

EVALUACIÓN DEL USO DE FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS PARA EL
REFORZAMIENTO DE ESPUMAS DE POLIURETANO A NIVEL LABORATORIO

WILLIAM FERNEY GARCÍA CAMACHO
LINA MARÍA VELÁSQUEZ BARACALDO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

EVALUACIÓN DEL USO DE FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS PARA EL
REFORZAMIENTO DE ESPUMAS DE POLIURETANO A NIVEL LABORATORIO

WILLIAM FERNEY GARCÍA CAMACHO
LINA MARÍA VELÁSQUEZ BARACALDO

Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

MARTHA LUCIA MALAGÓN M.
INGENIERA QUÍMICA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

Nota de aceptación (Dirección de Investigación)

Martha Lucía Malagón M.

Felipe Correa Mahecha

Yovanny Morales Hernández

Bogotá D.C, Marzo 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano de Facultad de Ingeniería

Dr. Julio César Cifuentes Arismendi

Director de Investigaciones

Ing. Armando Fernández Cárdenas

Director Programa Ingeniería Química

Dr. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

No existe nada más satisfactorio que cumplir uno de tus sueños y metas ... Hoy obtengo un éxito más en mi vida y va dedicado en primera instancia a Dios, quien día a día me llena de bendiciones, salud e inteligencia. Durante el camino, siempre estuviste conmigo Papá Dios y ante cualquier dificultad que se presentaba, hacías presencia para guiarme y poder dar solución a todos los problemas.

A mi familia, que la conforman papá, mamá y hermana; ustedes fueron mi motivación e inspiración en el transcurso del tiempo universitario, gracias infinitas por sus oraciones y sabios consejos, que me llevaron a ser cada vez mejor persona en todos los aspectos de mi vida. Papá, gracias por creer en mí, por apoyarme y por haber sido el motor de arranque en el estudio universitario. Mamá, gracias por ser mi primera maestra en las matemáticas, por escucharme, por continuar y finalizar con la labor de papá. Hermana, gracias por preocuparte tanto por mí, por ser una persona autónoma con tan rígido carácter, Dios te bendiga hoy, mañana y siempre.

Por otra parte, a mis mejores amigos, conocidos y demás personas que conocí en esta etapa, quienes fueron parte fundamental en el desarrollo del proyecto. Llevo en mi corazón, de manera muy especial a Lina C., Paula B., Leonardo C., Melissa P. y por supuesto a mi fiel compañera de trabajo de grado, Lina María Velásquez Baracaldo, que fuiste el cerebro de esta gran idea; a ti, te respeto y te admiro porque eres una gran mujer, e independientemente de que hayas logrado aguantar mis locuras y mis caprichos, me enseñaste y aprendí muchas cosas de ti, las guardo en lo más profundo de mi ser y te quiero mucho, así no nos lo demostremos con afecto tradicional, una sonrisa o una mandarina que compartamos juntos, siempre serán símbolo de ésta gran amistad, éxitos y bendiciones para ti y tu familia.

William García

DEDICATORIA

La culminación de este proyecto se la dedico a todas las personas que hacen parte de mi vida. Siempre me he caracterizado por ser una mujer de pocas palabras, así que lo poco que diré es con sinceridad y con todo lo que mi alma es capaz de expresar.

Primero que todo a mi familia, que son y serán siempre mi apoyo incondicional; mi madre que es una mujer fuerte y admirable, gracias por dedicar tu vida para sacar a delante a mis hermanos y a mí, sólo espero que el tiempo me alcance para regresarte todo lo que nos has brindado; a mi padre, que sin saber me enseñó lo valioso en las pequeñas cosas; a mis hermanos, por todos los momentos y las enseñanzas compartidas mientras crecimos.

La vida me enseñó que son pocas las veces en la vida que encontramos personas que valen la pena mantener cerca. Durante esta etapa de mi vida, tuve la oportunidad de conocer y compartir con diversas personas, a quienes llegué a conocer de verdad muchas gracias por todo y siempre los llevare en mi corazón.

Lina V.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Ingeniera Martha Malagón, directora del proyecto por toda su disposición, orientación y colaboración durante la realización de este proyecto.

Ingeniero Mauricio Herrera, asesor del proyecto por todos sus valiosos consejos y aportes, además de su dedicación y continua motivación durante el desarrollo experimental.

Ingeniera Yuli Sánchez, por ayudarnos a conseguir una muestra de microcristales de celulosa de DuPont.

A nuestra amiga Angélica P. Corredor, por ayudarnos a conseguir el reactivo de análisis que tanto nos costó encontrar y brindarnos su apoyo incondicional.

Ingenieros Mauro Hernández y Carlos Mauricio Veloza, por toda su colaboración y gestión para poder llevar a cabo los análisis en el centro de materiales y ensayos del SENA.

Por todo esto y muchas cosas más que no es posible expresar en palabras nuestra gratitud.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
OBJETIVOS	24
1. MARCO TEÓRICO	25
1.1 GENERALIDADES DE LOS POLIURETANOS	25
1.2 ISOCIANATOS	26
1.3 POLIOLES	31
1.3.1 Biopolióles	31
1.4 CATALIZADORES, SURFACTANTES Y AGENTES ESPUMANTES	34
1.4.1 Catalizadores	34
1.4.2 Surfactantes	34
1.4.3 Agentes espumantes	35
1.5. ESPUMAS RÍGIDAS	36
1.6 MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	39
1.6.1 Celulosa	39
1.6.2 Lignina	40
1.6.3 Cascarilla de arroz	40
1.6.4 Cáscara de mango	42
1.6.5 Microcristales de celulosa	43
2. METODOLOGÍA	44
2.1 CARACTERIZACIÓN FIBRAS	44
2.1.1 Porcentaje de Humedad	44
2.1.2 Determinación de cantidad de lignina	44
2.1.3 Determinación de cantidad de celulosa	44
2.1.4 Determinación del número de OH	44
2.2 FORMACIÓN DE LAS ESPUMAS	45
2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPUMAS	45
2.3.1 Densidad aparente	45
2.3.2 Absorción de agua	46
2.3.3 Resistencia a la tensión	46
2.3.4 Espectroscopia FTIR	46

3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	47
3.1 REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS DE ORDEN 3	53
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
4.1 PRETRATAMIENTO FÍSICO	56
4.2 CARACTERIZACIÓN FIBRAS	59
4.2.1 Porcentaje de Humedad	59
4.2.2 Determinación de cantidad de lignina	60
4.2.3 Determinación de cantidad de celulosa	60
4.2.4 Determinación del número de OH	61
4.3 FORMACIÓN DE LAS ESPUMAS	62
4.3.1 Pruebas preliminares	62
4.3.2 Formulación final	67
4.4 CARACTERIZACIÓN ESPUMAS	69
4.4.1 Reducción del encogimiento	71
4.4.2 Densidad aparente	71
4.4.3 Absorción de agua	73
4.4.4 Resistencia a la tensión	75
4.4.5 Espectroscopia infrarroja FTIR	77
5. ANÁLISIS BENEFICIO COSTO	82
5.1 COSTOS DE MATERIAS PRIMAS	82
5.2 RELACIÓN BENEFICIO/COSTO	86
6. CONCLUSIONES	88
7. RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	95

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Reacción entre isocianato y un alcohol	25
Figura 2. Reacción entre un diisocianato y un poliol	26
Figura 3. Estructura del MDI	27
Figura 4. Estructura reacción isocianato - agua	28
Figura 5. Estructura reacción isocianato - amina	29
Figura 6. Estructura reacción isocianato - úrea	29
Figura 7. Estructura reacción isocianato - uretano	30
Figura 8. Estructura reacción con isocianatos aromáticos	30
Figura 9. Esquema de la estructura molecular del poliuretano a partir de MDI y poliol vegetal	33
Figura 10. Catalizadores usados en la síntesis de poliuretanos	34
Figura 11. Estructura general de la silicona	35
Figura 12. Tipo de celdas en las espumas de poliuretano	36
Figura 13. Estructura molecular celulosa	40
Figura 14. Monómeros primarios lignina	40
Figura 15. Cascarilla de arroz	41
Figura 16. Mango de la variedad Keitt	42
Figura 17. Polvo de cáscara de mango (105-125 μm)	58
Figura 18. Polvo de cascarilla de arroz (105-149 μm)	58
Figura 19. Microcristales de celulosa (45-105 μm)	59
Figura 20. Crecimiento de espuma ensayo 2 bajo condiciones ambientales	63
Figura 21. Celdas irregulares del ensayo número 6	65
Figura 22. Estructura de las espumas para los ensayos con cáscara de mango	69
Figura 23. Estructura de las espumas para los ensayos con cascarilla de arroz	70
Figura 24. Estructura de las espumas para los ensayos con microcristales de celulosa	70

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Efecto en la densidad en kg/m ³	48
Tabla 2. Tabla ANOVA	52
Tabla 3. Peso de cáscaras de mango antes y después del primer secado	56
Tabla 4. Cantidad de cáscaras de mango y arroz, antes y después de moler	57
Tabla 5. Número y diámetro de abertura de las mallas seleccionadas y porcentaje retenido en cada una de ellas para cada tipo de cáscaras	57
Tabla 6. Valores de humedad para cada una de las muestras de fibra	59
Tabla 7. Contenido de lignina en las muestras de fibra	60
Tabla 8. Contenido de celulosa en las muestras de fibra	60
Tabla 9. Número de OH para cada una de las muestras	61
Tabla 10. Formulación ensayos preliminares	63
Tabla 11. Formulación espumas con adición de aceite de ricino	66
Tabla 12. Formulación espumas para evaluación	68
Tabla 13. Tiempos de crecimiento de las espumas preparadas	68
Tabla 14. Pérdida de volumen en algunas de las muestras de espuma preparadas	71
Tabla 15. Costos de materia prima	82
Tabla 16. Costo por kg de espuma para diferentes porcentajes de reemplazo	83
Tabla 17. Costos de inversión	85
Tabla 18. Costos de consumo energético mensual de los equipos	85
Tabla 19. Densidad, cantidad de CA y precio por kg para una espuma con 20% de reemplazo	86

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Estudios de poliuretanos con biopoliolos	32
Cuadro 2. Características cualitativas de los primeros ensayos preliminares	64
Cuadro 3. Equipos requeridos para las nuevas etapas	84

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Distribución F	53
Diagrama 2. Diagrama de bloques de etapas adicionales para tratar las CA y CM	84

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Número total de datos	49
Ecuación 2. Suma total de datos	49
Ecuación 3. Suma de cuadrados totales	49
Ecuación 4. Suma de cuadrados entre factor A	49
Ecuación 5. Suma de cuadrados entre factor B	49
Ecuación 6. Suma de cuadrados entre interacción AB	50
Ecuación 7. Suma de cuadrados del error residual	50
Ecuación 8. Grados de libertad factor A	50
Ecuación 9. Grados de libertad factor B	50
Ecuación 10. Grados de libertad factor AB	50
Ecuación 11. Grados de libertad error residual	50
Ecuación 12. Grados de libertad número de datos	50
Ecuación 13. Cuadrado medio de A	51
Ecuación 14. Cuadrado medio de B	51
Ecuación 15. Cuadrado medio de la interacción A B	51
Ecuación 16. Cuadrado medio del error residual	51
Ecuación 17. Cuadrado medio total	51
Ecuación 18. Distribución FAC (calculado) y FAT (tablas)	51
Ecuación 19. Distribución FBC (calculado) y FBT (tablas)	52
Ecuación 20. Distribución FABC (calculado) y FABT (tablas)	52
Ecuación 21. Función densidad	53
Ecuación 22. Derivadas parciales de t_i con respecto a A_i , B_i y C_i	54
Ecuación 23. Densidad en función del porcentaje reemplazo de CM	54
Ecuación 24. Densidad en función del porcentaje reemplazo de CA	54
Ecuación 25. Densidad en función del porcentaje reemplazo de MCC	54
Ecuación 26. Pérdida de humedad cáscara de mango	56
Ecuación 27. Porcentaje de humedad cáscaras	59
Ecuación 28. Peso equivalente MDI	61
Ecuación 29. Cálculo número de OH a partir de peso equivalente	61
Ecuación 30. Índice de NCO	62
Ecuación 31. Gramos de fibra para formulación	62
Ecuación 32. Gramos de poliol comercial para formulación	63
Ecuación 33. Cálculo densidad aparente	72
Ecuación 34. Cálculo porcentaje absorción de agua	73

Ecuación 35. Cálculo resistencia a la tensión	75
Ecuación 36. Cálculo beneficio/costo	87
Ecuación 37. Relación B/C	87

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Efecto en la densidad para los ensayos con Aceite de Ricino	67
Gráfica 2. Efecto del porcentaje de reemplazo OH en la densidad	72
Gráfica 3. Efecto del porcentaje de reemplazo OH en la absorción de agua	74
Gráfica 4. Variación de la absorción de agua con el cambio de la densidad	75
Gráfica 5. Efecto del porcentaje de reemplazo de OH en la resistencia a la tensión	76
Gráfica 6. Comparación espectros infrarrojo de las muestras con CM	78
Gráfica 7. Comparación espectros infrarrojo de las muestras con CA	79
Gráfica 8. Comparación espectros infrarrojo de las muestras con MCC	80
Gráfica 9. Costos de materia prima para los MCC en diferentes porcentajes de reemplazo	83

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultados análisis LIAC	96
Anexo B. Resultados ensayos de tensión	99
Anexo C. Resultados espectroscopía FTIR	100

LISTA DE ABREVIATURAS

AR= Aceite de ricino

CA= Cascarilla de arroz

CM= Cáscara de mango

FTIR= Espectroscopia de transformada de Fourier

MCC= Microcristales de celulosa

MDI= Metil Difenil Diisocianato

NCO= Grupo funcional Isocianato

OH= Grupo funcional hidroxilo

S= Muestra

TDI= Toluen Diisocianato

X= Porcentaje de reemplazo de OH

GLOSARIO

BIOCOMPUESTOS: son materiales poliméricos obtenidos a partir de materias primas de origen natural, que son procesados por seres vivos, beneficiando al medio ambiente por su biodegradabilidad.

BIURET: es el producto de la reacción establecida entre una úrea sustituida y un isocianato.

CAROTENOIDE: es el compuesto responsable de la coloración; nombre que reciben los pigmentos característicos del mango en sus variedades.

CELDA CERRADA: se presenta cuando hay un encogimiento de la espuma luego del tiempo de secado de la misma, ocasionado por la disminución del volumen del gas contenido en las celdas que no fue expulsado durante el proceso de expansión, debido a la disminución de la temperatura.

ENOLIZABLE: es la transformación en enol de un grupo aldehído o cetona.

ENTRECruzamiento: es un factor que determina rigidez, módulo de elasticidad, entre otros aspectos de polímeros. Para el caso particular, un alto grado de entrecruzamiento junto a fuerzas intermoleculares altas, como producto se obtiene una espuma rígida.

FRIABILIDAD: se observa cuando la parte exterior de la espuma presenta una apariencia desgastada, seca y áspera luego de sobrepasar el tiempo de secado y el interior presenta una espuma que ante un esfuerzo cortante o de cizalla ejercida con los dedos desprende pedazos de material.

HIDROCOLOIDE: Son polisacáridos funcionales que poseen un peso molecular elevado, este tipo de polímero se puede obtener de origen animal, vegetal, microbiano o sintético. Lo que caracteriza a los hidrocoloides es que contienen un elevado número de grupos hidroxilo, a través de los cuales se hidratan y retienen agua lo que otorga sus propiedades estabilizantes.

LIGNOCELULOSA: es el componente más importante de la pared celular de las plantas, producto de la fotosíntesis siendo una excelente fuente de carbono renovable.

POLIURETANO: es un polímero que contiene un enlace uretano en su cadena principal. Constituyen polímeros termoestables, que tienen cadenas poliméricas entrecruzadas, generando una red tridimensional. Éstos polimerizan de forma irreversible con presión o calor formando una masa dura y rígida.

TACTOSIDAD: capacidad que tiene un objeto para pegarse a otro, o en su defecto a una superficie. Es un término empleado para referirse a una cosa pegajosa.

TIEMPO DE CREMADO: es el tiempo en el cual se evidencia el crecimiento de la espuma, las burbujas se expanden y le dan a la mezcla espumosa una apariencia cremosa; mostrando la transición de estado líquido hacia estado sólido con incrementos en la viscosidad.

TIEMPO DE CURADO: es el tiempo empleado para alcanzar el endurecimiento del material por completo. Depende de forma directa del espesor de lo que se va a moldear porque el material plástico no es un buen conductor de calor (Menor espesor, menor tiempo de curado).

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluaron diferentes fibras naturales de origen lignocelulósico para ser incorporadas en espumas rígidas de poliuretano como sustitutos parciales del polioli comercial usado en la producción de éstas, se incorporaron al 5%, 10% y 15%. Se analizaron tres tipos de fibras, dos de ellas cáscaras de mango y cascarillas de arroz dos residuos que se generan en grandes cantidades en el país; y microcristales de celulosa.

En este estudio, se evaluaron propiedades como densidad aparente, absorción de agua y resistencia a la tensión, evidenciando que en todas las muestras preparadas estas tres propiedades se ven mejoradas con el incremento del porcentaje de reemplazo OH. Se determinó que la fibra con mejores resultados en la incorporación de las espumas fue la cascarilla de arroz, encontrando a un porcentaje de reemplazo de OH del 15% un aumento y mejoramiento en propiedades como densidad aparente y resistencia a la tensión, para la densidad aparente se halló un valor de 33 kg/m^3 y para la resistencia a la tensión un valor de 152,92 kPa. En el caso de la absorción de agua, la fibra con mayor rendimiento fue la cáscara de mango alcanzando hasta un 277% de incremento de masa por humedad en la muestra preparada con 15% de reemplazo de OH.

Adicionalmente se determinó que los microcristales de celulosa, aunque mejoran propiedades en las espumas como densidad y absorción de agua, incrementan significativamente los costos de materias primas del polímero, debido a su elevado grado de pureza, alcanzando un incremento del 40% en los costos de materias primas cuando el porcentaje de reemplazo es de 15%, razón por la cual se designan como mejores opciones los residuos agroindustriales, que en este estudio son la cáscara de mango y la cascarilla de arroz.

Palabras claves: Espuma de poliuretano rígida, Biocompuesto, Lignocelulosa, Cáscara de mango, Cascarilla de arroz, Microcristales de Celulosa.

INTRODUCCIÓN

Las reservas de petróleo que existen en la actualidad y el alto impacto que tiene la mentalidad de desarrollo sostenible en el mundo, juegan un papel importante en el uso de productos que son derivados del petróleo. Es por esto que surge la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías, que tienen como fin reducir la dependencia al petróleo. Se ha estudiado sobre el concepto de Biomasa como alternativa a la Petroquímica. Con la biomasa es posible obtener productos como materiales poliméricos híbridos, biocombustibles, entre muchos otros.

Las espumas rígidas de poliuretano, como muchos materiales poliméricos, utilizan dentro de su matriz compuestos derivados del petróleo, en su caso el polietilenglicol, que es el más usado para su fabricación. Entonces se crea una oportunidad de utilizar y aprovechar los residuos agroindustriales como sustitutos parciales de compuestos derivados del petróleo.

Esta investigación se centró en evaluar la incorporación de fibras lignocelulósicas en la síntesis de espumas rígidas de poliuretano a nivel laboratorio, para el aprovechamiento de residuos agroindustriales de origen nacional, específicamente residuos de cáscara de mango y cascarilla de arroz; comprobando que el polietilenglicol tiene sustitutos parciales que influyen en la utilización y aprovechamiento eficiente de dichos residuos, dejando de lado, parcialmente, los recursos no renovables y reduciendo los costos del polímero de partida.

En diversos estudios alrededor del mundo se ha investigado la incorporación de fibras naturales como la cáscara de maní, cáscara de coco, cáscara de cacao, bagazo de caña de azúcar, entre otros, en la síntesis de espumas de poliuretano; encontrando en la mayoría de los casos, una mejoría considerable en las propiedades físico-mecánicas del material, la reducción en los costos y la obtención de polímeros más biodegradables.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de fibras lignocelulósicas para la elaboración de espumas de poliuretano a nivel laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las fibras naturales propuestas que serán usadas para el reforzamiento de espumas de poliuretano.
- Sintetizar espumas de poliuretano a partir de la adición de fibras lignocelulósicas a diferentes proporciones.
- Evaluar el cambio en las propiedades finales de espumas de poliuretano ante la variación de las concentraciones de fibra, con respecto a espumas de referencia.
- Realizar el análisis de beneficio/costo para la obtención de espumas de poliuretano modificadas.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se reportan conceptos básicos y pertinentes para el desarrollo del proyecto, tales como las generalidades de los poliuretanos, los reactivos de síntesis y los diferentes materiales de origen lignocelulósico seleccionados.

