los elastómeros sintetizados a partir de aceite de ricino sin modificar, hecho que ya fue estudiado y que se atribuye al uso de glicerol como agente modificante al ser uno de los alcoholes poli hidroxílicos que volatilizan a temperaturas bajas.

**Tabla 6. Temperaturas de descomposición de elastómeros de poliuretano obtenidos a partir de aceite de ricino natural y modificado con glicerol.**

DEGRADACIÓN (%)	TEMPERATURAS DE DESCOMPOSICIÓN (°C)		
	EP Poliol 1K	EP Poliol 3K	EP Poliol 5K
10%	330±5	300±5	300±5
20%	375±5	340±5	325±5
40%	400±5	375±5	360±5
60%	460±5	425±5	420±5
80%	575±5	475±5	475±5
90%	690±5	490±5	500±5
% RESIDUO	Aprox 0	Aprox 7%	Aprox 3%

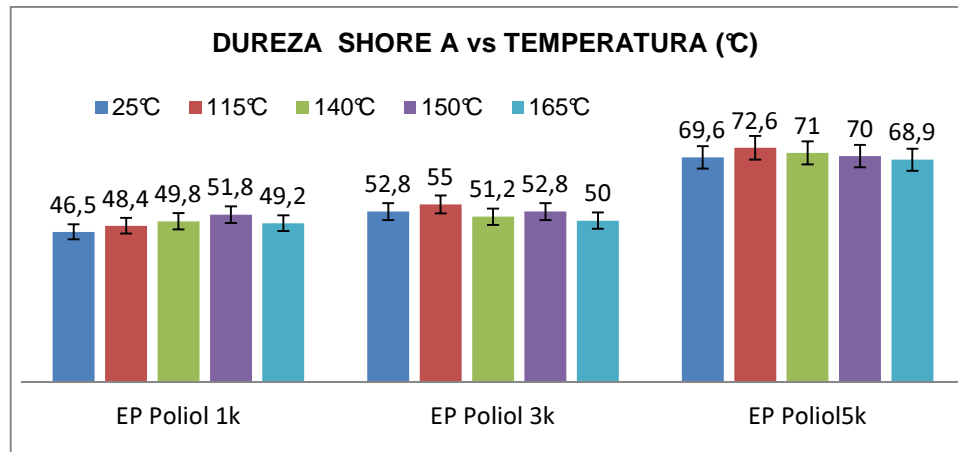
Fuente: autores.

**Ensayo de resistencia térmica:** Después de realizar la prueba, se observó que en el rango de temperaturas usado para el ensayo 25°C-165°C, las muestras no presentaron grietas ni ampollas en su superficie, sólo un cambio de color que se hacía más notorio a medida que aumentaba la temperatura.

Una vez realizado el ensayo de resistencia térmica, se evaluaron posibles cambios en las propiedades originales de dureza y resistencia a la tensión, ilustrados la Figura 12.

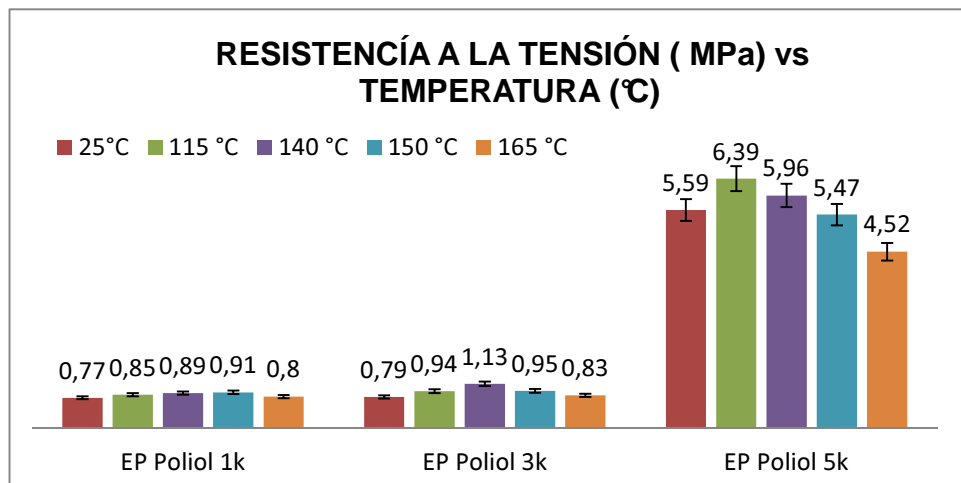
Como resultado se obtuvo que la dureza de los elastómeros no presentó cambios considerables, mientras que la resistencia a la tensión se vió afectada como resultado de un nuevo acomodamiento de las cadenas que forman la red, presentándose mayores cambios para los elastómeros EP Poliol 5K.

Figura 12. Resultados ensayo de resistencia térmica para elastómeros de poliuretano con relación NCO/OH=1 a) Dureza b) Resistencia a la tensión.



a)

Fuente: autores.



b)

Fuente: autores.

Bajo una premisa conservadora, se adoptó como criterio no admitir una disminución superior al 5% en esta propiedad respecto a los valores medidos a 25°C. En consecuencia, los EP Polioles 1K, 3K pueden ser operados a temperaturas hasta de 165°C sin que se vean afectadas su dureza y resistencia a la tensión; mientras que para el elastómero EP Poliol 5K se establece una temperatura de operación máxima de 150°C.