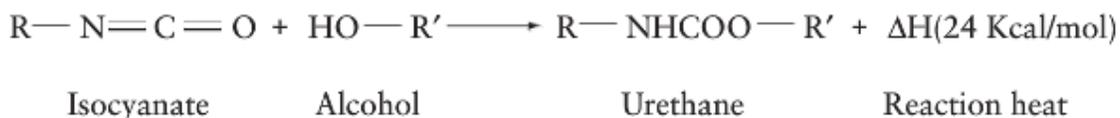
1.1 GENERALIDADES DE LOS POLIURETANOS

La síntesis de poliuretanos se lleva a cabo por medio de una reacción exotérmica, entre una molécula de isocianato con dos o más grupos funcionales y compuestos que contengan grupos funcionales hidroxilo (polioles). La gran versatilidad y campo de aplicación de los poliuretanos se debe a la extensa diversidad de polioles y mezclas que de estos se utilizan, así como por los aditivos que pueden incorporarse. Las distintas combinaciones permiten fabricar una gama de productos como: espumas flexibles o rígidas, elastómeros, adhesivos, recubrimientos y sellantes.

Entre las aplicaciones más comunes del poliuretano están: el uso como aislantes para construcción, aislante en neveras y congeladores, muebles, calzado, recubrimientos, adhesivos, piezas automotrices, entre otros. Los poliuretanos poseen un espectro muy amplio: desde espumas de densidades bajas como 6 kg/m³ hasta plásticos de alta dureza con densidades de 1220 kg/m³ ¹.

Las reacciones más importantes en la síntesis de poliuretanos, se describen a continuación. En la Figura 1, se representa la reacción de formación del grupo uretano, a partir de un isocianato y un alcohol con solo un grupo funcional respectivamente.

Figura 1. Reacción entre isocianato y un alcohol.



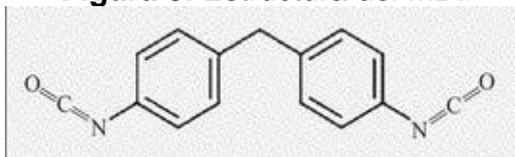
Fuente: IONESCU, Mihail. Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes. Smithers Rapra Technology. 2016. Vol 1. Second edition. p. 16.

¹ OCAMPO GONZALEZ, Jhon. Criterios de formulación de espumas flexibles de poliuretano MDI basados en la evaluación cualitativa de propiedades finales realizadas a nivel laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. 2012. p .17.

activos de hidrógeno y reacciones de hidrógeno no activas. Las reacciones más comunes entre isocianatos y polioles, forman policarbonatos y son del tipo: hidrógenos activos. En este caso, los grupos hidroxilos del polirol corresponden al grupo de hidrógenos activos.⁴

Generalmente, en los procesos de producción de espumas de poliuretano rígidas, se utilizan isocianatos en base al MDI (diisocianato de difenilmetano, diisocianato de metilendifenileno). Este compuesto lo integran: mezclas de MDI (una fracción del isómero 2,4'-diisocianato de difenilmetano con 4,4'-diisocianato de difenilmetano) y componentes de mayor peso molecular. Los poliisocianatos de MDI empleados para la elaboración de espumas rígidas son líquidos viscosos, cuya coloración varía entre marrón oscuro y pardo; se caracterizan por su contenido de NCO, acidez y viscosidad⁵. En la Figura 3, se puede observar la estructura molecular del MDI.

Figura 3. Estructura del MDI.



Fuente: COOPER S. L., GUAN J., *Advances in Polyurethane Biomaterials*. Elseiver. 2016. p. 9.

● **Reacciones de isocianatos con compuestos (OH)**

Para el caso de los alcoholes, se crean grupos uretano. La reactividad de los isocianatos dependerá del tipo de alcohol con el que vaya a interactuar. En cuanto a los alcoholes primarios, ocurre de forma espontánea. Por su lado, alcoholes secundarios y terciarios crean el mismo grupo, pero su velocidad de reacción es menor. En el campo de los fenoles, su reactividad se ve afectada por su acidez elevada con respecto a los alcoholes alifáticos e incluso son menos reactivos. En la Figura 1, se muestra la estructura de una reacción particular de isocianato con alcohol⁶. Las velocidades de reacción se incrementan, entre isocianatos y alcoholes, agregando catalizadores básicos (normalmente aminas alifáticas terciarias) y complejos metálicos (catalizadores organometálicos a base de estaño)⁷.

⁴ SZYCHER, Michael. *Szycher's handbook of polyurethanes*. Taylor & Francis Group. 2013. Second edition, p. 91.

⁵ OCAMPO GONZALEZ. Op., cit., p. 17.

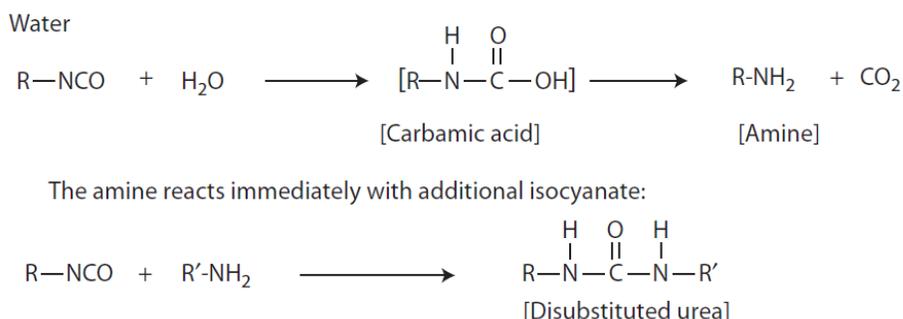
⁶ SZYCHER, Op., cit., p. 94.

⁷ OCAMPO GONZALEZ, Op. cit., p. 14.

- **Reacciones de isocianato con agua.**

La reacción más utilizada en la industria de las espumas es un poliisocianato que junto con el agua producen dióxido de carbono y una úrea polimérica. Tal y como se observa en la Figura 4, esta reacción produce ácido carbámico, que se descompone en una amina y dióxido de carbono. La amina reacciona de forma instantánea con un isocianato adicional generando una urea disustituida⁸.

Figura 4. Estructura reacción isocianato - agua.



Fuente: Ibid., p, 95.

Esta reacción tiene una particularidad, su elevada exotermia; sin embargo, esto no conlleva a una velocidad de reacción alta, sino que por el contrario, en ausencia de catalizador, es lenta por la baja solubilidad del agua en TDI y MDI⁹.

- **Reacciones de isocianato con aminas.**

Las aminas aromáticas son menos reactivas que las alifáticas; ésto se ve justificado por la basicidad de la amina que altera su nivel de reactividad. Las aminas primarias y secundarias reaccionan de forma espontánea, para generar úreas (dentro de ellas, sustituidas: di- y tri-). En cuanto a la espontaneidad de las aminas aromáticas, es menor con respecto a las anteriores. A continuación, en la Figura 5, se muestra la reacción básica entre un isocianato y una amina que produce úrea disustituida¹⁰.

⁸ SZYCHER, Op. cit., p. 97.

⁹ OCAMPO GONZALEZ, Op., cit., p. 14.

¹⁰ SZYCHER, Op. cit., p. 94.

Figura 5. Estructura reacción isocianato - amina.

Amines

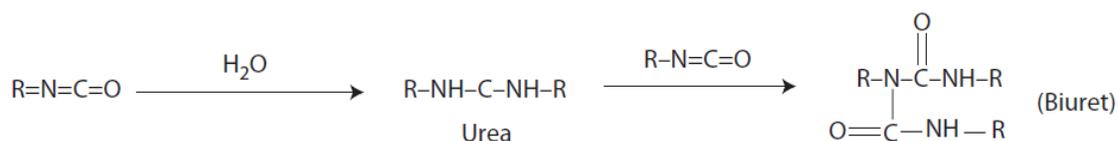


Fuente: *Ibid.*, p, 95.

- **Reacciones de isocianato con úrea**

Las aminas primarias reaccionan con el isocianato para formar enlaces cruzados biuret estables. Cuando se compara éste tipo de reacción con las amidas, se considera la influencia del carbonilo, el cual es afectado por el nitrógeno, haciendo que la úrea sea más reactiva que la úrea sustituida¹¹. En la Figura 6, se puede observar la reacción de un isocianato con úrea formando biuret.

Figura 6. Estructura reacción isocianato - úrea.



Fuente: *Ibid.*, p, 96.

Es una reacción exotérmica y en los poliuretanos, es utilizado con frecuencia como fuente adicional de entrecruzamiento¹².

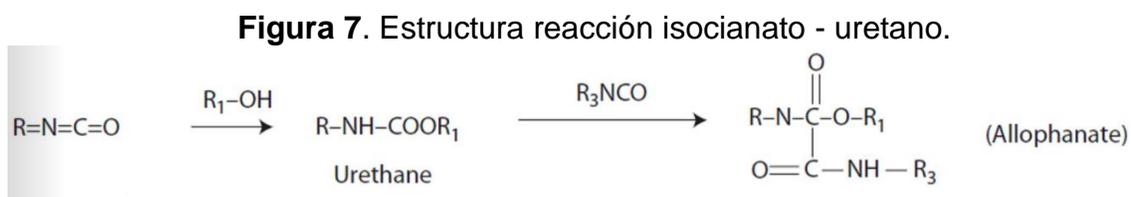
- **Reacciones de isocianato con uretanos**

Esta reacción exotérmica produce un grupo alofonato, a partir del isocianato con un hidrógeno del grupo uretano y de forma paralela a la reacción con urea, promueve el entrecruzamiento en los sistemas de poliuretano¹³. En la Figura 7, se muestra la reacción de un isocianato con el grupo uretano, formando alofonato.

¹¹ *Ibid.*, p, 97.

¹² OCAMPO GONZALEZ, Op., cit., p, 15.

¹³ *Ibid.*, p, 15.



Fuente: *Ibíd.*, p, 96.

Szycher afirma que: “el enlace alofanato es térmicamente inestable y se puede disociar al isocianato precursor a temperaturas de 150°C o superiores”¹⁴.

● Reacciones de dimerización

En este tipo de reacciones, los isocianatos reaccionan de forma espontánea y exotérmica, o también pueden ser catalizados. Por medio de sus dos enlaces C=N se crean dímeros, que forman cristales insolubles. El MDI tiene la capacidad de formar mayor cantidad de dímeros con respecto al TDI a condiciones normales y la velocidad de formación de los mismos decrece con temperaturas bajas¹⁵.

Bajo la acción de una catálisis selectiva, la dimerización de isocianato produce un grupo carbodiimida. La obtención de dímeros se ve favorecida con la utilización de isocianatos aromáticos, incluso sin usar catalizador¹⁶.

El producto de la dimerización tiene una gran dependencia de acuerdo a la reactividad de ambos y la estructura inicial del isocianato. Por ejemplo, los aril isocianatos dimerizan en presencia de una catálisis basada en fósforo, a través de la adición al enlace C=N del grupo NCO produciendo un dímero simétrico como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Estructura reacción con isocianatos aromáticos.



Fuente: *Ibíd.*, p.98.

¹⁴ SZYCHER, Op., cit., p. 97.

¹⁵ OCAMPO GONZALEZ, Op., cit., p, 15.

¹⁶ SZYCHER, Op., cit., p. 98.

1.3 POLIOLES

Los polioles son compuestos poliméricos que poseen al menos dos grupos con hidrógeno activo. Para la síntesis de poliuretanos son usados poliésteres y poliéteres. Los polioles con peso molecular entre 1000 y 6000 forman espumas flexibles y elastómeros; los polioles de bajo peso molecular (menores a 1000) forman espumas rígidas y recubrimientos, ya que permiten mayor entrecruzamiento¹⁷. Los polioles se caracterizan por su funcionalidad, que varía según sea su peso molecular y su índice de hidroxilos, es decir, su número de OH que esta dado en mg de KOH/ g.¹⁸.

1.3.1 Biopoliolés. La búsqueda por fuentes alternativas y la dependencia de la industria de polímeros hacia la petroquímica, conlleva al desarrollo de polioles de origen vegetal. Entre los más usados están los derivados de aceites vegetales como el aceite de soya, aceite de maní, entre otros. Los aceites vegetales, a excepción del aceite de ricino, no contienen hidroxilos naturales, es por esto que, con diferentes técnicas de modificación química, se introducen los grupos hidroxilos para reaccionar con los isocianatos¹⁹.

En la actualidad, existe una fábrica en Bogotá llamada Espumas Santafé, que desarrolla poliuretanos a base de polioles de origen natural proveniente de aceites vegetales. Además, se ha investigado sobre el uso de fibras de origen natural como el bagazo de caña, cáscara de piña, cáscara de coco, cáscara de maní, cáscara de arroz y derivados de celulosa como carboximetilcelulosa, para la incorporación en las espumas de poliuretano, debido a que contienen naturalmente grupos hidroxilos por su contenido de celulosa y lignina.

A continuación, en el cuadro 1 se muestran algunos de los documentos revisados en la bibliografía y los resultados más representativos que encontraron los autores.

¹⁷ PORRAS CARDENAS, Op., cit., p, 20.

¹⁸ OCAMPO GONZALEZ, Op., cit., p, 32.

¹⁹ DEFONSEKA, Chris. Practical Guide to Flexible Polyurethane Foams. Smithers Rapra Technology Ltd. 2013, p. 43.

Cuadro 1. Estudios de poliuretanos con biopoliolos.

Autores	Biomasa usada	Características y resultados.
Hakim A. ²⁰	Bagazo de caña de azúcar	En el artículo sintetizaron una espuma rígida de poliuretano a partir del reemplazo parcial del polietilenglicol con licuado de bagazo de caña de azúcar, determinando un aumento en la densidad aparente y una disminución de propiedades como la resistencia a la compresión y la conductividad térmica en comparación con la espuma de referencia.
Rozman H.D. ²¹	Cascarilla de arroz	En el artículo sintetizaron espumas rígidas de poliuretano y evaluaron diferentes propiedades físicas y mecánicas del compuesto, encontrando que para la mayoría de sus pruebas, sus propiedades incrementan con el porcentaje de cascarilla de arroz tales como la flexión, resistencia a la tracción y la capacidad de absorción de agua.
Porras M.E. ²²	Bagazo de caña	En la tesis realizada para la facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana, se evaluó la incorporación de la celulosa presente en el bagazo de caña como sustituto parcial del polioliol en donde realizó análisis estructurales, análisis de estabilidad química y fotobiodregabilidad, encontrando resultados óptimos en la muestra preparada con 5% de adición de fibra.
Padrón G. ²³	Cáscara de cacao	En este estudio evaluaron la incorporación de la cáscara de cacao en una espuma de poliuretano y determinaron que en las espumas modificadas, se incrementan propiedades como resistencia a la compresión, densidad aparente, absorción de agua y la biodegradabilidad.
Trujillo M. ²⁴	Cáscara de coco	En este estudio encontraron que haciendo uso de la cáscara de coco se desarrolla una buena interfase en la matriz polimérica, además hay mejoras en la morfología y reología del polímero final, aumentando su rigidez y la resistencia al impacto.

²⁰ ABDEL HAKIM, A., MONA, N., EMAM, A., SULTAN, M. Preparation and characterization of rigid polyurethane foam prepared from sugar-cane bagasse polyol. *Materials Chemistry and Physics*, 129, p 301-307.

²¹ ROZMAN, H.D., YEO, Y.S., TAY, G.S., ABUBAKAR, A. The mechanical and physical properties of polyurethane composites based on rice husk and polyethylene glycol. *Polymer Testing* 22, 2003, p. 617-623

²² PORRAS CARDENAS, María Eugenia. Evaluación de la incorporación de celulosa de bagazo de caña en la síntesis de espumas de poliuretano. Universidad Pontificia Bolivariana. 2013.

²³ PADRÓN, G., ARIAS, E., ROMERO, J., BENAVIDES M., ZAMORA, J., GARCÍA, S. Efecto de la cáscara de cacao en la obtención de espumas de poliuretano para uso hortícola. Propiedades físicas y de biodegradabilidad. *Revista de la sociedad Química de México*, 48 (2), p. 156-164.

²⁴ TRUJILLO M. Desarrollo de un material compuesto de fibras naturales entrecruzadas con poliuretano. Trabajo de grado para Maestría, 3. Guadalajara. 2007.

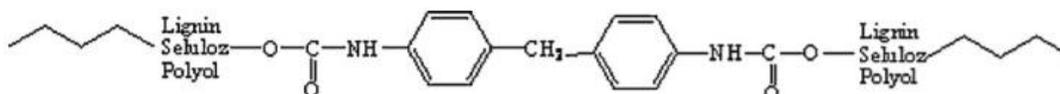
Cuadro 1. (Continuación).

Autores	Biomasa usada	Características y resultados representativos.
Gaidukova G. ²⁵	Aceite de colza	En este estudio se analizó la preparación de una espuma rígida de poliuretano a partir de aceite de colza y polietilén tereftalato reciclado, encontrando que se aumenta la rigidez, la resistencia a la compresión y el tamaño de la celda.
Rivera J.L. ²⁶	Carboximetilcelulosa, acetato de celulosa, sulfato de celulosa y trimetilsilil celulosa	En el artículo estudiaron espumas de poliuretano modificadas con diferentes derivados de celulosa en varias proporciones, encontraron que los derivados de celulosa se incorporan en la estructura del poliuretano y por lo tanto, modifican la forma de las celdas; además no se presentó cambio en las propiedades termogravimétricas con excepción de las muestras preparadas con sulfato de celulosa. También la capacidad de las espumas para disipar la energía incrementa con la concentración de celulosa.

De acuerdo a los anteriores estudios, mencionados en el Cuadro 1, se observa que el uso de fibras naturales mejoran diversas propiedades físico-mecánicas del polímero final; razón por la cual se deben tener en cuenta las ventajas que proporcionan y resaltar la importancia de implementar este tipo de fibras, que normalmente pueden ser residuos de otra industria.

En la Figura 9, Abdel Hakim representa el esquema de un fragmento en la estructura del poliuretano al ser sintetizado con MDI y polioles provenientes de fibras de lignina y celulosa:

Figura 9. Esquema de la estructura molecular del poliuretano a partir de MDI y polioli vegetal.



Fuente: ABDEL HAKIM, A. MONA, N. EMAM, A. SULTAN, M. Preparation and characterization of rigid polyurethane foam prepared from sugar-cane bagasse polyol. *Materials Chemistry and Physics*, Vol 129, p 302.

²⁵ GAIDUKOVA, G., IVDRE, A., FRIDRIHSONE, A., VEROVKINS, A., CABULIS, U., GAIDUKOVS, S. Polyurethane rigid foams obtained from polyols containing bio-based and recycled components and functional additives. *Industrial Crops and Products*, Vol. 102, 2017, p. 133–143.

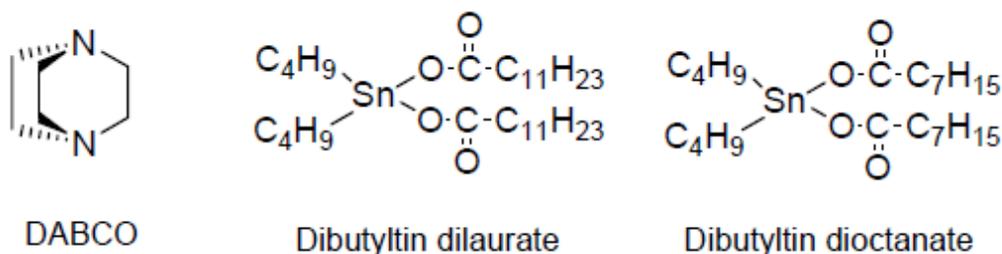
²⁶ RIVERA ARMENTA, J.L., HEINZE, T., MENDOZA MARTINEZ A.M. New polyurethane foams modified with cellulose derivatives. *European Polymer Journal* Vol. 40, 2004, p. 2803–2812

1.4 CATALIZADORES, SURFACTANTES Y AGENTES ESPUMANTES

Los poliuretanos se producen, básicamente, a partir de un diisocianato y un poliol formulado. Sin embargo, en la síntesis de espumas de poliuretanos se requieren diferentes aditivos con el fin de brindar propiedades deseadas al polímero final.

1.4.1 Catalizadores. La reacción entre los polioles y diisocianatos se da a velocidades moderadas a condiciones ambientales, sin embargo, suelen usarse diferentes catalizadores para controlar las reacciones entre el isocianato-agua y el isocianato-Poliol. Se utiliza una gran variedad de catalizadores, los más comunes son sales minerales o catalizadores amínicos, en ocasiones suelen usarse mezclas de estos. En la Figura 10, se representan los catalizadores comúnmente utilizados en la síntesis de poliuretanos²⁷.

Figura 10. Catalizadores usados en la síntesis de poliuretanos.



Fuente: MARÍN BERNABÉ, Romina. Carbohydrate-based Polyurethanes and Polyamides: Synthesis, Characterization and Stereocomplex Formation. Barcelona. Tesis Doctoral, 2009, p. 23.

El catalizador comercial frecuentemente usado en la síntesis de espumas de poliuretano es el DABCO.

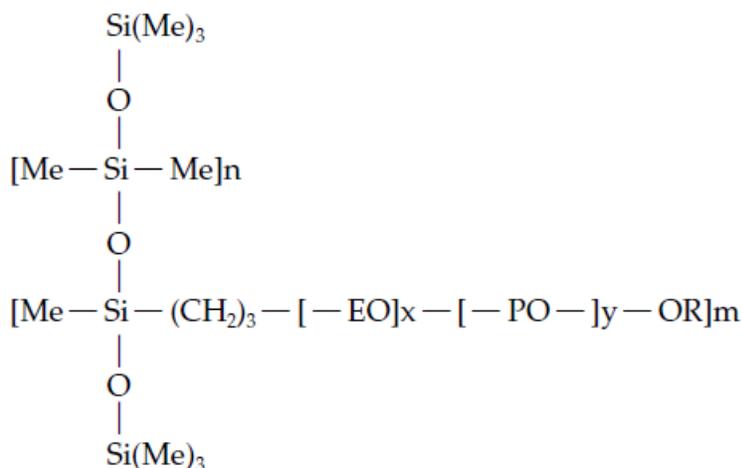
1.4.2 Surfactantes. Los agentes surfactantes estabilizan y regulan la estructura final de la espuma; adicionalmente, ayuda a la mezcla de componentes que son incompatibles entre sí. Los surfactantes ayudan a regular el tamaño y formación de las celdas debido a que reducen la tensión superficial de la mezcla controlando la formación de burbujas por acción del agente soplante. Sin el uso del surfactante la espuma podría colapsar y tener tamaños de celda irregulares en la estructura²⁸.

²⁷ MARÍN BERNABÉ, Romina. Carbohydrate-based Polyurethanes and Polyamides: Synthesis, Characterization and Stereocomplex Formation. Barcelona. Tesis Doctoral, 2009, p. 21.

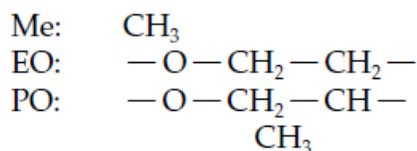
²⁸ PORRAS CARDENAS. Op., cit., p. 23.

En la actualidad, para la síntesis de espumas de poliuretano se utilizan siliconas o aceites de silicona y copolímeros de polioxialquenos y polisiloxanos²⁹. La estructura general de los surfactantes de silicona se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Estructura general de la silicona.



Note:



Fuente: ASHIDA Kaneyoshi. Polyurethane and Related foams: Chemistry and Technology. Taylor & Francis Group. New York. 2007, p. 43.

1.4.3 Agentes espumantes. También conocidos como agentes soplantes o de expansión, permiten la generación de gas durante el tiempo de crecimiento para así formar la espuma; pueden ser agentes químicos o físicos. El agua es el agente químico usado por excelencia ya que genera CO₂ ante la reacción del isocianato con el agua. Otros agentes espumantes químicos incluyen compuestos orgánicos enolizables y ácido bórico³⁰. Los agentes espumantes físicos son líquidos volátiles e inertes que pueden ser evaporados por efecto del calor generado durante la reacción de formación del uretano, anteriormente eran ampliamente empleados los compuestos clorofluorcarbonos (CFC) e hidroclofluorcarbonos (HCFC), pero su uso ha sido eliminado gradualmente debido a que ayudan a la destrucción de la

²⁹ OCAMPO GONZALEZ. Op., cit., p. 30.

³⁰ ASHIDA Kaneyoshi. Polyurethane and Related foams: Chemistry and Technology. Taylor & Francis Group. New York. 2007, p. 40.

capa de ozono, razón por la cual se ha optado por la implementación de pentano e hidrofluorcarbonos (HFC), teniendo en cuenta que el uso de HFC se ve limitado por su costo excesivo³¹.

1.5. ESPUMAS RÍGIDAS

Una espuma rígida de poliuretano es el producto obtenido a partir de la mezcla de dos componentes, isocianato y polioli; se caracteriza por ser una reacción exotérmica, obteniéndose una estructura uniforme, resistente y sólida. A diferencia de las espumas flexibles, tiene mayor cantidad de celdas cerradas (ver Figura 12) donde están los gases dispersos, razón por la cual, la utilizan generalmente en la construcción y como aislante térmico en sistemas de refrigeración (cuartos fríos, neveras, entre otros). Ahora bien, debido a su alta reticulación proporciona a su estructura un módulo de elasticidad elevado. En cuanto a las propiedades físicas de una espuma rígida de poliuretano, se destacan densidad, conductividad térmica, estabilidad dimensional con la temperatura y resistencia a la compresión³².

Figura 12. Tipo de celdas en las espumas de poliuretano.



A: Celda abierta en espumas flexibles, B: Celda cerrada en espumas rígidas

Fuente: Adaptado, OCAMPO GONZALEZ, Jhon. Criterios de formulación de espumas flexibles de poliuretano MDI basados en la evaluación cualitativa de propiedades finales realizadas a nivel laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. Tesis de postgrado, 2012, p. 4.

- La formación de las espumas de poliuretano ocurre, básicamente, en tres etapas.

La primera etapa es de mezclado, en la que interactúa el polioli con el isocianato y otros compuestos constituyentes de la espuma final. La segunda etapa es de

³¹ OCAMPO GONZALEZ. Op., cit., p. 21 y 22.

³² QUINTERO, M. Los polímeros de poliuretano y la industria colombiana: una oportunidad para el aceite de palma. Revista Palmas. 2007. Vol 28 no. Especial, Tomo 2, p. 38.

cremado y crecimiento, donde las burbujas se expanden y la mezcla pasa de ser líquida a viscosa, gradualmente. Se estima un rango de tiempo de cremado que oscila entre seis a quince segundos. El crecimiento de la espuma se da durante el cremado y tiene un intervalo de tiempo que se encuentra entre los cien y doscientos segundos. El inicio de la etapa final tiene lugar cuando el tiempo de crecimiento ha terminado; comienza la reacción de polimerización (o gelificación) en la que la tactosidad de la superficie de la espuma disminuye; el tiempo que se invierte en esta fase es de veinte a ciento veinte segundos. Esta etapa corresponde al curado de la espuma³³.

Existen dos métodos de fabricación de espumas, en frío y en caliente. En el primer caso la síntesis es exotérmica, libera calor en la reacción y se emplea para obtener espumas a partir de un molde predeterminado, utilizando una espumadora sencilla encargada de realizar la mezcla. El producto final obtenido en éste método es más costoso, tiene una calidad superior y su vida útil es más prolongada con respecto a las espumas en caliente³⁴.

Por su parte, las espumas fabricadas en caliente, se crean de manera continua con una espumadora compuesta por un mezclador y un sistema de cintas sin fin; el mezclador adiciona y combina los diferentes compuestos y el sistema de cintas, permite el crecimiento de la espuma hasta el tamaño deseado realizando un corte que le da forma al producto final. Las espumas obtenidas en caliente suelen ser de gran tamaño, de bajo costo y las más reconocidas en el mercado³⁵.

Existe otro tipo de poliuretano rígido, es el spray que se obtiene a partir de velocidades altas de reacción. Se caracteriza por ser de celdas cerradas, siendo un material consistente y sólido, rellena fácilmente y tiene buena capacidad de curado y secado. Se emplea en revestimientos sujetos a la fuerza de gravedad, por ejemplo en estanques de almacenamiento, tuberías, aislaciones de bodegas, entre otros³⁶. Para el caso particular de los revestimientos de cañerías, que son lugares donde se exponen a fluidos como agua o cualquier otro a temperaturas altas, se utilizan poliuretanos que proporcionan mayor resistencia a dichos ambientes y se vuelve más apropiado emplear el poliisocianurato PIR³⁷.

La densidad es una de las propiedades más importantes en las espumas rígidas de poliuretano, ya que de ésta, derivan otras propiedades como resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, resistencia a la cizalladura, módulo de corte, entre otras; al tener espumas cada vez más densas, se incrementen y mejoren diferentes propiedades mecánicas³⁸.

³³ PORRAS CARDENAS. Op., cit., p. 23 y 24.

³⁴ ASHIDA. Op., cit., p. 86.

³⁵ *Ibíd.*, p. 87.

³⁶ *Ibíd.*, p. 87 y 88.

³⁷ *Ibíd.*, p. 45.

³⁸ SZYCHER. Op., cit., p. 260.

Con el objetivo de obtener espumas estables, debe considerarse si se produce apertura de la celda, que ocurre cuando el gas que ha permitido el soplado sale de la matriz y rompe las paredes celulares; una apertura prematura puede producir una disminución significativa del volumen de la espuma. Por otro lado, si la apertura se hace justo en el final de la expansión, las celdas pueden que no hayan liberado por completo el gas y esto conlleva a un encogimiento más adelante de la espuma, proveniente del gas atrapado³⁹.

La velocidad de crecimiento de la espuma se ve favorecida con la exotermia característica de la reacción de polimerización; el agente espumante, ya sea químico o físico, es un gas que se va formando debido a la generación de calor en la reacción de polimerización. Al incluir en la etapa de crecimiento un método de enfriamiento, disminuye la temperatura de la reacción y por lo tanto el tiempo que emplea en crecer la espuma, que es inferior con respecto a la inexistencia del control de temperatura por un medio frío. Si se genera calor de una forma descontrolada la estructura de las celdas que se van formando pueden llegar a ser inestables, ocasionando que con el tiempo se rompan y liberen el gas contenido durante la etapa de crecimiento⁴⁰.

Las características de los poliuretanos están regidas por la estructura molecular y grados de flexibilidad/rigidez, densidad, estructura celular, entre otras. Hay cinco principios generales bajo los cuales se relaciona estructura-propiedad de los poliuretanos (peso molecular, fuerzas intermoleculares, rigidez de la cadena, cristalinidad y entrecruzamiento)⁴¹.

- **Entrecruzamiento**

El entrecruzamiento es una característica propia de los poliuretanos, de tal forma que a mayor grado de entrecruzamiento, incrementan aspectos como rigidez, punto de ablandamiento, módulo de elasticidad en polímeros amorfos y reduce elongación para solventes⁴². Con un alto grado de entrecruzamiento y bajas fuerzas intermoleculares (como la cristalinidad, rigidez de la cadena, atracción entre cadenas) se obtienen espumas flexibles, al tener altas fuerzas intermoleculares se producen espumas rígidas, entre otras opciones⁴³. El grado de entrecruzamiento depende de la naturaleza de los monómeros involucrados y las ramificaciones que se generen durante la polimerización, y así, de la forma como se va generando la red de enlaces en la estructura del polímero se derivan las propiedades físicas y mecánicas del mismo.

³⁹ OCAMPO GONZALEZ. Op., cit., p. 61.

⁴⁰ SZYCHER, Op., cit., p. 264.

⁴¹ *Ibíd.*, p. 38.

⁴² *Ibíd.*, p. 41.

⁴³ *Ibíd.*, p. 5.

En algunos estudios como el de Padrón⁴⁴ con incorporación de cascara de cacao, se determinó que los OH presentes en las ligninas permiten un mayor grado de entrecruzamiento, además de que funciona como relleno de los espacios dentro de la estructura del polímero.

1.6 MATERIAL LIGNOCELULÓSICO

La biomasa lignocelulósica es la más abundante en la naturaleza y está presente en la madera dura, madera suave, residuos agroindustriales y vegetación. Los residuos lignocelulósicos producidos anualmente a nivel mundial exceden los 220 billones de toneladas, equivalentes a 60-80 billones de toneladas de crudo⁴⁵. Dentro de la lignocelulosa se encuentran tres compuestos fundamentales, celulosa, hemicelulosa y lignina⁴⁶.

De los materiales lignocelulósicos, celulosa y hemicelulosa, es posible obtener furfural, xilosas, glucosa, derivados de celulosa, pulpa, combustibles, entre otros. Y a partir de las ligninas se obtiene vainillina, dimetilsulfuro, fenoles, matrices para geles, fertilizantes, uso para la producción de diversos polímeros, entre otros⁴⁷.

Las fibras lignocelulósicas pueden ser incorporadas en la estructura de polímeros como las espumas de poliuretano, modificando y mejorando ciertas propiedades físico-mecánicas, reduciendo los costos del polímero. Además, se disminuye el impacto ambiental generado al sustituir parcialmente compuestos que son derivados del petróleo⁴⁸.

1.6.1 Celulosa. La celulosa es el componente principal en la pared celular de las plantas y se encuentra en gran proporción en fibras vegetales como el algodón, yute, lino y madera⁴⁹. Es un homopolímero lineal conformado por unidades de D-glucosa, que se encuentran unidos mediante el enlace β -1,4 glucosídico, con alto peso molecular y poli-disperso⁵⁰ (Ver Figura 13).

⁴⁴ PADRÓN, ARIAS, ROMERO, BENAVIDES, ZAMORA, GARCÍA. Op., cit., p. 160.

⁴⁵ SINGH A., SEVDA S., ABU I., VANBROEKHOVEN K., RATHORE D., PANT D. Biohydrogen Production from Lignocellulosic Biomass: Technology and Sustainability. Energies MDPI, 2015, Vol 8, p. 13063.

⁴⁶ LOPRETTI Mary, GANDINI Alessandro. Nuevos materiales poliméricos derivados de Fuentes renovables. Revista del laboratorio tecnológico del Uruguay. N° 7, 2012, p. 59.

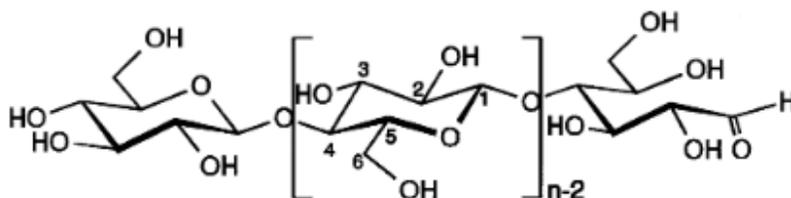
⁴⁷ *Ibíd.*, p. 60.

⁴⁸ PORRAS, M.E. MUÑOZ, P.C. GIL, A.M. QUINTANA, G.C. Op., cit., p. 94.

⁴⁹ HIRZEL VERLAG S. Manual de Química Orgánica. Editorial Reverte. Edición en español. 1987, p. 488.

⁵⁰ SUN Run-Cang. Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels - Chemistry, Extractives, Lignins, Hemicelluloses and Cellulose. Elsevier, 2010, p. 31.

Figura 13. Estructura molecular celulosa.

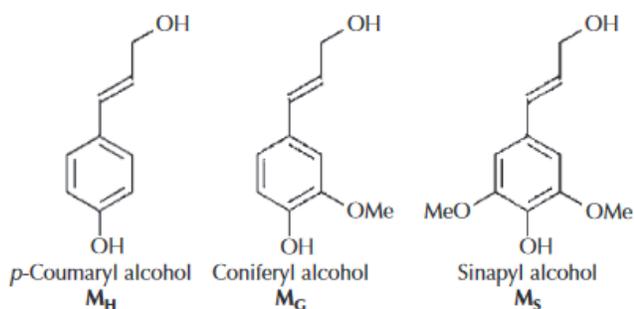


Fuente: HEINZE T., LIEBERT, T. Unconventional methods in cellulose functionalization. Progress in polymer science, vol 26, 2012, p. 1692.

1.6.2 Lignina. La lignina es un polímero natural heterogéneo y constituyente característico de las plantas. Es un polímero fenólico de unidades de fenilpropano unidas entre sí por enlaces carbono carbono (C-C) y éter (C-O-C) con una estructura amorfa reticulada tridimensional⁵¹.

Los tres monómeros primarios de la lignina (monolignoles) son: alcohol p-cumárilico MH, alcohol coniferílico MG, y alcohol sinapílico MS; se representan en la siguiente Figura 14.

Figura 14. Monómeros primarios lignina.



Fuente: Adaptado, SUN Run-Cang. (2010). Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels - Chemistry, Extractives, Lignins, Hemicelluloses and Cellulose. Elsevier, 2010, p. 38.

1.6.3 Cascarella de arroz. La cascarilla de arroz es un residuo agrícola generado en procesos de molienda del arroz y existe en gran abundancia a nivel nacional (ver figura 15).

⁵¹ PORRAS, M.E. MUÑOZ, P.C. GIL, A.M. QUINTANA, G.C. Op., cit., p. 96.

Figura 15. Cascarilla de arroz.



Fuente: HazChela. Cascarilla de arroz. México D.F. Disponible en línea <<http://www.hazchela.com/esp/item/166/42/cascarilla-de-arroz-briess-250g>>

Según datos registrados por Fedearroz⁵², en el año 2016 se produjeron 2.526.179 toneladas de arroz y la cascarilla generada oscila alrededor de 631.444 toneladas. La cascarilla de arroz se compone principalmente de fibra y minerales; su uso en la producción de alimentos para animales es limitado por su alto contenido de sílice (SiO_2) ya que es difícilmente digerido⁵³; por lo tanto, es utilizado principalmente como fertilizante y en materiales de construcción, otra fracción se utiliza como combustible y lo restante es quemado al aire libre o desechado. Entonces, existe la necesidad de implementar alternativas que permitan aprovecharla, con el fin de disminuir las emisiones contaminantes.

Existen diversos estudios que buscan dar un uso más eficiente a este tipo de residuos, como por ejemplo producción de bioetanol, como sustrato para digestores anaerobios, adsorbente de metales pesados, extracción de sílice, incorporaciones en matrices poliméricas para reforzamiento, entre otros⁵⁴. Acorde a sus propiedades fisicoquímicas como: porcentaje de lignina y celulosa, baja conductividad térmica y densidad; las cascarillas de arroz poseen un atractivo en el uso como reforzante en matrices poliméricas; en el caso de las espumas de poliuretano por su contenido de celulosa y lignina posee varios grupos hidroxilos, con pares de electrones libres en cada oxígeno, que pueden reaccionar con grupos funcionales como el isocianato⁵⁵.

Por ejemplo, en la investigación realizada por los autores H.D. Rozman, Y.S. Yeo, G.S. Tay, A. Abubakar en el 2003⁵⁶, lograron sintetizar espumas de poliuretano usando como polioli cascarilla de arroz y PEG 200, evaluando diferentes

⁵² FEDEARROZ. Producción anual de arroz en Colombia. [citado el 1 noviembre 2017] Disponible en línea: http://www.fedearroz.com.co/new/apr_public.php

⁵³ SIERRA J. Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Monografía Universidad de Sucre. 2009, p. 17.

⁵⁴ *Ibíd.*, p. 18.

⁵⁵ VARGAS J., ALVARADO P., VEGA J., PORRAS M. Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. Instituto de investigaciones químicas y biológicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. Revista científica, vol 23, 2013, p 88.

⁵⁶ ROZMAN, YEO, TAY, ABUBAKAR. Op., cit., p. 617–623.

propiedades físicas y mecánicas del compuesto. Se determinó que, para la mayoría de sus pruebas sus propiedades incrementan con el porcentaje de cascarilla de arroz tales como: la flexión, resistencia a la tracción y la capacidad de absorción de agua.

1.6.4 Cáscara de mango. El mango (*Mangífera indica* L.) es considerado uno de los frutos tropicales más importantes a nivel mundial. Uno de los residuos producto de su consumo o procesamiento es la cáscara, que representa alrededor del 15% del peso del fruto. En Colombia en el 2016 según el DANE la producción de mango fue de 270.023 toneladas.

Figura 16. Mango de la variedad Keitt.



Fuente: ASOHOFrucol. Modelo tecnológico para el cultivo de mango en el valle del alto magdalena en el departamento del Tolima. Ponencia. Bogotá. 2013, p. 23.

El beta-caroteno (β -caroteno) es el compuesto que le confiere el color característico (anaranjado amarilloso) al mango, en este caso particular, para la variedad Keitt. Los pigmentos que constituyen esta fruta son conocidos por tener propiedades antioxidantes y se denominan carotenoides⁵⁷.

Un pequeño porcentaje de las cáscaras de mango son utilizadas para la fabricación de concentrados animales, pero la mayor porción termina siendo un residuo, llegando a ser una fuente de contaminación ambiental⁵⁸.

Los residuos de frutas tienen un gran número de usos potenciales, gracias a los compuestos presentes (bioactivos y fibra dietética) y pueden ser fácilmente empleados como alimentos funcionales, un ejemplo de ello, la fibra dietaria, también

⁵⁷ Mango. National mango Board. [Citado el 7 de enero 2018]. Disponible en línea: http://www.mango.org/Mangos/media/Media/Documents/Research%20And%20Resources/Research/Industry/Nutrition/Phytochemicals_Imported_Mangos_Exec_Summary_Spn.pdf?ext=.pdf

⁵⁸ SERNA L., TORRES C., Potencial agroindustrial de cáscaras de mango (*Mangífera indica*) variedades Keitt y Tommy Atkins. Acta Agronómica. Universidad nacional de Colombia, Volumen 64, Número 2, 2015, p. 111.

pueden extraerse antioxidantes, compuestos fenólicos y pectina. Por su contenido de celulosa, puede ser usado para la producción de bioetanol, biogas y ácido láctico⁵⁹. Adicionalmente, las cáscaras de mango poseen grupos hidroxilo activos que podrían reaccionar con grupos funcionales como el isocianato.