#### **4. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS ELASTÓMEROS**

Para definir criterios de evaluación técnica del material en estudio, los resultados de las pruebas de caracterización de los elastómeros se compararon con un espectro de materiales elastoméricos comerciales reportados en la base de datos de los fabricantes TEADIT, ZENITH, ALL SEAT INCORPORATED, TECNOPRODUCTS, S.L y MATWEB (ver tabla 7). Se tomó el elastómero EP Polioli 5K como referencia de evaluación técnica, por cuanto dispone cuantitativamente de un mejor balance de las características evaluadas.

Mecánicamente el elastómero EP Polioli 5K presenta un desempeño superior tanto en resistencia tensil como en dureza, en comparación a los productos comerciales identificados como Hypalon, SBR, y EPDM.

Térmicamente el elastómero EP Polioli 5K supera en temperatura máxima de operación a los materiales comerciales identificados como Hypalon, Bultyl Rubber, NBR, SBR, EPDM, Caucho natural y Neopreno.

Dieléctricamente el elastómero EP Polioli 5K supera en rigidez dieléctrica a los materiales comerciales identificados como Hypalon, Viton, NBR, SBR, EPDM, Caucho natural y Neopreno.

En consecuencia, se establece que el elastómero EP Polioli 5K puede ser considerado un material de potencial aplicabilidad en la fabricación de elementos industriales, al lograr clasificarlo dentro de un rango de propiedades características de elastómeros comercialmente competitivos, superando incluso algunas propiedades de materiales identificados como Hypalon, SBR, y EPDM.



Tabla 7. Comportamiento de los elastómeros obtenidos frente a elastómeros comerciales\*.

ELASTÓMERO	RESISTENCIA TÉRMICA (°C)	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MPa)	DUREZA SHORE A	RIGIDÉZ DIELECTRICA (KV/mm)	DENSIDAD (g/ml)	COMPRESI- BILIDAD %	ELONGACIÓN %	Soluciones ácidas 10% [V/V]	Soluciones Alcalinas 10%[P/V]	Hidrocarburos alifáticos	Soluciones Alcalinas, Acidas al 40%
Fluoroelastomer (FKM)- Viton	<b>205</b>	11,30	75	18	1,90	3	150	B	B	B	--
SiliconeRubber (SI)	<b>200</b>	7,45	50-60	26	1,20	2	250	M	M	M	M
<b>EP Poliol 1K</b>	<b>165</b>	<b>0,77</b>	<b>45</b>	<b>13</b>	<b>1,02</b>	<b>5</b>	<b>143</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>B</b>	<b>M</b>
<b>EP Poliol 3K</b>	<b>165</b>	<b>1,20</b>	<b>55</b>	<b>16</b>	<b>1,04</b>	<b>3</b>	<b>184</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>--</b>
<b>EP Poliol 5K</b>	<b>150</b>	<b>5,54</b>	<b>77</b>	<b>23</b>	<b>1,08</b>	<b>2</b>	<b>209</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>--</b>
ChlorosulfonatedPolyethyleneR ubber –Hypalon	<b>135</b>	2,80	65	16	1,13	45	430	B	--	B	--
ButylRubber	<b>120</b>	8,00	60	24	1,25	40	550	B	B	M	B
Ethylene-Propylene Rubber (EPDM)	<b>100</b>	5,50	40-60	16	0,86	3	170	B	B	--	B
SyntheticRubber (SBR)	<b>77</b>	2,80	75	18	1,50	50	400	M		M	
NitrileRubber (NBR)	<b>76</b>	6,90	40-80	21	1,25	6	250	B	B	M	B
Natural Rubber (NR)	<b>76</b>	6,90	40-80	17	0,93	30	450	M		M	
ChloropreneRubber (CR) – Neoprene	<b>76</b>	6,20	50-70	12	1,40	7	360	B	B	--	B

Fuente: autores.

\*El comportamiento de los elastómeros frente a diferentes disolventes se clasificó en B: Bueno; M: Malo. Considerando como Bueno el material que no presentara pérdida de peso significativa al estar expuestos a diferentes reactivos.

## **CONCLUSIONES**

Reemplazando polioles convencionales por aceites de origen vegetal, se logró sintetizar materiales con propiedades competitivas al compararlos con materiales elastoméricos tradicionales.

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, el uso de isocianatos comerciales puede ser una alternativa viable en la obtención de elastómeros de poliuretano con aplicabilidad industrial.

Se comprobó que la modificación del aceite de ricino con glicerol mejora las propiedades mecánicas y físico-químicas del material como resultado de un mayor entrecruzamiento de la red de poliuretano; sin embargo las propiedades térmicas no presentan el mismo comportamiento.

Variando el entrecruzamiento de la redes poliméricas se pueden controlar las propiedades de los elastómeros obtenidos de acuerdo a la aplicabilidad que se le quiera dar al material.

## **RECOMENDACIONES**

Basados en los resultados que indican una posible aplicación del poliuretano EP Polioli 5K, se recomienda definir aplicaciones específicas a fin de realizar ensayos complementarios, valorar la viabilidad de procesos de manufactura y la evaluación económica respectiva, para finalmente establecer el grado de competitividad comercial.

Los resultados obtenidos permiten visualizar que un aumento en la resistencia a la tensión y/o en la resistencia térmica, aumentaría ostensiblemente la viabilidad técnica del poliuretano, para lo cual se recomienda realizar evaluaciones y/o el uso de relleno o fibras de refuerzo.

Realizar la transesterificación del aceite de ricino con diferentes agentes modificantes, usando isocianatos comerciales con fin de observar en cambio en las propiedades.

Hacer un estudio de ataque microbiano para evaluar el grado de degradación que alcanza el material puesto que se han encontrado reportes acerca de mecanismos de deterioro y biodegradación con hongos y bacterias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

18. **Athawale, V y Kolekar, S.** *Interpenetrating polymer networks based on oil modified castor oil polyurethane and polymethyl methacrylate.* Mumbai : Elsevier Science, 1998. Vol. 34. 1447-1451.
4. **Bayer, Otto y colaboradores.** *A process for the production of polyurethanes and polyureas.* 1937.
29. **Duarte, Diana y Maria, Valdivieso.** *Obtención y caracterización de elastómeros de poliuretano a partir de aceite de higuera modificado.* Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2004.
9. **F Seniha, Guner, Yusuf, Yagci y A, Tuncer Erciyes.** *Polymers from triglyceride oils.* Istanbul : Elsevier, 2006. Vol. 31.
13. **Gil, Pilonieta, Angélica, Jaramillo, Franklin y Cruz, Riaño, Luis.** *Poliuretanos degradables a partir de aceite de higuera.* Pereira : Scientia et technica Año XIII, 2007. ISSN 0122-1701.
7. **Guerreto Mothelet, Verónica.** *Esperanza ambiental: bacterias contra el poliuretano.* México D.F. : Revista de divulgación de la ciencia UNAM, 2013.
15. <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliuretanos-biogenerados>. *Textos científicos.com.* [En línea] 29 de 11 de 2009.
16. **H. Kumara, A. Anil Kumarb, Siddaramaiah.** *Physico-mechanical, thermal and morphological behaviour of polyurethane/poly(methyl methacrylate) semi-interpenetrating polymer networks.* Bangalore : Elsevier, 2006. Vol. 91. 1097-1114.
24. **H, Yeganeh.** *Preparation and properties of novel biodegradable polyurethane networks based on castor oil and poly(ethylene glycol).* s.l. : Polymer Degradation and Stability, 2007. Vol. 92.
25. **H, Yeganeh.** *Synthesis and properties of biodegradable elastomeric epoxy modified polyurethanes based on poly( $\epsilon$ -caprolactone) and poly(ethylene glycol).* s.l. : European Polymer Journal, 2005. Vol. 41.
10. **Kutz, M.** *Handbook of Environmental Degradation of Materials.* 2005.
30. **M.A. Martínez, H.P. Ramírez.** *Síntesis y caracterización de redes interpenetradas de polímero simultáneamente formadas (SIN) a partir de aceite de higuera modificado y estireno.* Bucaramanga : Trabajo de grado Universidad Industrial de Santander, 2005.

31. **Martínez, Oscar Mauricio, Sánchez, Francisco José y Suárez, Oscar Yesid.** *Producción de ésteres etílicos a partir de aceites vegetales.* Bogotá : Scielo, 2007. ISSN 0120-5609.
26. **Manuel F Valero, Jorge E Pulido y Alvaro Ramírez.** *Síntesis de poliuretanos a partir de poliols obtenidos a partir de aceite de higuera modificado con pentaeritritol.* Bucaramanga : Quim.Nova, 2008. Vol. 31. 2076-2082.
27. **M. F. Valero, J.E. Pulido, A. Ramírez, Zhengdong Cheng**. *Relación estructura propiedades de poliuretanos.* Bucaramanga : revista iberoamericana de polímeros, 2007. Vol. 8.
12. **Moravek, S. J.** *Marine-degradable thermoplastics polyurethane.* s.l. : School of polymers and high performance materials, the University of Southern Mississippi.
23. **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.* Cali : Revista Facultad de Ingeniería Universidad del Valle, 2006.
5. **Oertel, Günter.** *Polyurethane Handbook 2da edicion.* s.l. : Hanser, 1994.
14. **Ogunniyi, D.** *Castor oil: a vital industrial raw material.* Ilorin : ELSEVIER, 2006. Vol. 97.
19. **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.
6. **Proyctado, Asociación técnica del poliuretano.** *El libro blanco del poliuretano.* Madrid : ATEPA, 2009.
1. **Rodríguez, Sandra y Higuera, Luz Stella.** *Elastómeros de Poliuretano a partir de aceite de higuera y almidón de yuca modificado químicamente: síntesis y propiedades fisicoquímicas, fisicomecánicas y térmicas.* Bucaramanga : Proyecto de grado UIS, 2008.
11. **Sharma, V.** *Addition polymers from natural.* s.l. : Progress in Polymer Science, 2006. Vol. 31.
21. **Sonal, Desai,I.M, Thakore, B.D y Sarawade, Shureka.** *Structure-property relationship in polyurethane elastomers containing starch as a crosslinker.* s.l. : Polym.Eng.Sci, 2000. Vol. 40.
20. **TRAN, Ngoc Buu y Vialle, Jean and Pham, Quang.** *Castor oil based based polyurethanes: 1 Structural characterization of castor oil. nature of intact glycerides and distribution of hydroxyl groups.* Vietnam : Elsevier, 1997. Vol. 38.
8. **Trân, Ngoc Buu.** *Castor oil-based polyurethanes: 1. Structural characterization of castor oil - nature of intact glycerides and distribution of hydroxyl groups.* Vietnam : Elsevier, 1997. Vol. 38. PII: S0032-3861.