1.6.5 Microcristales de celulosa. La celulosa microcristalina (MCC) es un derivado de la α -celulosa despolimerizada y es uno de los derivados de celulosa más usado en la industria de alimentos por ser un hidrocoloide. Funciona como fibra dietaria y como estabilizante en una amplia variedad de alimentos⁶⁰; también es usada en la industria farmacéutica y cosmética como aglutinante. El amplio campo de uso que tienen los MCC se deriva de sus propiedades únicas como renovabilidad, biodegradabilidad, no toxicidad, baja densidad y propiedades estructurales, estabilidad térmica, entre otros⁶¹.

Las propiedades fisicoquímicas que definen la funcionalidad de los MCC se determinan por la materia prima y la tecnología utilizada para su obtención, las materias primas usadas para su producción son esencialmente madera, algodón y residuos lignocelulósicos⁶².

El proceso de obtención sucede básicamente en dos etapas, la primera consiste en un pretratamiento para separar la α -celulosa de la hemicelulosa, lignina y otros componentes presentes en la materia prima, en la segunda etapa se realiza la obtención de los MCC de las fibras de celulosa puras mediante una hidrólisis ácida, enzimática, técnicas mecánicas o métodos iónicos⁶³.

En los últimos años ha crecido un fuerte interés en el desarrollo de biocompuestos, los MCC han sido estudiados e incorporados para reforzar diferentes polímeros como el polipropileno, poli (vinil alcohol), ácido poliláctico, entre otros⁶⁴.

⁵⁹ BUENROSTRO J., GARZA H., IBARRA V., AGUILAR C. Aprovechamiento de la cáscara de mango como soporte para la producción de polisacáridas. Depto. De Investigación en Alimentos. Facultad De Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila. México 2010. Disponible :<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%203/AQM3aprovechamiento.html>

⁶⁰ DuPont. Microcrystalline cellulose. [Citado el 1 noviembre 2017] Disponible en: <http://www.danisco.com/product-range/microcrystalline-cellulose/>

⁶¹ TRACHE D., HAZWAN M., TAN HUIN C., SABAR S., NURUL M.R., TAIWO F.A., HASSAN T.M., MOHAMAD M.K. Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and bio-composites application-A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 93, 2016, p. 789.

⁶² NSOR J., CHEN M., GOFF D., ZHONG F., RIZWAN H., LI Y., Functionality and nutritional aspects of microcrystalline cellulose in food. *Carbohydrate Polymers*. Elsevier. Volume 172, 2017, p. 160.

⁶³ Ibid., p. 161

⁶⁴ TRACHE D., HAZWAN M., TAN HUIN C., SABAR S., NURUL M. R., TAIWO D.A., HASSAN T.M., MOHAMAD M.K. Op., cit., p. 801.

2. METODOLOGÍA

Se utilizaron cáscaras de mango (*Mangifera Indica L.*) de la variedad Keitt y fueron proporcionadas por corabastos de Bogotá; la cascarilla de arroz es suministrada por una arrocera de Palermo-Huila; los microcristales de celulosa fueron proporcionados por DuPont con un tamaño entre 45-105 μm , según el certificado entregado por el proveedor.

Para la síntesis de espumas de poliuretano se utilizan, isocianato, polioliol, surfactantes, catalizadores y agentes espumantes. Para la obtención de espumas rígidas fueron suministrados por Químicos el alquimista el isocianato tipo comercial MDI, metil difenil isocianato y el polioliol comercial una mezcla de polioliol, catalizador y surfactantes. Los demás reactivos para análisis fueron suministrados por Disolventes y soluciones químicas SAS y Produquímica de Colombia.

2.1 CARACTERIZACIÓN FIBRAS

Inicialmente se secaron las cáscaras de mango en una estufa de secado a 105°C durante 10 horas. Luego, las cáscaras de mango y de arroz fueron molidas en un molino de martillos y posteriormente fueron tamizadas para obtener partículas con tamaño de 100-200 micrómetros. Finalmente, las fibras fueron secadas durante 10 horas más a 105°C en una estufa de secado, debido a que el porcentaje de humedad altera el contenido de OH de la fibra y por consiguiente el isocianato reacciona con la cantidad de agua contenida (Ver figura 4).

2.1.1 Porcentaje de Humedad. La metodología consiste en tomar las muestras de fibra pesarlas y llevarlas al horno a 105 °C durante 3 horas. Cada muestra se pasa al desecador y se pesa nuevamente cuando alcance la temperatura del medio ambiente. Se lleva cada muestra nuevamente al horno por 30 minutos más y se repite el procedimiento de pesado. El procedimiento finaliza hasta cuando la diferencia entre pesajes consecutivos es menor a 4 diezmilésimas de gramo⁶⁵.

2.1.2 Determinación de cantidad de lignina. Realizado por el Laboratorio de Instrumentación de Alta Complejidad de la Universidad de La Salle mediante el método de Van Soest P.J.

2.1.3 Determinación de cantidad de celulosa. Realizado por el Laboratorio de Instrumentación de Alta Complejidad de la Universidad de La Salle mediante oxidación con KMnO_4 /gravimétrico.

2.1.4 Determinación del número de OH. Para la determinación del contenido de OH presente en las muestras de fibras, la metodología usada está basada en la

⁶⁵ PORRAS CARDENAS. Op., cit., p. 40.

norma ASTM D 5155-01⁶⁶. Mediante la equivalencia del isocianato y la cantidad de éste que reacciona con la fibra, se determina el número de OH en mg de KOH / g de fibra.

2.2 FORMACIÓN DE LAS ESPUMAS

Inicialmente se realizaron unas evaluaciones preliminares para determinar el comportamiento de la espuma con la incorporación de fibra y el índice de NCO seleccionado, que fue de 1.1, es decir, 1.1 equivalentes NCO por cada equivalente OH, como recomienda la teoría para espumas rígidas⁶⁷; se evaluaron los tiempos de crema y secado de las espumas, la estructura final, y la dispersión de la fibra en la espuma. Se mantuvo fijo el número total de equivalentes OH en la mezcla Polioli-fibra para todas las muestras preparadas.

Después de las evaluaciones preliminares, se decidió el porcentaje máximo hasta donde se realizará la incorporación de las fibras, y probar la adición de aceite de ricino para mejorar la dispersión de las fibras y servir como extensor de cadena. Se sustituyó el equivalente de OH del polioli en los siguientes porcentajes: 0%, 5%, 10% y 15%, con el objetivo de garantizar que un exceso de fibra en la formulación no provoque una desestabilización de sus propiedades físicas y mecánicas.

El método seleccionado para la formación de las espumas es el de “one-shot” o método de un solo paso, en donde se mezcla inicialmente la muestra de fibra con el MDI (Metil difenil diisocianato) en un recipiente de polipropileno y posteriormente, se adiciona el polioli comercial, se mezcla y se permite el crecimiento de la espuma. La agitación en cada paso se realizó de forma manual. Para las pruebas preliminares las etapas de mezclado, crecimiento y curado de la espuma, se dieron bajo condiciones ambientales. Posteriormente, se evaluó el comportamiento de las espumas en cuanto a su tiempo y volumen de expansión,

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPUMAS

Una vez determinada la formulación a utilizar y luego de formar las espumas se realizaron los siguientes análisis para caracterizarlas.

2.3.1 Densidad aparente. La densidad de las espumas obtenidas se determinó al tomar muestras de 4x3x2 cm (largo x ancho x espesor), se mide el peso y el volumen aparente y se calcula la densidad en (kg/m^3), se realizaron dos repeticiones y con el valor promedio se define la densidad a cada una de las muestras⁶⁸.

⁶⁶ ASTM. Designation: D 5155 – 01. Standard Test Methods for Polyurethane Raw Materials Determination of the Isocyanate Content of Aromatic Isocyanates. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.

⁶⁷ SZYCHER. Op., cit., p. 267.

⁶⁸ PORRAS CARDENAS. Op., cit., p. 42.

2.3.2 Absorción de agua. La metodología se basó en la norma ASTM D570-81⁶⁹, donde se tomaron muestras de 3x2,5x1,5 cm (largo x ancho x espesor) y posteriormente se sumergieron en agua a 19°C durante 3,5 horas, la cantidad de agua absorbida se determina con la diferencia de pesos final e inicial.

2.3.3 Resistencia a la tensión. La prueba de tracción mecánica se llevó a cabo basándose en la norma ASTM D618⁷⁰ pero las espumas fueron cortadas con las siguientes dimensiones 15x2x1 cm (largo x ancho x espesor) y con una velocidad de cabezal de 3 mm/min usando un equipo universal de ensayos de tensión SHIMADZU UH-50A, las pruebas se realizaron en el laboratorio de Materiales y Ensayos del SENA. La resistencia a la tensión se calcula dividiendo la carga máxima que resiste el material antes de romperse sobre el área de sección transversal.

2.3.4 Espectroscopia FTIR. Los análisis se llevaron a cabo con un equipo SHIMADZU IRT Racer-100, en el laboratorio de Materiales y Ensayos del SENA.

⁶⁹ ASTM. Designation: D 570-81. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

⁷⁰ ASTM. Designation: D618. Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se determina inicialmente las variables involucradas en las síntesis de las espumas, para analizar cuáles pueden ser controladas y qué tipo de variables respuestas se ven afectadas ante el cambio de éstas.

Como variables que pueden ser controladas se especifican: índice de NCO (o índice de isocianato) dado en equivalentes NCO/ equivalente OH, el porcentaje de incorporación de las fibras, el tipo de fibra a utilizar y el tiempo de crecimiento en medio frío.

Como variables respuestas se tienen: La densidad aparente, la absorción de agua y módulo de tensión.

El método escogido para el desarrollo metodológico experimental es el diseño factorial de dos factores, el cual tendrá como objetivo el análisis del efecto en la variable respuesta (densidad) ante los cambios de los niveles y factores, dos factores (porcentaje de incorporación de fibra y tipo de fibra) y tres niveles (%5, %10 y %15; fibras CM, CA y MCC); con un nivel de significancia de 0.05.

Se plantean las hipótesis: nula (H_0) y alterna (H_1) para los factores A y B.

- F_A

$H_0: \alpha = 0$

No hay efecto significativo en la densidad ante el cambio en el porcentaje de reemplazo de OH empleado en la síntesis de las espumas.

$H_a: \alpha \neq 0$

Sí hay efecto significativo en la densidad ante el cambio en el porcentaje de reemplazo de OH empleado en la síntesis de las espumas.

- F_B

$H_0: \beta = 0$

No hay efecto significativo en la densidad ante la incorporación de los diferentes tipos de fibra seleccionados para sintetizar las espumas.

$H_a: \beta \neq 0$

Sí hay efecto significativo en la densidad ante la incorporación de los diferentes tipos de fibra seleccionados para sintetizar las espumas.

- F_{AB}

H.: $\alpha\beta = 0$

No hay efecto significativo en la densidad ante el cambio en el porcentaje de reemplazo de OH y la incorporación de los diferentes tipos de fibras en la síntesis de las espumas.

H.: $\alpha\beta \neq 0$

Sí hay efecto significativo en la densidad ante el cambio en el porcentaje de reemplazo de OH y la incorporación de los diferentes tipos de fibras en la síntesis de las espumas.

Los resultados para cada nivel y factor en la prueba de densidad se encuentran en la Tabla 1. Se realizó una repetición para cada cálculo de densidad.

Tabla 1. Efecto en la densidad en kg/m³.

% Reemplazo OH	Tipo de fibra			Y _{i..}
	CM	CA	MCC	
5	22,36	22,63	21,80	135,88
	44,97	45,13	45,76	
10	22,61	22,50	23,96	155,19
	22,54	23,88	29,95	
15	22,70	25,83	30,27	184,32
	26,84	33,33	32,55	
Y _{.j.}	55,63	66,08	62,60	475,40
	28,78	32,74	30,05	
	145,86	160,93	168,59	Y _{...=}

CA= Cascarilla de arroz, CM= Cáscara mango, MCC= Microcristales de celulosa.

Bajo el modelo de análisis de varianza Anova se quiere contrastar la hipótesis, es decir, comparar las diferencias entre las medidas muestrales con la variabilidad experimental.

Para desarrollar el Anova es necesario obtener los valores a partir de las siguientes ecuaciones:

- Sub variables

Ecuación 1. Número total de datos.

$$N = a \times b \times n = 3 \times 3 \times 2 = 18$$

Ecuación 2. Suma total de datos.

$$Y_{\dots} = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^n Y_{ijk}$$

- Suma de Cuadrados (SC):

Ecuación 3. Suma de cuadrados totales.

$$SCT = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N}$$

Ecuación 4. Suma de cuadrados entre factor A.

$$SCE_A = \frac{1}{bn} \sum Y_{i..}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N}$$

Ecuación 5. Suma de cuadrados entre factor B.

$$SCE_B = \frac{1}{an} \sum Y_{.j.}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N}$$

Ecuación 6. Suma de cuadrados entre interacción AB.

$$SCE_{AB} = \frac{1}{n} \sum \sum Y_{ij}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N} - SCE_A - SCE_B$$

Ecuación 7. Suma de cuadrados del error residual.

$$SCD_{ER} = SCT - SCE_A - SCE_B - SCE_{AB}$$

- Grados de Libertad (GL):

Ecuación 8. Grados de libertad factor A.

$$a - 1$$

Ecuación 9. Grados de libertad factor B.

$$b - 1$$

Ecuación 10. Grados de libertad factor AB.

$$(a - 1)(b - 1)$$

Ecuación 11. Grados de libertad error residual.

$$ab(n - 1)$$

Ecuación 12. Grados de libertad número de datos.

$$N - 1$$

- Cuadrado Medio (CM):

Ecuación 13. Cuadrado medio de A.

$$CME_A = \frac{SCE_A}{a - 1}$$

Ecuación 14. Cuadrado medio de B.

$$CME_B = \frac{SCE_B}{b - 1}$$

Ecuación 15. Cuadrado medio de la interacción A B.

$$CME_{AB} = \frac{SCE_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$$

Ecuación 16. Cuadrado medio del error residual.

$$CMD_{ER} = \frac{SCD_{ER}}{ab(n - 1)}$$

Ecuación 17. Cuadrado medio total.

$$CMT = \frac{SCT}{N - 1}$$

Distribución F:

Ecuación 18. Distribución FAC (calculado) y FAT (tablas).

$$F_{AC} = \frac{CME_A}{CMD_{ER}} \quad F_{AT}(\alpha, a - 1, ab(n - 1))$$

Ecuación 19. Distribución FBC (calculado) y FBT (tablas).

$$F_{BC} = \frac{CME_B}{CMD_{ER}} \quad F_{BT}(\alpha, b - 1, ab(n - 1))$$

Ecuación 20. Distribución FABC (calculado) y FABT (tablas).

$$F_{ABC} = \frac{CME_{AB}}{CMD_{ER}} \quad F_{ABT}(\alpha, (a - 1)(b - 1), ab(n - 1))$$

Donde:

Factor A: % Reemplazo

Factor B: Tipo de fibra

α = nivel de significancia

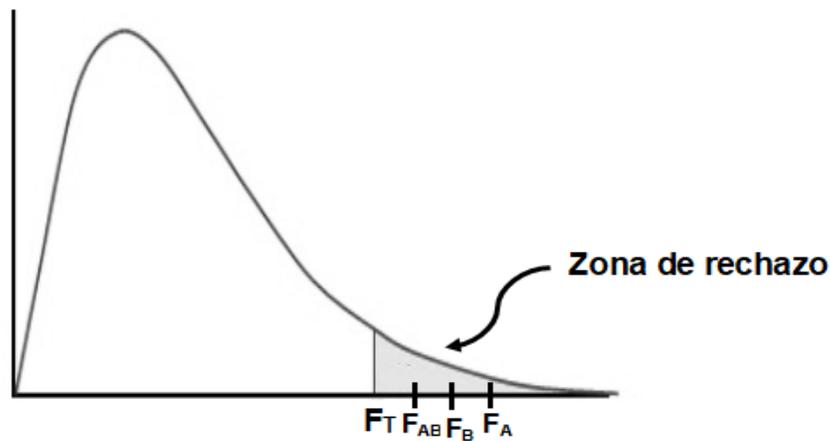
A partir de las ecuaciones 1 a 20 y los datos de las densidades para cada factor y nivel de la Tabla 1, se establece la tabla Anova (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Tabla ANOVA.

Fuentes de variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F calculado	F tablas
Entre % reemplazo	198,20	2	99,10	93,55	4,26
Entre tipo de fibra	44,59	2	22,29	21,04	4,26
Entre interacción	42,98	4	10,74	10,14	3,63
Error residual	9,53	9	1,05		
Total	295,32	17	17,37		

F calculado > Ftablas

Diagrama 1. Distribución F.



Debido a que los F calculados son mayores a las F de las tablas para las tres hipótesis planteadas se concluye que se rechazan todas las hipótesis nulas. Por lo tanto, se corrobora que si hay efecto significativo en la densidad de las espumas ante el cambio de porcentaje de reemplazo y el tipo de fibra que se use en la formulación; dado esto existe el potencial de que se consigan incrementar las propiedades mecánicas antes la incorporación de fibras naturales en las espumas rígidas de poliuretano.

3.1 REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS DE ORDEN 3

Ya que se evidencia la influencia de la incorporación de las fibras naturales en la densidad de las espumas de poliuretano mediante el uso de una regresión polinomial de orden 3, que garantice un $R^2 > 0,9$, se establece una ecuación de la densidad en función de cada tipo de fibra y su porcentaje de reemplazo con los datos experimentales.

Ecuación 21. Función densidad.

$$\rho_i(\% \text{ reemplazo}) = A_i X_i^3 + B_i X_i^2 + C_i X_i + D_i = f_i$$

Donde:

ρ =densidad

X = % Reemplazo (Intervalo comprendido entre 0% - límite máximo permitido)

i [CM, CA, MCC]

k= datos

Ecuación 22. Derivadas parciales de I_i con respecto a A_i , B_i y C_i .

$$\text{Cuando: } I_i = \sum (A_i X_{ik}^3 + B_i X_{ik}^2 + C_i X_{ik} + D_i - f_{ik})^2$$

$$\frac{dI_i}{dA_i} = \sum 2(A_i X_{ik}^3 + B_i X_{ik}^2 + C_i X_{ik} + D_i - f_{ik})(X_{ik}^2) = 0$$

$$\frac{dI_i}{dB_i} = \sum 2(A_i X_{ik}^3 + B_i X_{ik}^2 + C_i X_{ik} + D_i - f_{ik})(X_{ik}^2) = 0$$

$$\frac{dI_i}{dC_i} = \sum 2(A_i X_{ik}^3 + B_i X_{ik}^2 + C_i X_{ik} + D_i - f_{ik})(X_{ik}^2) = 0$$

$$\frac{dI_i}{dD_i} = \sum 2(A_i X_{ik}^3 + B_i X_{ik}^2 + C_i X_{ik} + D_i - f_{ik})(X_{ik}^2) = 0$$

A partir de las derivadas parciales se obtiene el sistema matricial que determina el valor de los coeficientes de la función densidad para cada tipo de fibra obteniendo las siguientes funciones:

Ecuación 23. Densidad en función del porcentaje reemplazo de CM.

$$\rho_{CM} = 0,0111X_{CM}^3 - 0,2308X_{CM}^2 + 1,5536X_{CM} + 19,1084$$

Ecuación 24. Densidad en función del porcentaje reemplazo de CA.

$$\rho_{CA} = 0,0094X_{CA}^3 - 0,1645X_{CA}^2 + 1,2794X_{CA} + 19,1084$$

Ecuación 25. Densidad en función del porcentaje reemplazo de MCC.

$$\rho_{MCC} = -0,0126X_{MCC}^3 + 0,2591X_{MCC}^2 - 0,2239X_{MCC} + 19,1084$$

A partir de la Ecuaciones 23, 24 y 25, se podría determinar la densidad aproximada en kg/m^3 de una espuma, dependiendo del tipo de fibra y el porcentaje de reemplazo empleado dentro del rango de incorporación efectiva de las fibras y de acuerdo a lo que describe la literatura, existe un porcentaje de incorporación límite donde la concentración de las fibras desestabiliza la estructura de la espuma formada, disminuyendo considerablemente las características y propiedades fisicomecánicas del polímero, como se observa en el estudio de H.D. Rozman⁷¹.

⁷¹ ROZMAN, YEO, TAY, ABUBAKAR. Op., cit., 617-623.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados que se determinaron durante todo el desarrollo experimental correspondientes a la metodología descrita en el capítulo 2.

4.1 PRETRATAMIENTO FÍSICO

Las cáscaras de mango que fueron suministradas por su alto contenido de agua y pulpa de la fruta, fueron inicialmente secadas en una estufa de secado durante 10 horas a 105°C⁷², obteniendo la siguiente pérdida de humedad con la Ecuación 26 a partir de los datos de la Tabla 3.

Tabla 3. Peso de cáscaras de mango antes y después del primer secado.

Muestra	Cáscaras de mango (g)
Antes	1880,22
Después	737,5

Ecuación 26. Pérdida de humedad cáscara de mango.

$$\%Perdida\ de\ peso = \frac{1880,22 - 737,5}{1880,22} \times 100 = 60,76\%$$

Luego, tanto las cáscaras de mango como las de arroz, se molieron en un molino de martillos para reducir el tamaño de las partículas, cabe resaltar que este tipo de molino no es muy eficiente para pulverizar partículas como las cascarillas de arroz, tal y como se muestra en la Tabla 4, donde la cantidad de cascarilla de arroz que se logró moler corresponde a menos de la mitad, ya que el tipo de molino recomendado para este tipo de cáscaras es el de cuchillas.