28. **Valero, Valdivieso, Manuel, Pulido, F.Jorge y Ramírez, García,Álvaro, Cheng, Zhengdong.** *Preparation and properties of polyurethanes based on castor oil chemically modified with yucca starch glycoside.* s.l. : Journal Of Elastomers And Plastics, 2009. Vol. 41. ISSN: 0095-2443
2. **Valero, Manuel F., Pulido, Jorge E. y Ramírez, Álvaro.** *Determinación de la Densidad de Entrecruzamiento de Poliuretanos Obtenidos a partir de Aceite de Ricino Modificado por Transesterificación.* Bucaramanga : Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2009. Vol. 19.
3. **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.* s.l. : Revista Iberoamericana De Polímeros, 2008. Vol. 9. ISSN: 0121-665.
17. **Vu, Cung.** *Castor Oil based polyurethanes for bridge deckings and related applications.* 1989.
22. **V. G. Kumar, M. Rama Rao, T. R. Guruprasad, K. V. C. Rao.** *Correlation of mechanical property, crosslink density and thermogravimetric behavior of castor oil polyurethane– polystyrene divinyl benzene simultaneous IPN networks.* s.l.: Journal of Applied Polymer Science, 1987. Vol. 34. 1803.

## 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 / suprased ® 5005:** isocianato para sistemas de poliuretano distribuido por laboratorios HUNSTMAN. Cartagena.

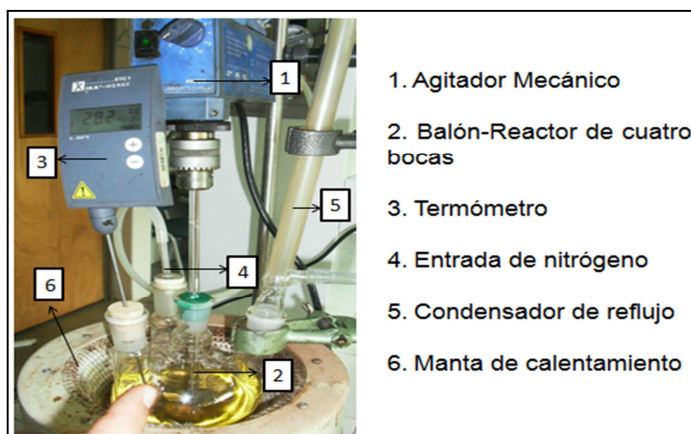
- Funcionalidad aprox: 2,7
- Peso equivalente isocianato : 133
- Contenido NCO (%): 30,2 – 31,5
- Peso molecular promedio: 340 g/mol
- Acidez (ppm HCl): 50-250
- Viscosidad (25 °C):170-250 cps
- Gravedad específica (25 °C):1,23
- Punto de inflamación: 218 °C (medido en Copa Cleveland)
- Presión de vapor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

**Glicerina grado USP:** distribuido por laboratorios León, Bucaramanga.

## Anexo B. Modificación del aceite de ricino mediante reacción de transesterificación con glicerol

Para la reacción de transesterificación del aceite de ricino con glicerol, se empleó un balón-reactor de cuatro bocas acoplado a un sistema de agitación mecánica, un condensador, una termocupla y alimentación de nitrógeno para evitar la oxidación de los productos de reacción, para el control de la temperatura se utilizó una manta de calentamiento (Figura 13).

Figura 13. Montaje para la reacción de transesterificación de aceite de ricino con glicerol.



Fuente: autores.

El balón provisto con el aceite a modificar se sometió a un proceso de agitación mecánica y calentamiento durante toda la reacción; la primera etapa consistió en elevar la temperatura hasta  $110\pm 5$  °C y mantenerla durante 15 minutos con el fin de eliminar trazas de humedad en el aceite; la segunda etapa consistió en elevar la temperatura hasta 120°C momento en el que se adicionaron el catalizador y el glicerol en sus respectivas cantidades, al mismo tiempo se abrieron las llaves de flujo de nitrógeno y del sistema de agua acoplado al condensador; la tercera etapa consistió en elevar la temperatura hasta  $210\pm 5$  °C y mantenerla durante 2 horas (tiempo de reacción).

### **Anexo C. Cálculo índice de hidroxilo**

El índice de hidroxilo de los polioles obtenidos se determinó según la norma ASTM D 1957-86; éste es una medida importante para establecer la reactividad de compuestos con grupos funcionales OH.

**Materiales y reactivos:** Balón redondo de 250 ml, condensador, manta de calentamiento, vaso de precipitado 1000 ml, agua destilada, anhídrido acético, alcohol n-butílico, alcohol etílico, fenolftaleína como indicador, hidróxido de potasio en solución alcohólica 0,5 N, piridina, solución piridina – anhídrido acético (3+1 en volumen).

**Procedimiento:** Se pesan 2 g de muestra (poliol) en un balón redondo de 250 ml y se agregan 5 ml de la solución piridina - anhídrido acético; la muestra se calienta en baño maría durante una hora (debe agitarse cada 5 minutos aproximadamente); luego se agregan por la boca del condensador 10 ml de agua destilada, y se calienta por 10 minutos más. Cuando la muestra este fría se le agregan 25 ml de butanol neutralizado. Finalmente se titula con una solución de KOH 0,5 N.

A continuación se pesan 9 a 11 g de la muestra en otro balón, para determinar el valor ácido, se adicionan 10 ml de piridina neutralizada. La muestra se calienta en baño maría durante una hora (agitándola cada 5 minutos aproximadamente); luego se agregan por la boca del condensador 10 ml de agua destilada, y se calienta por 10 minutos más. Cuando la muestra este fría se le agregan 25 ml de butanol neutralizado. Finalmente se titula con una solución de KOH 0,5 N.

Para determinar el blanco se toman 5ml de la solución piridina – anhídrido acético. Se calienta en baño maría durante una hora (la muestra debe agitarse cada 5 minutos aproximadamente); luego se agregan por la boca del condensador 10 ml de agua destilada, y se calienta por 10 minutos más. Cuando la muestra este fría se le agregan 25 ml de butanol neutralizado. Finalmente se titula con una solución de KOH 0,5 N.

$$\text{ÍNDICE DE HIDROXILO} = \frac{N * (56,1) * (B + \frac{S * A}{C} - V)}{S}$$

N: normalidad de la solución KOH

B: volumen de KOH para el blanco en ml

S: gramos de polirol de la muestra

A: volumen de KOH para el valor ácido en ml

C: gramos de polirol en el valor ácido

#### Anexo D. Cálculo de relación estequiométrica NCO/OH

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

Para el cálculo de # moles de hidroxilo se tiene:

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

Donde IH representa el índice de hidroxilo de cada poliol.

Para el cálculo de # moles de isocianato se tiene:

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

La funcionalidad aproximada y el peso molecular promedio del isocianato comercial se encuentran en el anexo A.

**Anexo E. Listado de cantidad de reactivos usados en la preparación de elastómeros de poliuretano.**

La cantidad de polioliol usada es constante e igual a 60 gramos.

**Tabla 8. Cantidad de reactivos usados en la preparación de elastómeros.**

NOMBRE	RELACIÓN NCO/OH	MDI polimérico (gramos)
EP POLIOL 1k	0,7	14,9
	0,8	17,2
	0,9	19,3
	1,0	21,5
	1,1	23,5
EP POLIOL 3K	0,7	21,6
	0,8	25,1
	0,9	28,1
	1,0	31,2
	1,1	33,9
EP POLIOL 5K	0,7	23,6
	0,8	26,1
	0,9	29,4
	1,0	33,6
	1,1	37

Fuente: autores.

## **Anexo F. Ensayos de caracterización**

### **Pruebas preliminares:**

**Ensayo de tensión:** el ensayo de tensión se ajustó a la norma ASTM D638, debido al elevado número de probetas, las pruebas se realizaron en la maquina universal modelo TWO SPEED DRIVE ubicada en el laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química, la prueba se realizó por triplicado bajo las siguientes condiciones: carga aplicada de 21,15 N y temperatura  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ .

### **Ensayos de Caracterización :**

**Ensayo de absorción de agua:** Este ensayo fue basado en la norma STANDARD TEST METHOD FOR WATER ABSORPTION OF PLASTICS ASTM D570 – 98.

**Procedimiento:** El ensayo se realiza por triplicado y bajo condiciones de laboratorio: presión atmosférica y a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Se inicia cortando con un troquel probetas en forma de barra con dimensiones de 76,2 mm de largo por 25,4 mm de ancho por el grosor del material (3 mm). La muestras ingresan a un horno a  $50 \pm 3^\circ\text{C}$  en el cual permanecen durante 24 horas. Se retira la muestra dejándola enfriar y se pesa con una tolerancia de 0,001 g. A continuación la muestra es sumergida completamente en un recipiente con agua destilada a temperatura ambiente apoyada en un borde, permaneciendo inmersa durante  $24 \pm \frac{1}{2}$  h.

Al finalizar el tiempo de inmersión, la muestra es retirada de la solución posteriormente se seca la superficie con un trapo seco y se pesa con una tolerancia de 0,001 g.

Finalmente se halla el incremento en peso, mediante la siguiente formula

$$\text{Incremento en peso}\% = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} * 100$$

**Ensayo de densidad:** Este experimento se hizo siguiendo el principio de Arquímedes.

**Procedimiento:** El ensayo se realiza por triplicado y bajo condiciones de laboratorio: presión atmosférica y a una temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Se inicia cortando con un troquel probetas en forma de barra con dimensiones de 76,2 mm de largo por 25,4 mm de ancho por el grosor del material (3 mm). Posteriormente se pesan las muestras con una tolerancia de 0,001 g. A continuación, las probetas se sumergen completamente en un vaso precipitado de 250 ml que contiene agua destilada, e inmediatamente se mide el volumen desplazado por la muestra.

Finalmente con el volumen desplazado por la muestra y su peso inicial antes de su inmersión, se calcula la densidad.

**Ensayo de hinchamiento y ataque químico:** El ensayo es basado en la norma STANDARD PRACTICES FOR EVALUATING THE RESISTANCE OF PLASTICS TO CHEMICAL REAGENTS ASTM D543 – 06. Los solventes utilizados en este caso son: gasolina, varsol, ACPM, salmuera, hidróxido de sodio (NaOH) al 10% en peso, ácido clorhídrico (HCl) al 10% en volumen.

**Procedimiento:** El ensayo se realiza por triplicado y bajo condiciones de laboratorio: presión atmosférica y una temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Se procede a cortar con un troquel probetas con dimensiones sugeridas por la norma en forma de disco de diámetro 50,80 mm y espesor de 3,175 mm. A continuación se realiza el pesado de cada muestra por separado, la medición de su diámetro y espesor, con una precisión de 0,025 mm. Se sumerge cada disco en un recipiente apropiado para los reactivos que se utilizan, asegurándose que las muestras estén totalmente sumergidas sin tener contacto con las paredes y el fondo del recipiente; la muestra debe permanecer en solución durante 7 días en la atmósfera estándar de laboratorio.