⁷² RAMIREZ S., REYES C. Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos de las ananas comosus (piña) para la producción de xilitol por hidrólisis enzimática. Fundación Universidad de América. Tesis de ingeniería química. 2017. p. 49.

Tabla 4. Cantidad de cáscaras de mango y arroz, antes y después de moler.

Muestra	Cáscaras de mango (g)	Cáscaras de arroz (g)
Antes	737,5	690,8
Después	601,4	232,1

Posteriormente cada una de las muestras fueron tamizadas durante 15 minutos en un equipo PINZUAR modelo PS-35 series 1358, utilizando las mallas que se muestran en la Tabla 5 y con las siguientes cantidades de partículas retenidas.

Tabla 5. Número y diámetro de abertura de las mallas seleccionadas y porcentaje retenido en cada una de ellas para cada tipo de cáscaras.

Diámetro µm	Número malla	Porcentaje retenido	
		Cáscara Mango	Cascarilla Arroz
149	100	10,6%	7,4%
125	120	5,9%	3,3%
105	140	6,1%	18%

Los tamaños de partícula deben ser pequeños con el fin de garantizar que la reacción ocurra de una manera eficiente, teniendo alta velocidad de reacción; con un tamaño de partícula menor, se aumenta la superficie de contacto. Además, la revisión bibliográfica realizada en el Cuadro 1, en su mayoría utilizan tamaños de partícula iguales o incluso más pequeños. Al tener mayor área superficial se mejora la adhesión interfase en la matriz polimérica lo que permite mayor interacción con los grupos isocianato⁷³. Tal y como lo corrobora H.D. Rozman⁷⁴ en su estudio con cascarillas de arroz, al evaluar las propiedades finales en una espuma rígida de poliuretano usando diferentes tamaños de partícula, encontrando mejores resultados con los tamaños de partícula más pequeños.

⁷³ HUANG Guohong, WANG Peng. Effects of preparation conditions on properties of rigid polyurethane foam composites based on liquefied bagasse and jute fibre. Elsevier, Polymer Testing 60, 2017, p. 273.

⁷⁴ ROZMAN, YEO, TAY, ABUBAKAR. Op., cit., p. 619.

Para la cáscara de mango, las partículas usadas para la experimentación fueron las de diámetro de partícula entre 105-125 μm , como se observa en la Figura 17.

Figura 17. Polvo de cáscara de mango (105-125 μm).



Para las cascarillas de arroz, las partículas seleccionadas para la experimentación fueron las de diámetro entre 105-149 μm , como se observa en la Figura 18.

Figura 18. Polvo de cascarilla de arroz (105-149 μm).



Se decide usar para la experimentación microcristales de celulosa (ver Figura 19), que son obtenidos de la celulosa de madera mediante tratamientos químicos, con el fin de comparar el desempeño de fibras con tratamientos químicos y fibras sin tratamiento (cáscara de mango y de arroz) en la formación de espumas de poliuretano.

Figura 19. Microcristales de celulosa (45-105 μm).



Las características y formas de cómo se obtienen los MCC se explican en la sección 1.6.5.

4.2 CARACTERIZACIÓN FIBRAS

A continuación, se muestran algunas características obtenidas de las fibras, posteriores al tamizado.

4.2.1 Porcentaje de Humedad. Con el fin de extraer la mayor cantidad de agua retenida, las muestras de cáscaras de mango y cascarillas de arroz pasaron a una segunda etapa de secado a 105°C durante 10 horas, se calcularon porcentajes de humedad mediante la ecuación 27. Los resultados se presentan en la tabla 6.

Ecuación 27. Porcentaje de humedad cáscaras.

$$\%Humedad = \frac{m_0 - m_s}{m_0} \times 100$$

Donde m_0 representa la masa de la muestra húmeda y m_s la masa de la muestra seca.

Tabla 6. Valores de humedad para cada una de las muestras de fibra.

Muestra	%Humedad
Cáscara de mango	5,28
Cascarilla de arroz	3,5
Microcristales celulosa	máx. 6*

*El valor reportado según el certificado de análisis del proveedor.

Para mantener los valores de humedad a lo largo de toda la experimentación, fue necesario almacenar las muestras de fibra en bolsas de aluminio con cierre hermético junto con bolsas de gel silica. A los microcristales de celulosa no se le realizó análisis ya que existe un certificado proporcionado por el proveedor.

4.2.2 Determinación de cantidad de lignina. Los resultados reportados por el Laboratorio de Instrumental de Alta Complejidad (LIAC) de La Salle se muestran en la siguiente Tabla 7. (También ver Anexo 1)

Tabla 7. Contenido de lignina en las muestras de fibra.

Muestra	% Lignina
Cáscara de mango	3,76
Cascarilla de arroz	30,4

Las cáscaras de mango presentan un porcentaje muy bajo con respecto a lo reportado por Serna y Torres con 4,71 % lignina⁷⁵, en su estudio para cáscaras de mango de la misma variedad Keitt. La cascarilla de arroz presenta un alto contenido de lignina a comparación de las cáscaras de mango, y con respecto a los valores en la literatura (aproximadamente 24,77 %⁷⁶) el contenido obtenido es más alto.

4.2.3 Determinación de cantidad de celulosa. Los resultados reportados por LIAC de La Salle se presentan en la siguiente Tabla 8. (Ver Anexo 1)

Tabla 8. Contenido de celulosa en las muestras de fibra.

Muestra	% Celulosa
Cáscara de mango	11,77
Cascarilla de arroz	28,80

En cuanto a la cantidad de celulosa reportada por Serna y Torres (7,79%) para la misma variedad de mango Keitt el resultado obtenido fue mayor, para las cascarillas de arroz el porcentaje de celulosa se encuentra dentro de los valores reportados en la literatura (28-36%)⁷⁷.

⁷⁵ SERNA L., TORRES C. Op., cit., p. 113.

⁷⁶ VARGAS J., ALVARADO P., VEGA J., PORRAS M. Op., cit., p. 90.

⁷⁷ *Ibíd.*, p. 90.

4.2.4 Determinación del número de OH. Determinar el contenido de grupos funcionales hidroxilo en las muestras de fibra, permitirá conocer la capacidad de las fibras para reaccionar con los grupos funcionales isocianato (NCO) presente en el MDI, el valor se reporta en mg de KOH por cada gramo de fibra. El valor encontrado para todas las muestras de fibra y el aceite de ricino se representa en la Tabla 9. Se hicieron dos repeticiones bajo condiciones ambientales similares. El resultado es aproximado ya que la humedad presente en las fibras y en el medio ambiente puede alterar el valor del número de OH.

También se determinó el porcentaje de NCO del MDI encontrando un valor de 24,35 ± 0,2. Para el poliol comercial, el certificado del proveedor especifica que el número de OH es de 240 mg KOH/ g poliol.

El peso equivalente del MDI se calculó mediante la Ecuación 28.

Ecuación 28. Peso equivalente MDI.

$$\text{Peso equivalente} = \frac{4202}{\%NCO}$$

El cálculo del peso equivalente de la fibra se determina con la relación de los equivalentes de NCO que reaccionan con ésta, mediante la diferencia entre el peso equivalente de isocianato puro y el del isocianato que reacciona con la fibra. Una vez determinada esa relación, se puede calcular el número de OH mediante la Ecuación 29.

Ecuación 29. Cálculo número de OH a partir de peso equivalente.

$$\text{Número OH} = \frac{56100}{\text{peso equivalente}}$$

Tabla 9. Número de OH para cada una de las muestras.

Muestra	N° OH (mg KOH / g muestra)
Cáscara de mango	146,65
Cascarilla de arroz	198,62
Microcristales de celulosa	231,26
Aceite de ricino	385,15
Poliol	240

El número de OH que presentan los polioles usados en la síntesis de espumas de poliuretanos está entre 200 y 800 mg KOH/ g ⁷⁸, esto indica que la única muestra de fibra que se encuentra significativamente por debajo de ese valor es el mango, debido a que contiene menos celulosa y lignina en su composición a comparación con la cascarilla de arroz; en el caso de los microcristales de celulosa el valor es mucho más alto debido a su alto grado de concentración de celulosa con estructura cristalina. Al igual que el aceite de ricino que contiene mayor cantidad de grupos OH libres lo que proporciona un mayor número de hidroxilos.

4.3 FORMACIÓN DE LAS ESPUMAS

En seguida, se describe el proceso y los resultados para la obtención de las espumas rígidas de poliuretano en cuanto a características y formulación realizada tanto para los ensayos tomados como pruebas preliminares como para la síntesis final de las espumas que fueron evaluadas.

4.3.1 Pruebas preliminares. Al seleccionar el índice de NCO (eq NCO/ eq OH) y una base de cálculo de gramos del isocianato se determina el total de equivalentes OH de la formulación mediante la Ecuación 30.

Ecuación 30. Índice de NCO.

$$1,1 = \frac{M_{iso} \div \text{Peso equivalente MDI}}{\text{Número total de equivalentes OH}}$$

Donde M_{iso} es la cantidad en g de isocianato MDI.

Para determinar la cantidad en gramos de cada fibra a adicionar, se usa la Ecuación 31.

Ecuación 31. Gramos de fibra para formulación.

$$g. \text{ de fibra} = \text{Número total equi. OH} \times (\% \text{reemplazo}) \times \text{Peso equi. fibra}$$

Para determinar la cantidad de polirol comercial a adicionar se calcula mediante la Ecuación 32.

⁷⁸ SZYCHER. Op., cit., p. 270.

Ecuación 32. Gramos de polioli comercial para formulación.

$$g. \text{ de polioli} = \text{Número total equi. OH} (100 - \% \text{reemplazo}) \times \text{Peso equi. polioli}$$

Con las Ecuaciones 30, 31 y 32; las primeras espumas formadas presentaron las siguientes proporciones como se observa en la Tabla 10. Los valores de concentración se reportan en partes por cien (ppc) base polioli comercial.

Tabla 10. Formulación ensayos preliminares.

Ensayo	%Reemplazo OH	MDI (ppc)	Fibra (ppc)	Tipo de fibra
1	0%	81	0	-
2	0%	81	0	-
3	10%	91	11	MCC
4	30%	117	44	MCC
5	50%	164	104	MCC
6	10%	91	18	CM
7	30%	117	70	CM
8	10%	91	13	CA
9	10%	117	52	CA

MCC= Microcristales de celulosa, CM= Cáscara mango, CA= Cascarilla de arroz.

Los primeros ensayos se realizaron bajo condiciones ambientales durante la etapa de reacción y de crecimiento de la espuma (ver Figura 20); se adicionó la cantidad de fibra según cada ensayo sobre el polioli comercial y se mezcló manualmente durante 2 minutos, por último, se adiciono el MDI y se mezcló hasta que inicio tiempo de crema.

Figura 20. Crecimiento de espuma ensayo 2 bajo condiciones ambientales.



Se siguió el crecimiento de las espumas, sus características y se tomaron las siguientes observaciones cualitativas para cada uno de los ensayos como se observa en la Cuadro 2.

Cuadro 2. Características cualitativas de los primeros ensayos preliminares.

Ensayo	Observaciones
1	La muestra sin fibra presenta un tiempo de alrededor de 2 minutos para alcanzar su volumen final y cerca de 30 segundos para no estar tactosa (pegajoso). La mezcla entre el polioliol y el MDI fue uniforme. Luego de desmoldar y cortar la espuma, se dejó al ambiente presentando encogimiento en su estructura.
2	Se repite el blanco pero con la mitad de la cantidad, para que la espuma no se rebose del molde; también se presenta encogimiento luego de cortar la muestra y dejarla expuesta al ambiente.
3	Los MCC se homogenizan completamente en la mezcla con el polioliol; los tiempos de crecimiento y curado no varían significativamente con el patrón del 0%. Luego de desmoldar y cortar la muestra se presenta encogimiento a partir del día siguiente. El tamaño de la celda se mantiene uniforme en toda la muestra.
4	Los MCC se homogenizan completamente con el polioliol, tiempos de crecimiento y curado dentro del promedio de 2 minutos y 30 segundos, también se presenta encogimiento luego de cortar y exponer la muestra al ambiente. La estructura es más compacta con respecto a los ensayos 2 y 3 de 0% y 10%.
5	La estructura de la espuma formada no es homogénea, se observa celdas irregulares en la superficie (Ver Figura 21) y además se presenta friabilidad, es decir que la estructura se siente porosa y ante un esfuerzo cortante o cizalla con los dedos se desprende material.
6	Se adiciona la CM en el polioliol y luego de varios minutos de mezclado no se homogeniza completamente, la espuma formada no muestra una buena dispersión de la fibra y se visualiza encogimiento al exponer la muestra al ambiente.
7	Paralelamente al ensayo 6, las fibras no se dispersan bien en la estructura de la espuma formada, los tiempos de crecimiento y secado no varían significativamente con respecto a los otros ensayos.
8	Aunque las CA se dispersan mejor que las CM no lo hacen completamente, se observa una espuma más compacta (menor volumen de crecimiento).
9	Paralelamente al ensayo 8, las fibras no se dispersan bien en la espuma y como todos los demás ensayos se presenta encogimiento de la muestra al dejarla expuesta al ambiente.

Figura 21. Celdas irregulares del ensayo número 6.



En los ensayos preliminares es notoria la disminución de volumen de las muestras formadas, esto se evidencia cuando hay un encogimiento de la espuma y puede ser ocasionado por la expulsión del gas contenido durante el proceso de expansión, debido a la poca estabilidad de las celdas formadas en la estructura⁷⁹. Autores como Porras⁸⁰, atribuyen el encogimiento de las espumas a la cantidad de agua que permanece sin reaccionar y es arrastrada por el aire seco al exponerse al medio ambiente. Adicionalmente otros autores como Huang G.⁸¹, afirman que al generarse una gran cantidad de calor por todas las reacciones involucradas, el tamaño de celda promedio que se forma es mayor y por ende las paredes celulares son más delgadas; cuando esto ocurre, las celdas no son capaces de resistir la presión negativa generada por los gases almacenados que se contraen al llegar a temperatura ambiente, entonces se observa encogimiento en la espuma.

Elegir un método de enfriamiento eficiente se convierte en uno de los pasos más importante para la obtención de espumas rígidas, ya que una espuma es inaceptable cuando posee un defecto como la reducción de tamaño y no uniformidad de su estructura. Es por esto que en los ensayos posteriores se utiliza como medio de enfriamiento durante el tiempo de crecimiento agua con hielo a $2^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Se define que los porcentajes de incorporación máximos será de 15% de fibra, para garantizar una buena dispersión en la estructura y para que no se presente friabilidad, con el objetivo de permanecer dentro del rango de incorporación efectiva de las fibras ya que según lo que describe la literatura existe un porcentaje de incorporación límite donde la concentración de las fibras desestabiliza la estructura

⁷⁹ SZYCHER, Op., cit., p. 264.

⁸⁰ PORRAS CARDENAS, Op., cit., p. 64.

⁸¹ HUANG Guohong, WANG Peng. Op., cit., p. 269.

de la espuma formada disminuyendo considerablemente las características y propiedades fisicomecánicas del polímero, como se observa en el estudio de H.D. Rozman⁸²

Adicionalmente, se prueba calentar la mezcla poliol-fibra para mejorar la homogeneización, pero no se evidencian cambios significativos. Luego se decide adicionar la fibra en el MDI para obtener una mayor dispersión de ésta y garantizar que toda la fibra reaccione completamente. Por último, se adiciona el poliol comercial.

En la segunda parte de los ensayos preliminares, se optó por adicionar aceite de ricino para, ayudar con la dispersión de las fibras y servir como un extensor de cadena ya que posee cadenas lineales y extensas que permite a la espuma adquirir consistencia, además es el único aceite vegetal que contiene grupos hidroxilo libres y según la revisión bibliográfica realizada para llevar a cabo un reemplazo total del poliol comercial se debe realizar con aceites vegetales en conjunto con fibras naturales. En la Tabla 11, se muestra la formulación empleada usando una base de MDI de cinco gramos en los ensayos con aceite de ricino.

Se realizó con una base de 10% de incorporación de éste, con respecto al número total de OH en cada uno de los ensayos.

Para calcular la cantidad de aceite de ricino a adicionar se utiliza la Ecuación 31 junto con su peso equivalente, la cantidad se mantuvo constante en todas las pruebas. Los valores se reportan en partes por cien (ppc) base poliol comercial.

Tabla 11. Formulación espumas con adición de aceite de ricino.

Ensayo	%Reemplazo total OH	AR (ppc)	MDI (ppc)	Fibra (ppc)	Tipo de fibra
10	10% AR	17	91	0	-
11	10%AR y 5% CM	18	97	9	CM
12	10%AR y 10% CM	19	102	20	CM
13	10%AR y 15% CM	20	109	33	CM
14	10%AR y 5% CA	18	97	7	CA
15	10%AR y 10% CA	19	102	15	CA
16	10%AR y 15% CA	20	109	24	CA
17	10%AR y 5% MCC	18	97	6	MCC
18	10%AR y 10% MCC	19	102	13	MCC
19	10%AR y 15% MCC	20	109	21	MCC

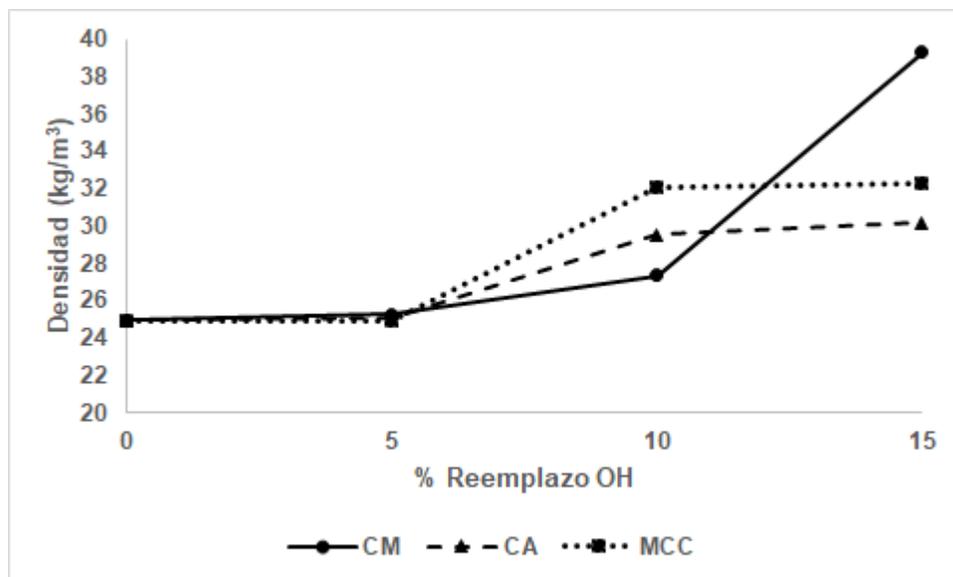
AR= Aceite de ricino, CM= Cáscara mango, CA= Cascarilla de arroz, MCC= Microcristales de celulosa.

⁸² ROZMAN, YEO, TAY, ABUBAKAR. Op., cit., 617-623.

Con la adición de un 10% de aceite de ricino y la mezcla de la fibra sobre el MDI, se observó una estructura más uniforme en las espumas sintetizadas y una mejor dispersión de las fibras. Una vez finalizado el tiempo de crecimiento de las espumas, se dejó enfriar en una nevera con hielo. Sin embargo, al dejar las muestras expuestas al medio ambiente, nuevamente se presenta encogimiento en su estructura.

Se determinó la densidad de los ensayos con aceite de ricino, para evaluar si los valores obtenidos, se encuentran dentro de los establecidos en la literatura para espumas rígidas de poliuretano. Los datos se representan en la Gráfica 1.

Gráfica 1. Efecto en la densidad para los ensayos con Aceite de Ricino.



Los valores que se encuentran establecidos en el Handbook de poliuretanos de Szycher⁸³ para densidades de espumas de poliuretano rígidas están entre: 20 kg/m³ a 50 kg/m³. De esta manera, los ensayos con aceite de ricino tienen valores que se ubican dentro de ese rango.

4.3.2 Formulación final. Después de realizar las pruebas preliminares se establece la formulación a emplear, el orden de adición de los reactivos, el medio de enfriamiento durante el crecimiento de la espuma y se decide no usar el aceite de ricino porque, aunque se presentó una buena dispersión de las fibras no se redujo el encogimiento, por esta razón, se evalúa la estructura final de la espuma con únicamente la adición de las muestras de fibra.

⁸³ SZYCHER. Op., cit., p. 260.

Nuevamente con el uso de las Ecuaciones 30, 31 y 32 las espumas sintetizadas presentaron la formulación que se describe en la Tabla 12; se adiciona la fibra sobre el MDI se mezcló durante 2 minutos a condiciones ambientales y posteriormente se adiciono el polioli comercial la mezcla se agitó durante aproximadamente 20 segundos hasta cuándo empezó el tiempo de crema. Nuevamente la formulación esta dada en partes por cien (ppc) base polioli comercial.

Tabla 12. Formulación espumas para evaluación.

Muestra	%Reemplazo OH	MDI (ppc)	Fibra (ppc)	Tipo de fibra
S0	0%	82	0	-
SCM5	5%	86	9	CM
SCM10	10%	91	18	CM
SCM15	15%	96	29	CM
SCA5	5%	86	6	CA
SCA10	10%	91	13	CA
SCA15	15%	96	21	CA
SMCC5	5%	86	5	MCC
SMCC10	10%	91	12	MCC
SMCC15	15%	96	18	MCC

SCM: Muestras cáscara de mango, SCA: muestras cascarilla de arroz, SMCC: muestras microcristales de celulosa

Una vez inicio el tiempo de crema, el recipiente con cada muestra se llevó inmediatamente dentro de un medio de agua con hielo a $2^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$; se registraron los tiempos de crecimiento en el medio frío como se observa en la Tabla 13. Por último, al terminar el tiempo de crecimiento las espumas sintetizadas permanecieron 5 minutos más en el medio frío y se dejaron al medio ambiente durante 3 días antes de desmoldar y cortar.

Tabla 13. Tiempos de crecimiento de las espumas preparadas.

Muestra	Tiempo de crecimiento (s)
S0	180
SCM5	158
SCM10	140
SCM15	160
SCA5	150
SCA10	155
SCA15	158
SMCC5	160
SMCC10	155
SMCC15	170

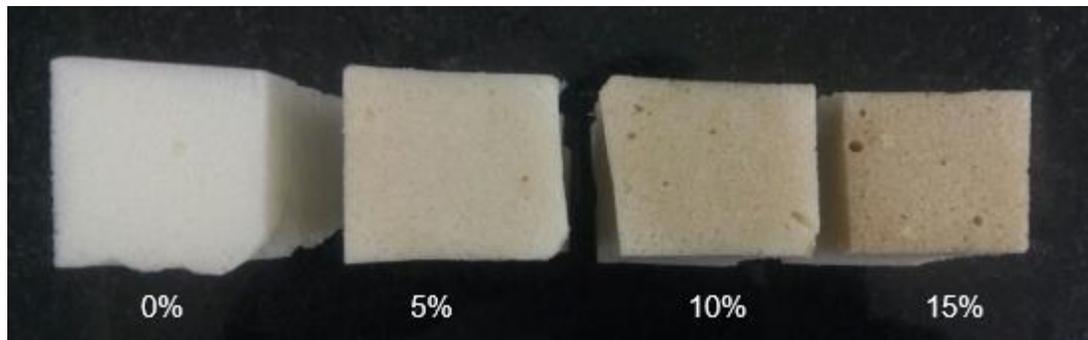
Las muestras presentaron un promedio de 150 segundos para alcanzar su volumen máximo. El tiempo de crecimiento es mayor cuando el medio de enfriamiento tiene menor temperatura; por su parte, los ensayos preliminares que experimentaron la fase crecimiento expuestos al medio ambiente tuvieron un tiempo promedio de 130 segundos.

4.4 CARACTERIZACIÓN ESPUMAS

Luego de desmoldar y cortar las espumas se observa el tamaño y la uniformidad de las celdas.

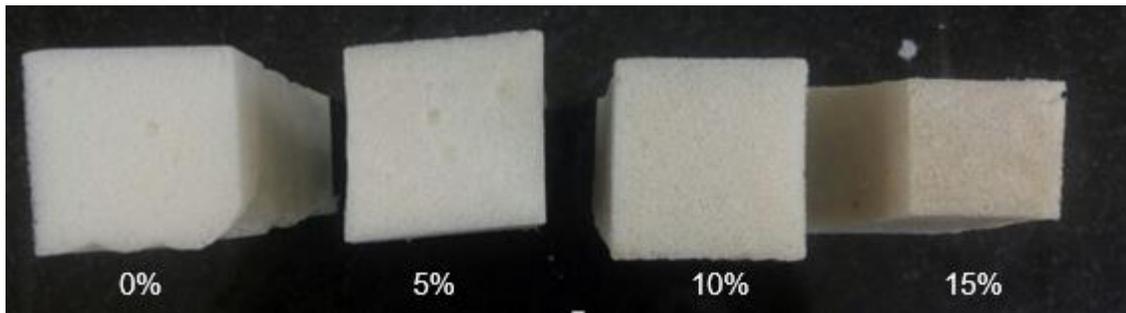
Las espumas con incorporación de CM, como se observa en la Figura 22, presentan una estructura casi uniforme y una buena dispersión de las fibras; el tamaño de los poros es casi uniforme en toda la espuma, se pueden observar en las muestras de 10% y 15% algunos espacios de aire que quedaron atrapados durante las etapas de mezclado y crecimiento. Adicionalmente, se observa que, a mayor concentración de cáscara de mango, el color de las espumas es más café caramelo.

Figura 22. Estructura de las espumas para los ensayos con cáscara de mango.



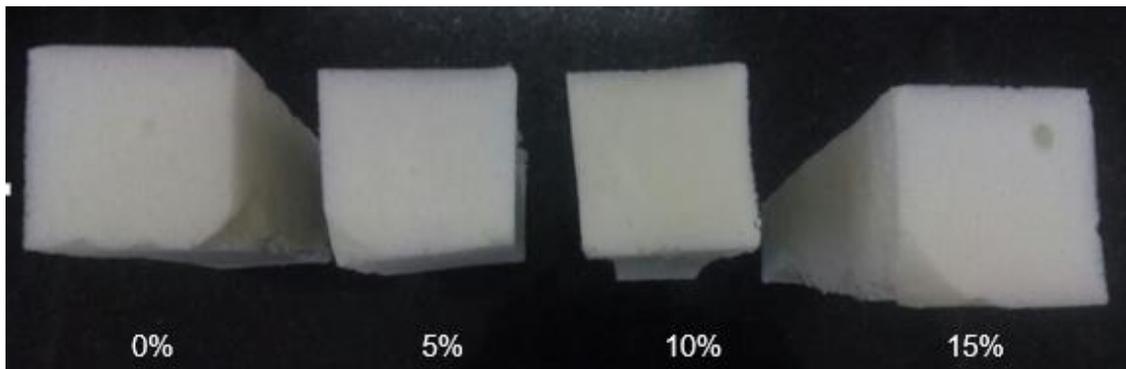
Las muestras con CA, como se observa en la Figura 23, presentan una estructura uniforme y una mejor dispersión de las fibras con respecto a las muestras con CM. El tamaño de poros es casi uniforme en toda la espuma y se observan espacios de aire únicamente en la muestra de 5%; las muestras con CA se perciben más densas y rígidas que las espumas con CM. Además, se observa coloración a mayor concentración de CA, siendo mucho más intensa la coloración en las espumas obtenidas con mango, debido al incremento inminente de carotenoides en las espumas.

Figura 23. Estructuras de las espumas para los ensayos con cascarilla de arroz.



Los MCC se dispersan completamente en la mezcla con el MDI y el polirol. El tamaño de poro es uniforme y solo se evidencia un espacio de aire en la muestra de 15%; la incorporación de los MCC en la espuma no genera ningún cambio de color significativo, a causa de su coloración, particularmente blanca, ver Figura 24.

Figura 24. Estructura de las espumas para los ensayos con microcristales de celulosa.



En general todas las muestras de espumas rígidas preparadas presentaron un tamaño de poro uniforme y se observa un menor volumen de crecimiento final al incrementar el porcentaje de fibra en la formulación. En cuanto al encogimiento de las espumas al dejarlas expuestas al medio ambiente, se redujo considerablemente con respecto a lo observado en los ensayos preliminares, aunque no se detuvo el encogimiento por completo. Se obtuvieron espumas con estructuras más estables y se podría considerar un enfriamiento más efectivo e incluso la adición o cambio en los aditivos usado en espumas de poliuretano para conseguir espumas con estructuras completamente funcionales y que no presenten encogimiento.

4.4.1 Reducción del encogimiento. De las pruebas preliminares realizadas se observó encogimiento inesperado en todas las muestras sintetizadas, luego de cortarlas y dejarlas expuestas al medio ambiente; para las espumas finales se utilizó un medio de enfriamiento durante la etapa de crecimiento con el fin de evitar el encogimiento. Se observó el comportamiento de la estructura de las espumas formadas para comparar la reducción del encogimiento con respecto a las espumas de prueba. En la Tabla 14, se registra los valores de pérdida de volumen de diferentes muestras con el paso del tiempo al estar expuestas al medio ambiente.

Tabla 14. Pérdida de volumen en algunas de las muestras de espuma preparadas.

Muestra	Volumen inicial (cm³)	Volumen perdido (cm³)	% Perdido
#10	105,00	35,34	33,66
#11	148,48	34,98	23,56
#18	129,81	72,82	56,10
S0	23,80	0,27	1,12
SCA5	27,00	0,90	3,35
SCM10	8,80	0,00	0,00
SCM5	91,35	0,96	1,05
SMCC5	17,00	0,02	0,13

Las muestras que se presentan en la tabla anterior se escogieron aleatoriamente y con diferentes dimensiones, para analizar el cambio en el volumen de las espumas cuando se presenta encogimiento. Las muestras denominadas #10, #11 y #18 corresponden a los ensayos con aceite de ricino que se observan en la Tabla 11, estas muestras presentan grandes pérdidas de volumen al ser expuestas al ambiente siendo la #18 con un porcentaje de pérdida de volumen de 56%, a comparación las otras muestras presentan una disminución considerable en la pérdida de volumen alcanzando un valor máximo de 3,35% para la muestra SCA5.

4.4.2 Densidad aparente. Se tomaron dos muestras de 4x3x2 cm (largo x ancho x espesor) para cada espuma sintetizada. Se determinó la masa en kg y su volumen aparente; mediante la Ecuación 33, se calcularon los valores de densidad que se representan en la Gráfica 2.

Ecuación 33. Cálculo densidad aparente.

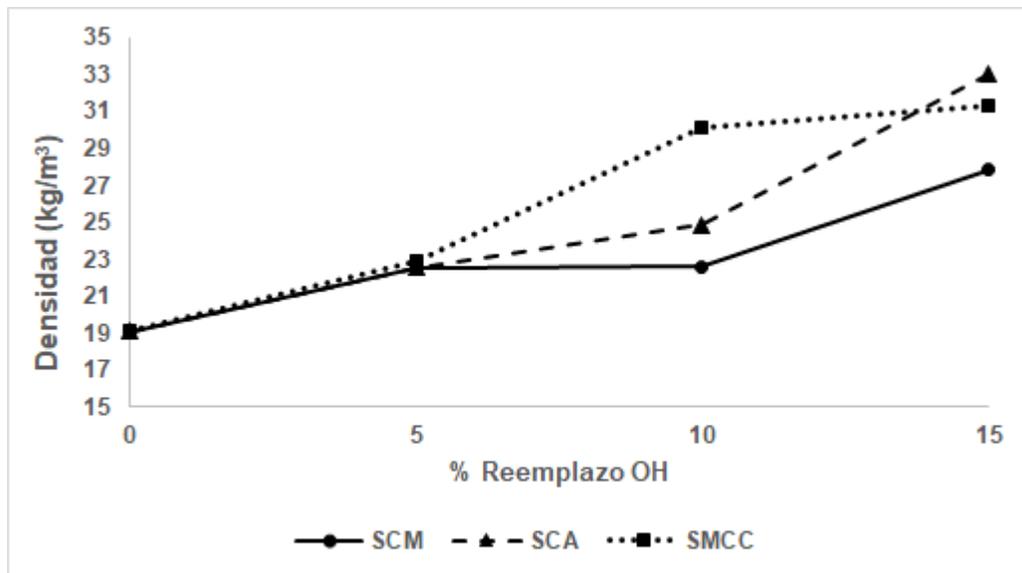
$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

m= masa de la muestra de espuma en kg.

V= volumen aparente en m³.

Gráfica 2. Efecto del porcentaje de reemplazo OH en la densidad.



SCM: Muestras cáscara de mango, SCA: muestras cascarilla de arroz, SMCC: muestras microcristales de celulosa

Las muestras con un porcentaje de reemplazo del 5% para cualquiera de los tres tipos de fibra poseen una densidad alrededor de 22,5 kg/m³. Cuando se pasa a un reemplazo del 10% la muestra con MCC posee la densidad más alta alcanzando 30,11 kg/m³, mientras que las muestras de CM y CA están por debajo de 25 kg/m³ siendo la de CM la más baja. Cuando las muestras poseen 15% de reemplazo de OH, la muestra con CA alcanza la mayor densidad tomando un valor de 33,04 kg/m³; para la muestra con MCC no hay diferencia significativa al pasar de 10% al 15%. La muestra con CM solo percibe un crecimiento en la densidad, significativo, al pasar de 5% al 10%.

Los valores que se encuentran establecidos en la literatura para densidades de espumas de poliuretano rígidas están entre: 20 kg/m³ a 50 kg/m³. De esta manera,

únicamente la muestra que posee 0% de reemplazo de fibra se encuentra por debajo de este rango, las muestras con fibra de 5% a 15% si se encuentran dentro del rango.

La densidad es una de las propiedades más importantes en las espumas de poliuretano, ya que simplemente al cambiar la densidad varían las demás propiedades. Por ejemplo, propiedades como la resistencia a la compresión, tensión, flexión, conductividad térmica y absorción de agua, dependen y se ven afectadas en gran medida por la densidad. En el Handbook de Szycher⁸⁴ se muestra que por lo general en las espumas rígidas de poliuretano sus propiedades mecánicas como resistencia a la compresión y módulos de tensión y esfuerzo, incrementan al aumentar la densidad. Por lo tanto, se podría esperar que las espumas con mayor incorporación de fibras en su formulación y que tienen mayor densidad a la de referencia, mejoren sus propiedades mecánicas; así como han reportado diversos estudios al reforzar espumas de poliuretano con fibras lignocelulósicas.

Adicionalmente, Szycher⁸⁵ clasifica los usos comunes de las espumas dependiendo de su densidad (baja, media y alta). Las muestras de espumas sintetizadas se encuentran dentro de la región media, donde los usos más comunes para las espumas de este tipo son aislantes, relleno para construcción, piezas de construcción y materiales flotantes. En el certificado del proveedor se especifica que los reactivos funcionan para realizar piezas aislantes y relleno de todo tipo de cavidades como tanques, paneles, cámaras frigoríficas, entre otras.

4.4.3 Absorción de agua. Se analizó la capacidad de absorción de agua de las muestras de espuma sintetizadas; para calcular el porcentaje de absorción se determinó la masa en gramos antes y después de ser sumergidas en el agua y mediante la Ecuación 34 se calcularon los datos que se observan en la Gráfica 3.

Ecuación 34. Cálculo porcentaje absorción de agua.

$$\%Absorción = \frac{m_{despues} - m_{antes}}{m_{antes}} \times 100$$

Donde:

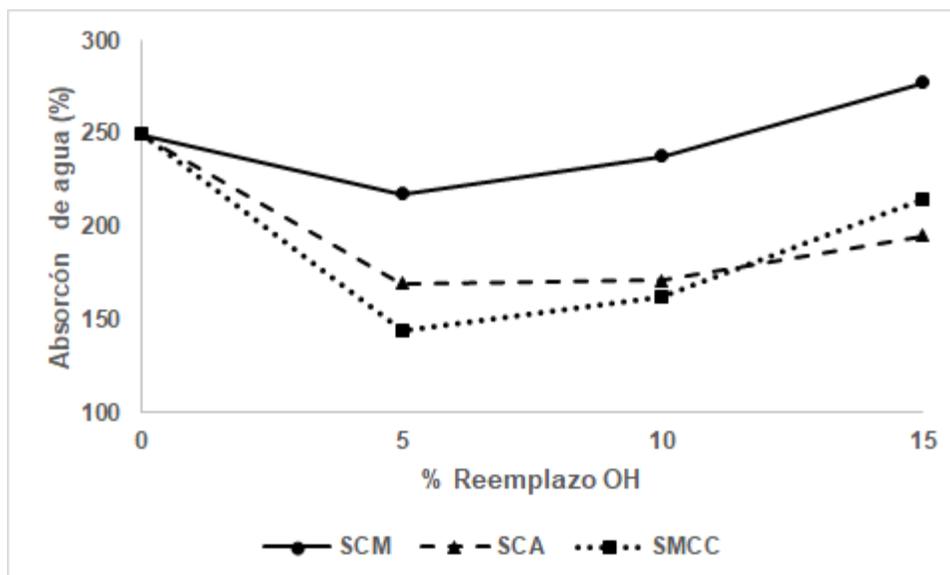
m_{antes} = masa de la muestra antes de sumergirla.

$m_{después}$ = masa de la muestra después de sumergirla.

⁸⁴ Ibíd., p. 259.

⁸⁵ Ibíd., p. 293.

Gráfica 3. Efecto del porcentaje de reemplazo OH en la absorción de agua.



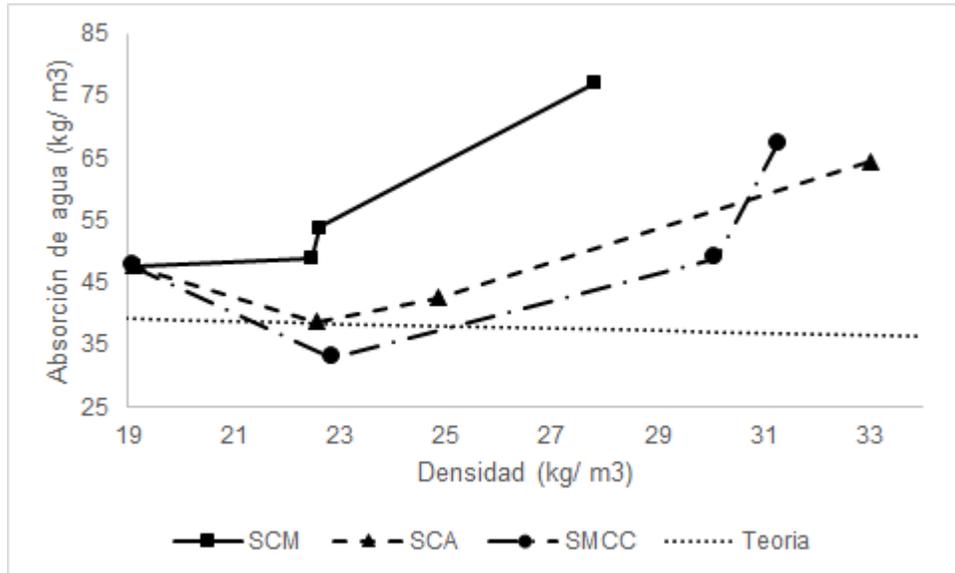
De acuerdo a lo observado en la Gráfica 3 se evidencia que, inicialmente, la tendencia de las espumas es disminuir su porcentaje de absorción de agua a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de OH por parte de las fibras. En el caso de las muestras con CM, se presenta mayor capacidad de absorción de agua con respecto a las otras fibras, siendo a un porcentaje de reemplazo del 15% un incremento de 277,30% de masa de la muestra. Las muestras de CA y MCC tienden a un comportamiento similar, pero al 15%. La muestra de MCC alcanza mayor porcentaje de absorción.

Para las muestras con CA, al compararlas con los resultados en el estudio de H.D. Rozman, donde el máximo porcentaje alcanzado fue de 80%, se obtuvieron mejores resultados en cuanto a la capacidad de absorción de agua de las espumas preparadas en este estudio (superior al 100%).

Ahora, teniendo en cuenta la Gráfica 2, la densidad aparente aumenta con la concentración de fibras y si se observa la Gráfica 4, la línea que representa la teoría⁸⁶ establece que a mayor densidad disminuye la absorción de agua; por lo tanto, para las muestras de espuma con más de 5% aprox. la tendencia de disminuir la capacidad de absorción de agua se ve contrarrestada por la concentración de fibras, ya que este tipo de fibras lignocelulósicos son higroscópicas, es decir, capaces de retener agua en su interior.

⁸⁶ Tomado de: *Ibíd*, p, 259.

Gráfica 4. Variación de la absorción de agua con el cambio de la densidad.



En el caso de la gráfica 4, los datos de absorción de agua están representados como la cantidad de agua en kilogramos que es capaz de retener un metro cúbico de espuma. Para las muestras preparadas con CA y MCC al superar una densidad de 23 kg/m³, la tendencia de disminuir en cuanto a la capacidad de absorción de agua cambia, en el caso de las muestras de espuma con CM la tendencia mantiene un constante aumento de absorción de agua.