Se retiran las muestras de cada reactivo y se procede inmediatamente a secar, pesar y medir sus dimensiones (espesor y diámetro). Después se introduce a

un horno a 50°C en el cual debe permanecer por 4 ho ras, posteriormente pesar y medir sus dimensiones (espesor y diámetro).

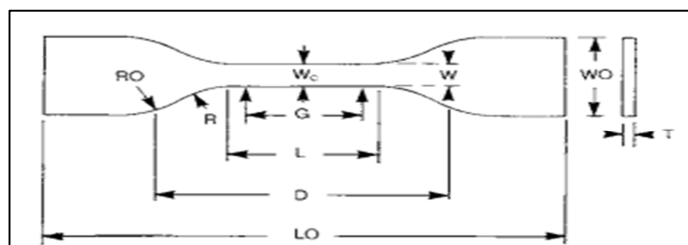
Finalmente se calcula el % de hinchamiento

$$\% \text{ Hinchamiento} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso final}} * 100$$

**Ensayo de tensión:** El ensayo se ajustó a la norma STANDARD TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTIES OF PLASTICS ASTM D638, se realiza con la finalidad de observar el comportamiento que posee el polímero al estar sometido a esfuerzos sin producirse cuarteamiento, ruptura o presentar alguna forma de falla. Consiste en aplicar una carga de tensión a una velocidad determinada hasta lograr niveles de deformación plástica de la probeta, la cual se encuentra simétricamente apoyada sobre la superficie de un mandril de diámetro conocido.

**Procedimiento:** El ensayo se realiza por triplicado y bajo condiciones de laboratorio: presión atmosférica y a una temperatura de 23±2°C. Se procede a cortar con un troquel probetas con las siguientes dimensiones sugeridas por la norma (ver figura 14 y tabla 9); a continuación marca cada probeta para poder medir posteriormente el alargamiento máximo experimentado. Se procede a colocar en la máquina de ensayo la probeta sujeta por las mordazas, con una carga aplicada de 400 Newton y una velocidad de prueba de 2,5 cm/min.

**Figura 14. Forma de probetas para ensayo de tensión.**



**Tabla 9. Dimensiones de las probeta del ensayo de tensión**

L	$W_c$	WO	D	LO
40 mm	6mm	3mm	6.5 mm	11.4 mm

Fuente: autores.

El proceso se realiza hasta la ruptura de la muestra, registrando de la curva Esfuerzo (MPa)-Deformación (mm). La muestra partida en dos se toma, se mide el calibre de reducción de área indicando el porcentaje de reducción; de igual manera se mide la longitud final de la muestra reportando el porcentaje de elongación.

Por último se reportan valores de módulo de elasticidad, porcentaje de elongación y esfuerzo de ruptura.

**Ensayo de compresión:** Este ensayo se ajustó a la norma STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE PROPERTIES OF RIGID PLASTICS D695 – 10.

**Procedimiento:** El ensayo se realiza por triplicado y bajo condiciones de laboratorio: presión atmosférica y temperatura de  $23\pm 2^\circ\text{C}$ . Se procede a cortar con un troquel probetas con dimensiones según la norma en forma cilíndrica con 25,4 mm de altura y 12 mm de diámetro, se calcula y registra el valor del área de sección transversal; se coloca la muestra entre las superficies de la herramienta de compresión teniendo en cuenta que los extremos de la muestra sean paralelos a la superficie de la herramienta de compresión, ajustando el cabezal de la máquina de ensayo hasta que solo estén en contacto la parte superior del embolo y la herramienta de compresión, se ajusta el control a una velocidad y carga establecidas según el material y se enciende la máquina.

Registre la carga máxima soportada por el espécimen durante la prueba (por lo general esta será la carga en el momento de ruptura); en caso de no llegar al momento de la ruptura, se aumenta la carga hasta ocasionar la falla a la probeta.

Registre la gráfica esfuerzo-deformación y reporte valores de resistencia a la compresión dividiendo la carga máxima a la compresión soportada por la muestra en la prueba entre el área de sección transversal inicial; límite elástico de compresión dividiendo la carga soportada por la muestra en el punto de fluencia por el área mínima de sección transversal original del espécimen y Módulo de elasticidad trazando una tangente a la parte lineal de la curva carga-deformación, seleccione cualquier punto en la parte de la línea recta y divida el esfuerzo de compresión representada por este punto por la tensión correspondiente, medida desde el punto donde se extiende la tangente a la línea recta y corta el eje de tensión.

**Ensayo de resistencia térmica:** Este ensayo no normalizado se realizó de la siguiente manera: se cortaron probetas con las dimensiones fueron las referenciadas en la norma y se sometieron a temperatura durante 24 horas (la temperaturas usadas en este ensayo fueron (115°C, 140°C, 150°C y 165°C). A continuación se sacaron y se sumergieron en agua a 24°C durante 30 minutos; después se observaron cambios físicos y se realizaron ensayos de dureza y tensión.