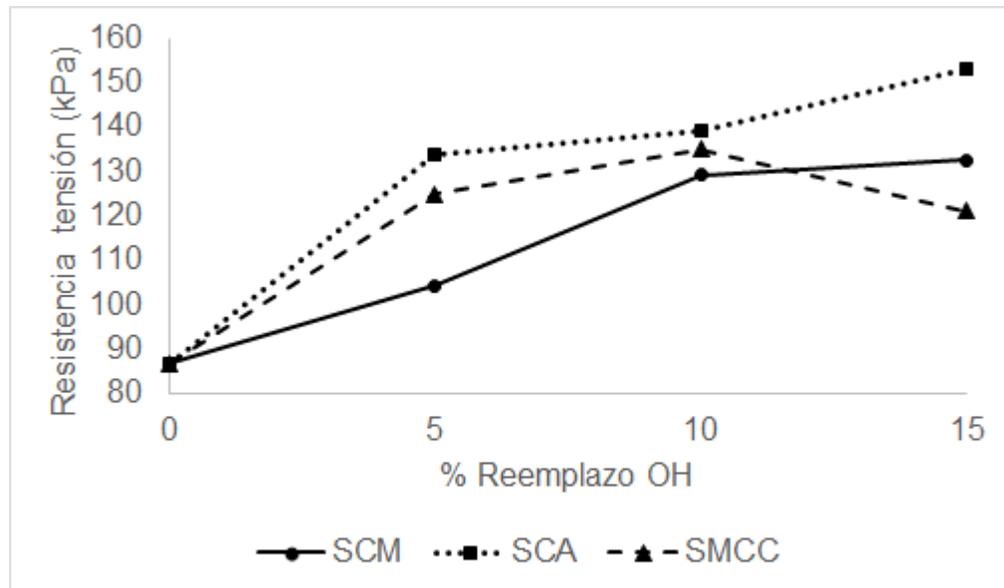
4.4.4 Resistencia a la tensión. Los resultados obtenidos del laboratorio de materiales y ensayos del SENA se pueden observar en el Anexo 2. A partir de la carga máxima y el área efectiva de sección transversal de la muestra se obtiene la resistencia a la tensión en kPa a partir de la Ecuación 35.

Ecuación 35. Cálculo resistencia a la tensión.

$$Resistencia = \frac{Carga\ máxima}{Area}$$

Las características mecánicas de los materiales son necesarias para determinar la funcionalidad de estos ante los esfuerzos o cargas que podrían sufrir durante su periodo de uso. Los valores de la resistencia a la tensión de las muestras evaluadas se presentan en el Gráfico 5.

Gráfica 5. Efecto del porcentaje de reemplazo de OH en la resistencia a la tensión.



La Gráfica 5 muestra la tendencia que presentan los resultados de las muestras ante el incremento del porcentaje de reemplazo de OH en la formulación de la espuma; esta tendencia es similar a la que se presenta en densidad aparente y en parte, a la absorción de agua. De los resultados y el análisis obtenido en el efecto de la densidad aparente, se esperaba que a medida que el porcentaje de reemplazo de OH en las muestras fuera mayor, las propiedades mecánicas se incrementarían y por ende mejorarían. Esto se hace evidente, de forma efectiva en las muestras con incorporación de CM y CA, especialmente, en las muestras con CA que poseen los valores más altos para cada una de las variaciones en el reemplazo, con una resistencia de 152,92 kPa a un porcentaje de reemplazo de 15%. Al realizar la comparación con los resultados obtenidos por H.D. Rozman⁸⁷, la muestra de espuma con un reemplazo del 20%, registra un valor de 6 MPa, para resistencia a la tensión, siendo éste superior con respecto al encontrado en el presente estudio cuando el reemplazo es del 15% con CA.

Las propiedades mecánicas están estrechamente relacionadas con la estructura de la espuma, el tamaño de las celdas y el tipo de celda (abierta, semicerrada y cerrada). Ante la adición de fibras naturales, la estructura de la espuma se vuelve más rígida lo que permite un mayor porcentaje de celdas cerradas, por esto se

⁸⁷ ROZMAN, YEO, TAY, ABUBAKAR. Op., cit., p. 620.

aprecia el efecto reforzante de las fibras naturales en las espumas de poliuretano, principalmente para las muestras con CA que poseen mayor porcentaje de lignina y celulosa en su composición.

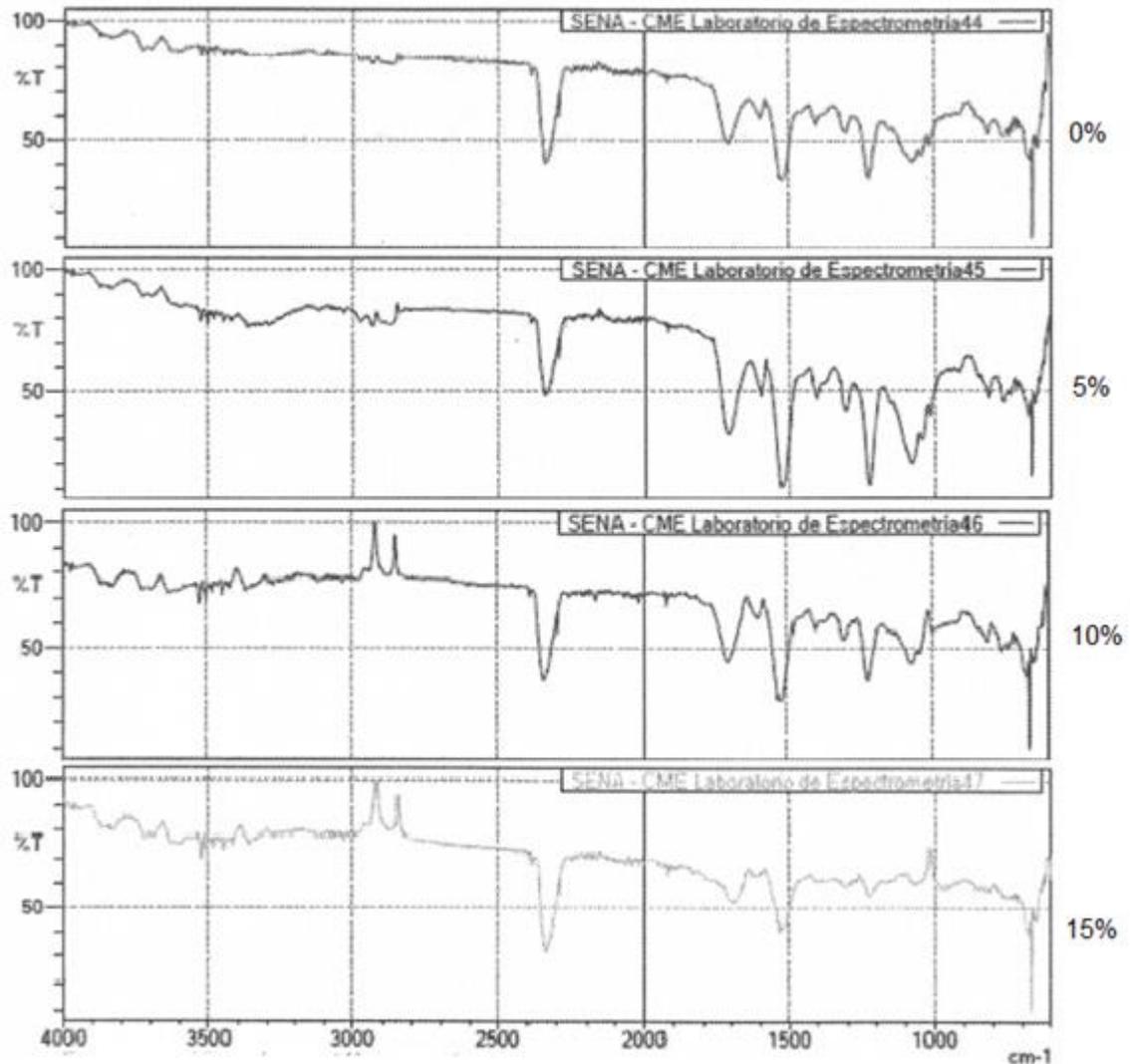
En el caso de las muestras con MCC, al pasar de 10% al 15% la resistencia a la tensión disminuye de 135 kPa a 121,16 kPa, respectivamente. Se podría afirmar que al 15% de incorporación, los MCC alcanzan a desestabilizar la estructura; sin embargo, para corroborar dicha afirmación, sería necesario seguir incorporando mayores porcentajes en los MCC y evaluar las propiedades finales de la espuma, verificando que no se puede llevar el porcentaje de reemplazo más allá del 15%.

Con los resultados generales en la mejora de la resistencia a la tensión, puede suponerse que las demás propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, módulo de tensión, dureza, entre otras podrían verse también mejoradas con la incorporación de fibras naturales de origen lignocelulósico.

4.4.5 Espectroscopia infrarroja FTIR. Para cada muestra de espuma se tomaron aproximadamente 3 gramos y se llevaron al laboratorio de materiales y ensayos del SENA, para ser analizados mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier, los resultados también se pueden ver en el Anexo 3.

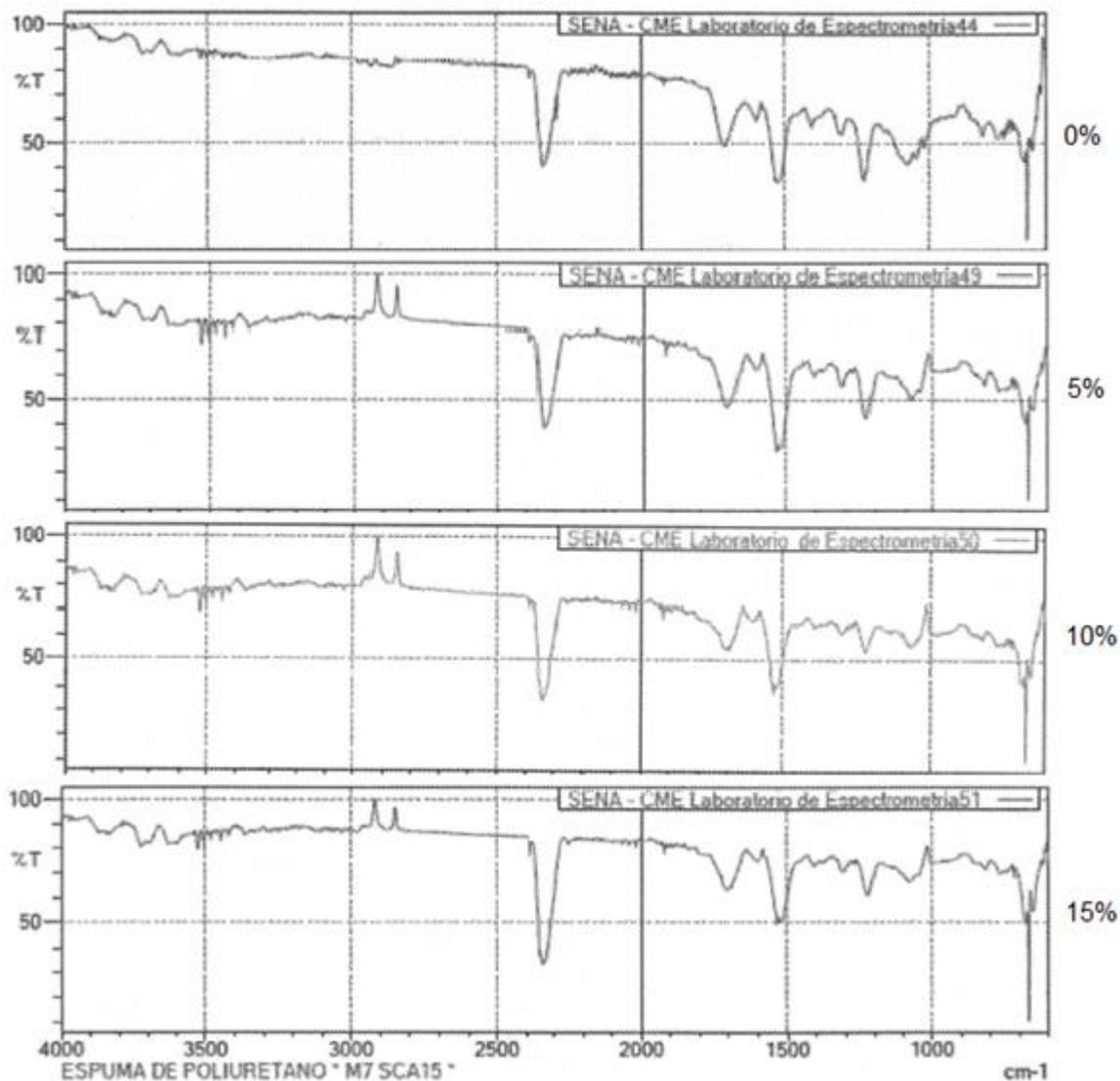
Las gráficas que se presentan a continuación, muestran un paralelo entre los resultados obtenidos de la muestra referencia con las muestras que tienen porcentajes de sustitución de fibra de 5, 10 y 15 por ciento de cada tipo de fibra. Por lo tanto, en la Gráfica 6 se aprecia el espectro correspondiente a las muestras con CM; en la Gráfica 7 se encuentra el espectro de las muestras con CA. Por último, la Gráfica 8 expone el espectro respectivo a las muestras con MCC.

Gráfica 6. Comparación espectros infrarrojo de las muestras con CM.



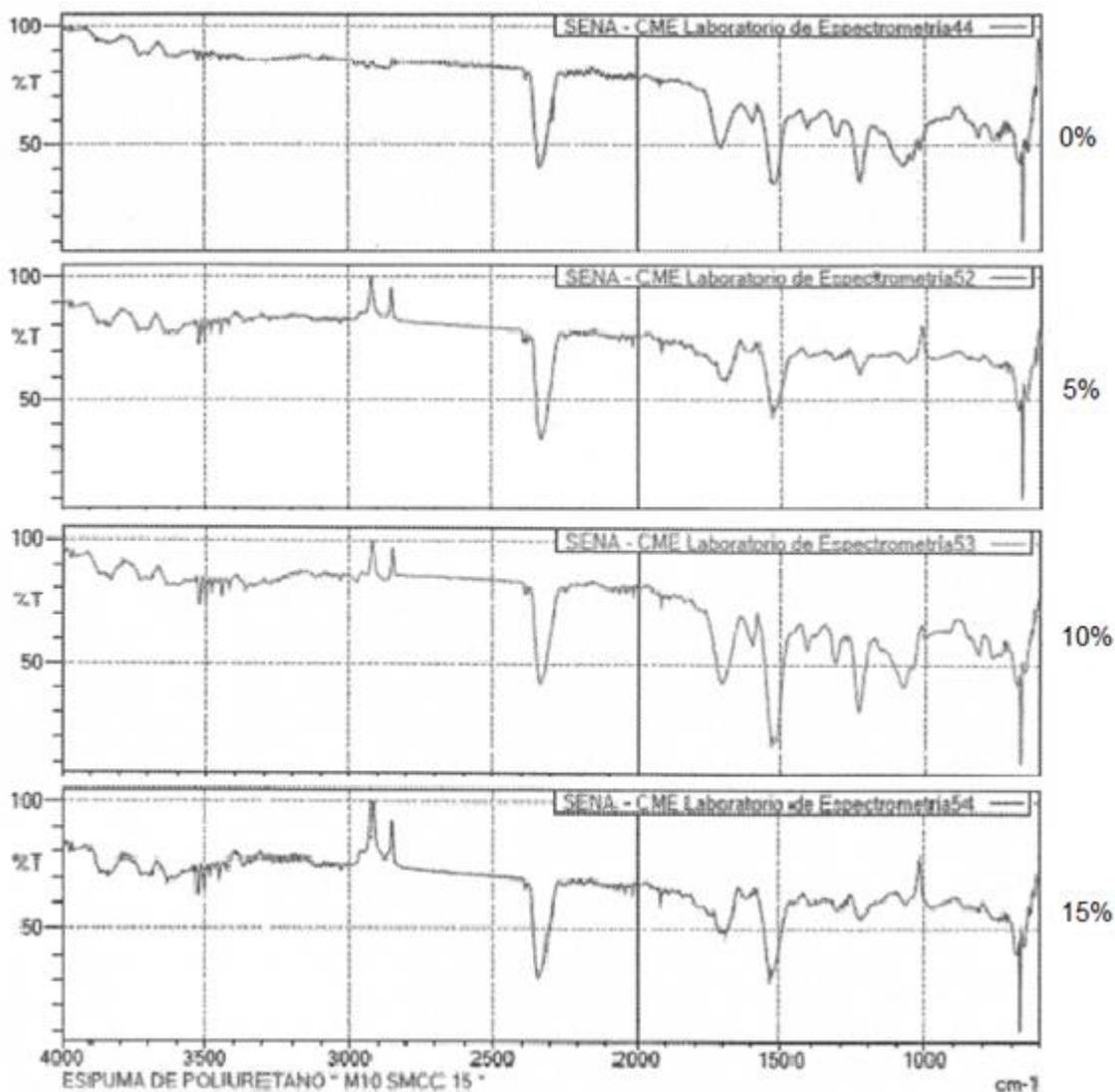
Los espectros observados en la gráfica anterior son los resultados que se obtuvieron a partir de las muestras con CM, teniendo como referencia la espuma que no contiene incorporación de ningún tipo de fibra. En la zona correspondiente a los 2400-2300 cm⁻¹ se pronuncia un pico perteneciente a enlaces C≡C y C≡N; la región comprendida entre los 1700-1600 cm⁻¹ evidencia un pico característico de los grupos carbonilo confirmando la formación de grupos uretano; entre 1600-1500 cm⁻¹ se forma un pico intermedio generado por la vibración de los enlaces C=C de los anillos del MDI. Entre 1300-1000 cm⁻¹ se presentan unos picos medianos correspondientes a los grupos aromáticos del MDI.

Gráfica 7. Comparación espectros infrarrojo de las muestras con CA.



El espectro observado corresponde a las muestras con CA, teniendo como referencia la espuma que no contiene incorporación de ningún tipo de fibra. Una vez más, se evidencia un pico perteneciente a enlaces $\text{C}\equiv\text{C}$ y $\text{C}\equiv\text{N}$ entre los números de onda 2400-2300 cm^{-1} ; al igual que en el caso de las muestras de CM, la región comprendida entre los 1700-1600 cm^{-1} pronuncia un pico característico de los grupos carbonilo confirmando la formación de grupos uretano; se forma un pico intermedio generado por la vibración de los enlaces $\text{C}=\text{C}$ de los anillos del MDI en un rango de número de onda entre 1600-1500 cm^{-1} . El intervalo 1300-1000 cm^{-1} presenta picos medianos perteneciente a grupos aromáticos del MDI.

Gráfica 8. Comparación espectros infrarrojo de las muestras con MCC.



Finalmente, los espectros observados corresponden a las muestras con MCC, teniendo como referencia la espuma que no contiene incorporación de ningún tipo de fibra. El análisis químico no varía significativamente con respecto a los resultados evidenciados en CM y CA, razón por la cual se confirma la presencia de los mismos grupos químicos en los mismos intervalos de números de ondas pertenecientes a una región determinada, según sea el caso. Sin embargo, se destaca un aumento de transmitancia en la zona comprendida entre $1600-1500\text{ cm}^{-1}$ cuando se pasa del 10% al 15%, dicho comportamiento no es evidente en anteriores espectros.

Observando detalladamente los datos y gráficas obtenidas en todas las muestras, que se encuentran en el Anexo 2, el espectroscopio analiza cada uno de los resultados obtenidos y de acuerdo a las posibles opciones del tipo de material que puede ser, compara con los compuestos almacenados en su base de datos, encontrando en todos los casos que el más parecido a los espectros resultantes corresponde al polímero de poliuretano rígido, siendo muy similar dicha tendencia a lo largo de todas las comparaciones realizadas.

5. ANÁLISIS BENEFICIO COSTO

En este capítulo se analizan algunos de los costos que se ven implicados en la producción de espumas de poliuretano rígidas con incorporación de fibras lignocelulósicas, con el fin de evaluar las ventajas o desventajas que se presenten con esta implementación.

5.1 COSTOS DE MATERIA PRIMAS

Los costos brutos de las materias primas utilizadas en las espumas de poliuretano obtenidas se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Costos de materia prima.

Materia prima	Precio (pesos/ kg)
MCC	275.554
CA	1.714
CM	1.000
MDI	48.000
POLIOL	48.000

Los MCC, por ser derivados de celulosa de madera y estar en un alto grado de pureza (para ser apto para el consumo humano), tienen el costo más elevado por kilogramo.

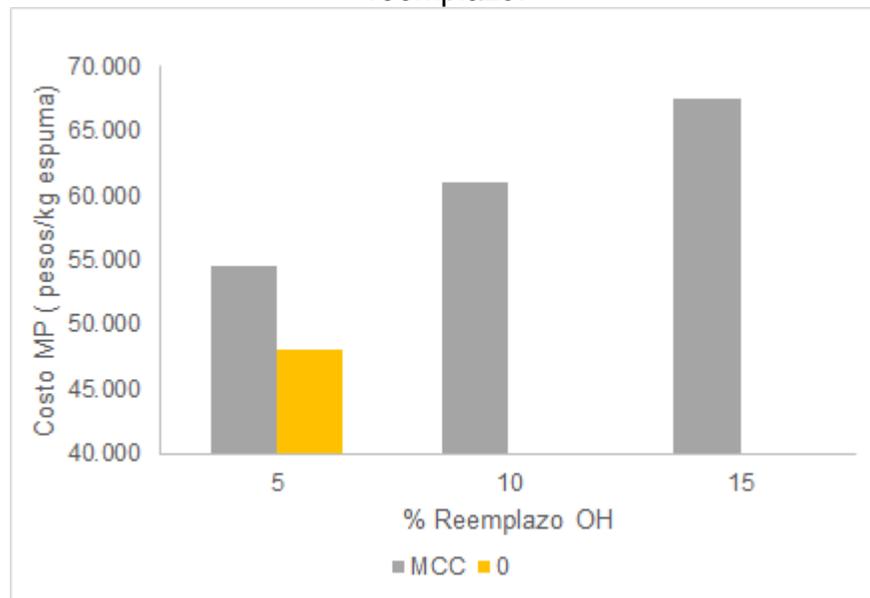
A partir de los datos de la Tabla 15 y los datos de la formulación de la Tabla 12, se calculan los costos en cuanto a materias primas para producir un kilogramo de espuma a diferentes porcentajes de MCC, que es la única fibra que no necesita algún tratamiento previo para su utilización, los resultados se reportan en la Tabla 16.