## Anexo G. Resultados pruebas decisivas

### Caracterización físico-química:

Tabla 10. Resultados promedio prueba de hinchamiento:

REACTIVOS	EP Polioliol 1K			EP Polioliol 3K			EP Polioliol 5K		
	Peso Inicial	Peso Final	% Hinchamiento	Peso Inicial	Peso Final	% Hinchamiento	Peso Inicial	Peso Final	% Hinchamiento
ACPM	0,623	0,687	10,273	0,736	0,805	9,420	0,735	0,791	7,692
NaOH	0,659	0,712	8,132	0,714	0,785	10,062	0,788	0,796	0,977
GASOLINA	0,612	0,911	49,011	0,748	0,985	31,600	0,807	1,068	32,392
NaCl	0,714	0,718	0,631	0,807	0,809	0,235	0,801	0,808	0,824
VAR SOL	0,654	0,801	22,409	0,768	0,887	15,482	0,816	0,892	9,363
HCl	0,683	0,721	5,664	0,761	0,774	1,742	0,798	0,804	0,739

Fuente: autores.

Tabla 11. Resultados promedio prueba de ataque químico:

REACTIVOS	EP Polioliol 1K			EP Polioliol 3K			EP Polioliol 5K		
	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida de peso	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida de peso	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida de peso
ACPM	0,623	0,629	0.006	0,736	0,798	0.062	0,735	0,791	0.056
NaOH	0,659	0,631	-0.027	0,714	0,695	-0.019	0,788	0,78	-0.008
GASOLINA	0,612	0,704	0.032	0,748	0,768	0.020	0,807	0,82	0.013
NaCl	0,714	0,70	-0.014	0,807	0,787	-0.02	0,801	0,794	-0.007
VAR SOL	0,654	0,661	0.007	0,768	0,78	0.012	0,816	0,822	0.006
HCl	0,761	0,685	-0.076	0,683	0,667	-0.016	0,798	0,799	0.001

Fuente: autores.

Tabla 12. Resultados promedio prueba de absorción de agua:

ABSORCIÓN DE AGUA			
Relación	Peso húmedo	Peso seco	% Hinchamiento
EP Polioliol 1K	2,562	2,572	0,408
EP Polioliol 3K	2,8236	2,832	0,311
EP Polioliol 5K	4,0232	4,033	0,236

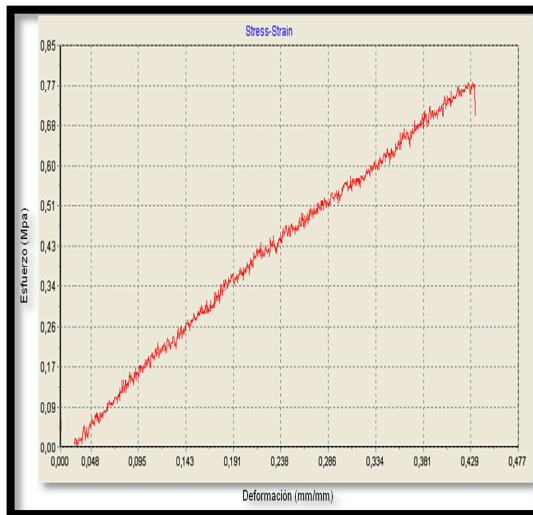
Tabla 13. Resultados promedio prueba de densidad:

NOMBRE	DENSIDAD		
	MASA PROMEDIO [g]	VOLUMEN DESPLAZADO [ml]	DENSIDAD APARENTE [g/ml]
EP Polioliol 1K	1,256	1,233	1,019
EP Polioliol 3K	1,318	1,267	1,040
EP Polioliol 5K	1,547	1,433	1,080

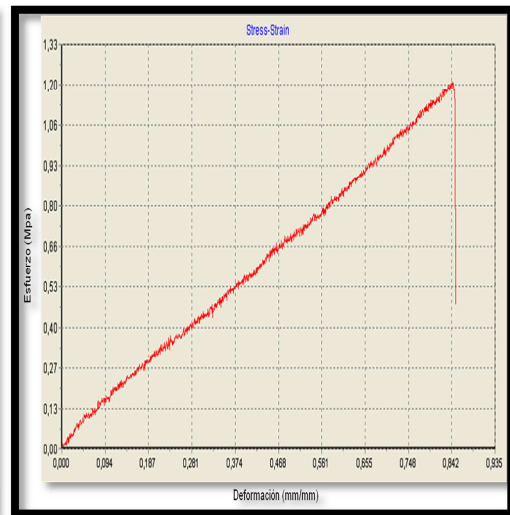
Fuente: autores.

## Caracterización físico-mecánica:

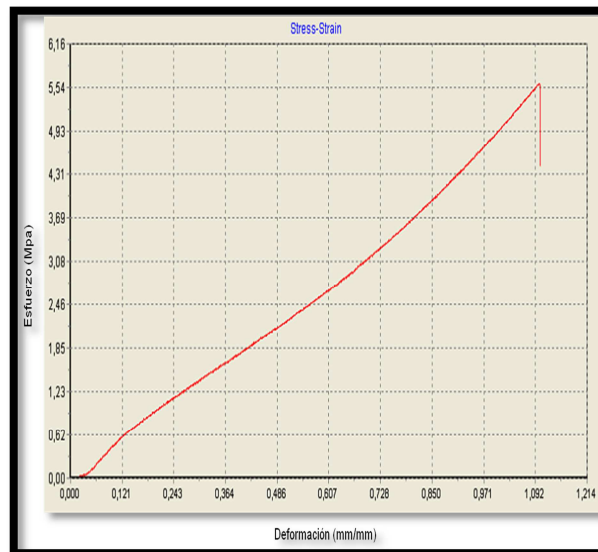
Figura 15. Gráficas Esfuerzo-deformación del ensayo de tensión para elastómeros de poliuretano: a) EP Polioli 1K, b) EP Polioli 3K, c) EP Polioli 5K.



a)



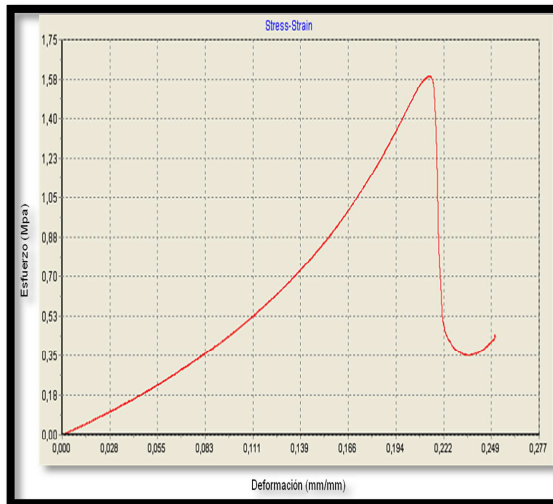
b)



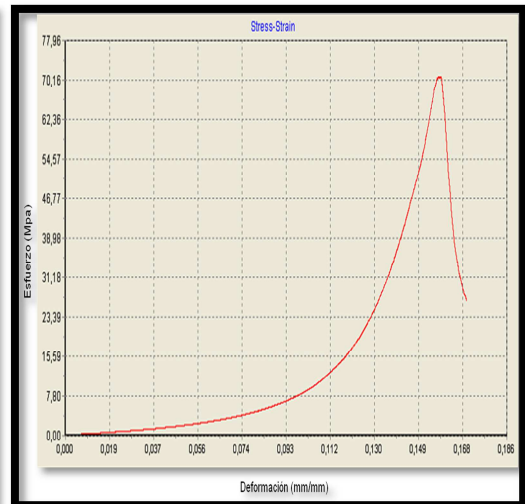
c)

Fuente: autores.

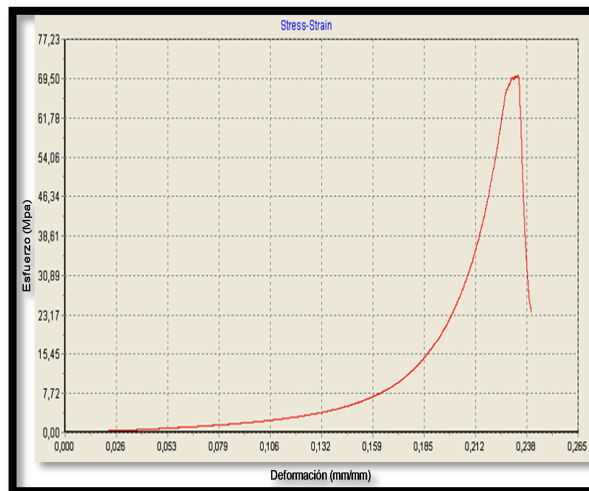
Figura 16. Gráficas Esfuerzo- deformación del ensayo de compresión para elastómero de poliuretano a) EP Polioli 1K, b) EP Polioli 3K, c) EP Polioli 5k.



a)



b)



c)

Fuente: autores.

## Anexo H. Comparación de elastómeros de poliuretano vs elastómeros comerciales:

Tabla 14. Posicionamiento de los elastómeros de poliuretano dentro del rango de valores de Resistencia a la tensión.

ELASTÓMERO	Resistencia a la Tensión (MPa)	Dureza (Shore A)	Resistencia Térmica (°C)
Fluoroelastomer (FKM)- Viton	11,38	75	205
Butyl Rubber	8,00	60	120
Silicone Rubber (SI)	7,45	50-60	200
Nitrile Rubber (NBR)	6,90	40-80	76
Natural Rubber (NR)	6,90	40-80	76
Chloroprene Rubber (CR) –Neoprene	6,20	50-70	76
<b>EP Polioli 5K</b>	<b>5,54</b>	<b>77</b>	<b>140</b>
Ethylene-Propylene Rubber (EPDM)	5,50	40-60	100
Synthetic Rubber (SBR)	2,80	75	77
Chlorosulfonated Polyethylene Rubber – Hypalon	2,80	65	135
<b>EP Polioli 3K</b>	<b>1,20</b>	<b>55</b>	<b>150</b>
<b>EP Polioli 1K</b>	<b>0,77</b>	<b>45</b>	<b>165</b>

Fuente: autores.

Tabla 15. Posicionamiento de los elastómeros de poliuretano dentro del rango de valores de Resistencia térmica y dureza.

ELASTÓMERO	Resistencia a la Tensión (MPa)	Dureza (Shore A)	Resistencia Térmica (°C)
Fluoroelastomer (FKM)- Viton	11,38	75	205
Silicone Rubber (SI)	7,45	50-60	200
<b>EP Polioli 1K</b>	<b>0,77</b>	<b>45</b>	<b>165</b>
<b>EP Polioli 3K</b>	<b>1,20</b>	<b>55</b>	<b>150</b>
<b>EP Polioli 5K</b>	<b>5,54</b>	<b>77</b>	<b>140</b>
Butyl Rubber	8,00	60	120
Chlorosulfonated Polyethylene Rubber – Hypalon	2,80	65	135
Ethylene-Propylene Rubber (EPDM)	5,50	40-60	100
Synthetic Rubber (SBR)	2,80	75	77
Nitrile Rubber (NBR)	6,90	40-80	76
Natural Rubber (NR)	6,90	40-80	76
Chloroprene Rubber (CR) –Neoprene	6,20	50-70	76

Fuente: autores.