Tabla 16. Costo por kg de espuma para diferentes porcentajes de reemplazo.

%Reemplazo	Costo por kg de espuma (pesos/kg) MCC
0	48.000
5	54.485
10	60.957
15	67.415

Con los datos de la tabla anterior se realiza la Gráfica 9, que representa de manera gráfica dichos costos.

Gráfica 9. Costos de materia prima para los MCC en diferentes porcentajes de reemplazo.



En la Gráfica 9, se puede observar que, para las muestras con MCC los costos son mayores con respecto al de referencia y entre mayor sea el porcentaje de incorporación, mayor serán los costos de materia primas. Las muestras con MCC tienen un incremento hasta del 40% en los costos con un porcentaje de reemplazo del 15%. Aunque algunas de las propiedades de las espumas con MCC se ven mejoradas (densidad y absorción), el incremento en los costos de la materia prima contrarresta los beneficios de su uso.

En cuanto a la evaluación de costos de materias primas para producir un kg de espuma de las muestras con CA y CM, es importante incluir los costos correspondientes al tratamiento de las fibras para que puedan ser usadas en la formación de las espumas. Para la fabricación de espumas de poliuretano con incorporación de CA o CM, se hace necesaria la implementación de tres etapas en el proceso, secado, molienda y almacenamiento. En el Diagrama 2, se representan las etapas adicionales del tratamiento físico de las fibras para que puedan ser usadas en la incorporación en espumas de poliuretano.

Diagrama 2. Diagrama de bloques de etapas adicionales para tratar las CA y CM.



A partir del diagrama de proceso planteado, se analizan los equipos esenciales para las etapas de secado y molienda, la descripción de los equipos y sus precios se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Equipos requeridos para las nuevas etapas.

Equipo	Descripción	Imagen
Molino cuchilla pulverizador	Molino de cuchillas con capacidad de procesar variedad de materiales a una tasa de alrededor de 2 kg/lote. Precio 1'250.000 COP. 3 años de vida útil aprox. Fuente: Mercadolibre	
Horno de secado	Horno de secado con la capacidad de secar gran variedad de materiales y biomasa a una capacidad de 120 kg/lote aprox. Precio 12.000.000. 7 años de vida útil aprox. Fuente: Alibaba	
Silo de almacenamiento	Silo de almacenamiento para diversos materiales: granel, polvos, pellets. Hecho de acero galvanizado. Capacidad 600 litros. Precio: 3.600.000 20 años de vida útil aprox. Fuente: Alibaba.	

Con los equipos que se representan en el Cuadro 3, se podría procesar más de 2000 kg de biomasa al mes. Los costos de inversión se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Costos de inversión.

Inversión	Precio en pesos
Horno de secado	12.000.000
Molino cuchillas pulverizador	1.250.000
Silo de almacenamiento	3.600.000
Total	\$16.850.000

La cascarilla de arroz es la fibra seleccionada para los análisis finales, porque las muestras de espumas con CA presentaron las mejores características estructurales y propiedades mecánicas a comparación de las otras dos fibras; además, es una de los residuos lignocelulósicos más generados en el país y está disponible a un bajo precio.

Se propone una base de cálculo con las siguientes condiciones:

- Molienda de 10 kg de cascarilla de arroz por hora.
- Promedio de 24 días hábiles de trabajo en un mes.
- Un valor promedio de \$493,44 por kWh para la ciudad de Bogotá en el año 2017⁸⁸.

La potencia del horno y del molino tiene un valor de 3 kW para cada uno; 7 horas de trabajo al día del molino y 10 horas para el horno de secado. Por lo tanto, se tiene que la cantidad a procesar de CA es de 1344 kg al mes. Con estos datos, se observa en la Tabla 18, los costos de consumo energético mensual de los equipos de secado y molienda de materia prima para la cascarilla de arroz (pesos por kilogramo de cascarilla de arroz procesada).

Tabla 18. Costos de consumo energético mensual de los equipos.

Equipo	kWh/día	kWh/mes	\$/mes
Molino	21	504	248.696
Horno	30	720	355.280

⁸⁸ Tarifas de energía eléctrica (\$/kwh). Codensa. Enero de 2018. Disponible en: <https://www.codensa.com.co/empresas/mi-cuenta/tarifas-de-energia/tarifas>.

Suponiendo que se produce una espuma rígida con un veinte por ciento de reemplazo del polioliol comercial con CA, la cantidad de kilogramos necesarios de CA para producir un kilogramo de espuma, su precio y densidad del polímero final se pueden observar en la Tabla 19. Al comprar grandes cantidades de CA se puede llegar a obtener a 600 pesos por kilogramo. Los cálculos de la Tabla 19 se realizaron con base en el precio anteriormente mencionado, adicionando los costos para moler y secar la cascarilla de arroz (consumo energético y depreciación de equipos) y los precios del polioliol e isocianato de la Tabla 15.

Tabla 19. Densidad, cantidad de CA y precio por kg para una espuma con 20% de reemplazo.

% Reemplazo	Densidad (kg/m³)	CA (kg)	Costo MP (pesos/ kg espuma)	% Reducción costos
20%	54,14	0,13	41.940	12,63

A partir de la Ecuación 24, una espuma con un porcentaje de reemplazo del 20% teóricamente tendría una densidad aparente de 54,14 kg/m³ tal y como se observa en la tabla anterior. Además, podría afirmarse que tendría excelentes propiedades mecánicas que garantizarían su utilización en el campo de los materiales aislantes. Los costos en cuanto a materia primas, se reducirían hasta un 12,63% en comparación con los costos para preparar un kilogramo de espuma convencional, siendo una alternativa interesante que reduce los costos y mejora significativamente las propiedades fisicomecánicas de la espuma.

5.2 RELACIÓN BENEFICIO/COSTO

Esta relación financiera expresa el rendimiento de un proyecto o propuesta, es decir, indica el retorno de dinero obtenido por unidad monetaria invertida y puede ser expresada en términos de valor presente neto. En este caso y de acuerdo al tipo de proyecto que se desarrolla, puede ser expresado como las ganancias obtenidas, con la ventaja de tener una reducción de costos en las materias primas sobre el dinero invertido para la modificación en el proceso.

Cabe resaltar que no se tienen en cuenta los costos directos e indirectos, generados por el proceso de producción de espumas de poliuretano. Con un estudio más profundo, realizado directamente en una empresa determinada, se podría dar un porcentaje efectivo de la reducción en los costos totales de producción, y así determinar el valor presente real teniendo cuenta un tiempo de estudio definido y sus respectivas proyecciones de demanda. En la Ecuación 36 se muestra el cálculo de la relación beneficio-costos.

Ecuación 36. Cálculo beneficio/costo.

$$\frac{B}{C} = \frac{VP \text{ beneficios}}{VP \text{ costos}} = \frac{VP \text{ beneficios}}{Inversión}$$

Si la relación $B/C > 1$, entonces el proyecto es viable, ya que el valor presente de los beneficios es mayor al valor presente de los costos, en este caso la inversión. En la Tabla 17, se pueden observar los costos de los equipos necesarios para la implementación de las nuevas etapas del proceso de producción de espumas reforzadas. Se requiere de una inversión aproximada de 16,85 millones de pesos, para que una empresa que produzca espumas de poliuretano pueda realizar espumas reforzadas con CA.

Para que el proyecto sea rentable y se recupere la inversión, se deja expresada la relación en la Ecuación 37.

Ecuación 37. Relación B/C.

$$\frac{B}{C} = \frac{VP \text{ beneficios}}{16.850.000} > 1$$

$$VP \text{ beneficios} > 16.850.000$$

El valor presente de los beneficios está expresado en términos del flujo de caja durante un periodo de estudio. En el caso de una empresa establecida, el flujo de caja normal, es decir, los ingresos brutos aumentarían por la reducción en los costos directos (costos de materias primas) al incorporar CA en su formulación. Por lo tanto, para que a una empresa le resulte rentable el uso de CA, su valor presente de los beneficios debe ser mayor a los costos de inversión (16,85 millones de pesos).

6. CONCLUSIONES

- Las cascarillas de arroz poseen un contenido de 28,8% para la celulosa y del 30,4% para la lignina. Estos valores se compararon con los obtenidos por las cáscaras de mango de la variedad Keitt, que proporcionó valores de 3,76% para la lignina y 11,77% para la celulosa. Por lo tanto, la cascarilla de arroz que posee mayor contenido de celulosa y lignina, tiene mayor capacidad de reaccionar con los grupos funcionales isocianato del MDI.
- En la determinación del número de OH, de las tres fibras evaluadas se confirmó que dos obtuvieron resultados que corresponden a valores que están dentro del rango de los polioles utilizados en la síntesis de espumas rígidas de poliuretano; los microcristales de celulosa con un número de OH de 231,26 y las cascarillas de arroz con número de OH de 198,62.
- La temperatura es una variable fundamental que influye directamente en la estructura y estabilidad de la espuma obtenida. En las muestras preparadas durante las pruebas preliminares, se observó encogimiento en la estructura llegando hasta un 56% de pérdida de volumen en la muestra #18; por esta razón, se decidió utilizar un medio de enfriamiento durante la etapa de crecimiento, con el fin de controlar la temperatura que se genera con la reacción de polimerización y así permitir la formación de celdas más estables estructuralmente, hecho que se evidencia al observar una reducción en la pérdida de volumen de las espumas finales, con un valor máximo de 3,35% en la muestra de cascarilla de arroz al 5%.
- De las fibras evaluadas, la cáscara de mango es la mejor opción a utilizar para una espuma con uso hortícola, ya que obtuvo una capacidad de absorción de agua de 277,30% correspondiente a la muestra con un porcentaje de sustitución del 15%; mientras que las espumas con cascarilla de arroz y microcristales de celulosa sólo alcanzaron porcentajes de 195,03% y 215,06% respectivamente.
- La cascarilla de arroz es la fibra que tiene los mejores resultados en la muestra con un 15% de reemplazo. En cuanto a densidad aparente se obtuvo el valor máximo de 33 kg/m³, al compararlo con las muestras de cáscara de mango y microcristales de celulosa donde se obtuvieron valores de 27,82 kg/m³ y 31,3 kg/m³, respectivamente. Para la resistencia a la tensión, la cascarilla de arroz

registra un valor máximo de 152,92 kPa, con un aumento del 79% con respecto a la espuma de referencia.

- Aunque algunas de las propiedades de las espumas con MCC se ven mejoradas (densidad y absorción), hay un incremento del 40% en los costos de la materia prima a un porcentaje de reemplazo del 15%, razón por la cual desfavorece su uso y contrarresta los beneficios proporcionados por este tipo de fibra.
- Cuando se considera un 20% de reemplazo en la estructura, la implementación de cascarilla de arroz se ve favorecida por los bajos costos de materia prima, donde la reducción en costos alcanza un 12,47%.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas de conductividad térmica para estudios posteriores, ya que según la densidad calculada estos tipos de espumas funcionan como aislantes térmicos. Entonces, se debe verificar que ante la incorporación de fibras en la formulación, la conductividad térmica se mantenga o disminuya con respecto a las de referencia, para que no se vea afectada desfavorablemente.
- También es importante evaluar cuál es el límite máximo permitido en el que es posible incorporar las fibras propuestas sin que se vea afectada la estructura o las propiedades mecánicas, ya que existe un punto, según estudios, donde la concentración de fibras desestabiliza la estructura de la espuma.
- Se recomienda emplear un método de enfriamiento más efectivo, en el que se pueda asegurar un encogimiento menor en la espuma final y por lo tanto una menor pérdida de volumen de su estructura, cuando se deja reposar en el tiempo. Adicionalmente, medir el cambio de la temperatura de la mezcla reactiva durante la etapa de crecimiento de la espuma.
- Evaluar la posibilidad de hacer pruebas de biodegradabilidad con el fin de establecer el tiempo de degradación de este tipo de materiales, compararlo con los tiempos de espumas convencionales y así ayudar con la generación de polímeros menos contaminantes.
- Es importante evaluar otro tipo de fibras lignocelulósicas como la cáscara de cacao y otros residuos agroindustriales, con el propósito de brindarles un uso más eficiente a este tipo de desechos.

BIBLIOGRAFÍA

ABDEL HAKIM, A. MONA, N. EMAM, A. SULTAN, M. Preparation and characterization of rigid polyurethane foam prepared from sugar-cane bagasse polyol. *Materials Chemistry and Physics*, 129, pages 301-307.

ASHIDA K. *Polyurethane and Related foams - Chemistry and Technology*. Ed. Taylor & Francis Group. New York. 2007.

ASOHOFRUCOL. Modelo tecnológico para el cultivo de mango en el valle del alto magdalena en el departamento del Tolima. Ponencia. Bogotá. 2013, p. 23.

ASTM. Designation: D 5155 – 01. Standard Test Methods for Polyurethane Raw Materials Determination of the Isocyanate Content of Aromatic Isocyanates. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.

_____. Designation: D 570-81. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

_____. Designation: D 618. Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

BELTRÁN, MARCILLA. Tecnología de polímeros. Propiedades de flujo y tiempo de curado. 2015. Disponible en línea: <http://iq.ua.es/TPO/Tema6.pdf>

BUENROSTRO J., GARZA H., IBARRA V., AGUILAR C. Aprovechamiento de la cáscara de mango como soporte para la producción de polisacáridos. Depto. De Investigación en Alimentos. Facultad De Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila. México 2010.
<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%203/AQM3aprovechamiento.html>

COOPER S. L., GUAN J., *Advances in Polyurethane Biomaterials*. ELSEVIER. 2016.

CUERVO, L. FOLCH, J. QUIROZ, R. Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. 2009, [Citado el 15 de octubre 2017] Disponible en: http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Lignocelulosa.pdf

DEFONSEKA, C. *Practical Guide to Flexible Polyurethane Foams*. Smithers Rapra Technology Ltd. 2013.

DÍAZ, J. HERRERA, F. Producción de etanol combustible a partir de lignocelulosas. 2002, [Citado el 15 octubre 2017]. Disponible en:

http://www.unicauca.edu.co/ai/publicaciones/Fiet_40_Jaime.pdf

DuPont. Microcrystalline cellulose. [Citado el 1 noviembre 2017] Disponible en: <http://www.danisco.com/product-range/microcrystalline-cellulose/>

FEDEARROZ. Producción anual de arroz en Colombia. [Citado el 1 noviembre 2017] Disponible en: http://www.fedearroz.com.co/new/apr_public.php

GAIDUKOVA, G. IVDRE, A., FRIDRIHSONE, A. VEROVKINS, A. CABULIS, U. GAIDUKOV, S. Polyurethane rigid foams obtained from polyols containing bio-based and recycled components and functional additives. *Industrial Crops and Products* Vol 102, 2017, pages 133–143.

HAZCHELA. Cascarilla de arroz. México D.F. Disponible en línea: <http://www.hazchela.com/esp/item/166/42/cascarilla-de-arroz-briess-250g>

HEINZE, T., LIEBERT, T. Unconventional methods in cellulose functionalization. *Progress in polymer science*, vol 26, 2001, 1692.

HIRZEL VERLAG S. Manual de Química Orgánica. Editorial Reverte. Edición en español. 1987, p 488.

HUANG Guohong, WANG Peng. Effects of preparation conditions on properties of rigid polyurethane foam composites based on liquefied bagasse and jute fibre. *Elsevier, Polymer Testing* 60, 2017, p. 266-273.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. 5 ed. Bogotá: ICONTEC, 2002. 34 p. (NTC 1486).

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. Bogotá: ICONTEC, 1998, 23 p (NTC 4490)

_____. Referencias bibliográficas. Contenido de forma y estructura. Bogotá: ICONTEC, 2008, 33 p (NTC 5613)

IONESCU, Mihail. Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes. Smithers Rapra Technology. Vol 1. Primera y Segunda edición.

LOPRETTI M., GANDINI A. Nuevos materiales poliméricos derivados de Fuentes renovables. *Revista del laboratorio tecnológico del Uruguay*. N° 7, 2012.

MARÍN R. Carbohydrate-based Polyurethanes and Polyamides: Synthesis, Characterization and Stereocomplex Formation. Barcelona. Tesis Doctoral, 2009.

NSOR J., CHEN M., GOFF D., ZHONG F., RIZWAN H., LI Y., Functionality and nutritional aspects of microcrystalline cellulose in food. Carbohydrate Polymers. Elsevier. Volume 172, September 2017, Pages 159-174.

OCAMPO GONZALEZ, J. Criterios de formulación de espumas flexibles de poliuretano MDI basados en la evaluación cualitativa de propiedades finales realizadas a nivel laboratorio. Trabajo de Grado de Magíster en Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2012.

PADRÓN, G. ARÍAS, E. ROMERO, J. BENAVIDES M., A. ZAMORA, J. GARCÍA, S. Efecto de la cáscara de cacao en la obtención de espumas de poliuretano para uso hortícola. Propiedades físicas y de biodegradabilidad. Revista de la sociedad Química de México, 48 (2), 2004, paginas 156-164.

PORRAS, María Eugenia. Evaluación de la incorporación de celulosa de bagazo de caña en la síntesis de espumas de poliuretano. Trabajo de grado Ingeniería Química. Facultad de ingeniería química Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.

PORRAS, M.E. MUÑOZ, P.C. GIL, A.M. QUINTANA, G.C. Obtención de espumas de poliuretano con materiales lignocelulósicos. Revista Investigaciones Aplicadas. Universidad Pontificia Bolivariana, Vol. 6, No.2, 2012, Pag .93-102

QUINTERO, M. GOMEZ, J. BOYACA, A. Los polímeros del Poliuretano. Revista Palmas. Vol. 28, No.Especial, Tomo 2, 2007, Pag. 38-39

RIVERA ARMENTA, J.L., HEINZE, T., MENDOZA MARTINEZ A.M. New polyurethane foams modified with cellulose derivatives. European Polymer Journal Vol. 40, 2004, pág. 2803–2812

ROZMAN, H.D. YEO, Y.S. TAY, G.S. ABUBAKAR, A. The mechanical and physical properties of polyurethane composites based on rice husk and polyethylene glycol. Polymer Testing 22, 2003, pag 617–623

SCS Engineers, UAESP. (Junio del 2007). Informe de Evaluación. Relleno Sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia. Bogotá, Colombia.

SERNA L., TORRES C., Potencial agroindustrial de cáscaras de mango (*Mangifera indica*) variedades Keitt y Tommy Atkins. Acta Agronómica. Universidad nacional de Colombia, Volumen 64, Número 2, p. 110 - 115, 2015.

SIERRA Jaider. Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Monografía Universidad de Sucre. 2009. Disponible en: <http://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/211/2/333.794S571.pdf>

SINGH A., SEVDA S., ABU I., VANBROEKHOVEN K., RATHORE D., PANT D. "Biohydrogen Production from Lignocellulosic Biomass: Technology and Sustainability. Energies MDPI. Vol 8, 2015, p 13062-13080.

SUN RUN-CANG. Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels - Chemistry, Extractives, Lignins, Hemicelluloses and Cellulose. Elsevier 2010. Cap 5 y 6.

SZYCHER M. Szycher's handbook of polyurethanes. CRC Press. Second edition. 2013.

TRACHE D., HAZWAN M., TAN HUIN C., SABAR S., NURUL M.R., TAIWO F.A., HASSAN T.M., MOHAMAD M.K. Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and bio-composites application-A review. International Journal of Biological Macromolecules 93 (2016), pages 789-804.

TRUJILLO M. Desarrollo de un material compuesto de fibras naturales entrecruzadas con poliuretano. Trabajo de grado para Maestría, 3. Guadalajara. 2007.

VARGAS J., ALVARADO P., VEGA J., PORRAS M. Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. Instituto de investigaciones químicas y biológicas Universidad de San Carlos de Guatemala, revista científica vol 23 2013 pág 86-101.

ANEXOS

ANEXO A

RESULTADOS ANÁLISIS LIAC



INFORME DE RESULTADOS No 360

FECHA: octubre 23 de 2017

DATOS DEL CLIENTE:

Nombre del cliente: Martha Lucía Malagón Micán

Dirección del cliente: Diag. 77B 116B-42 Int. 5 Torre 3 apt. 502 de Bogota

Muestras entregadas por: Lina María Velásquez

Fecha de recepción de muestras: 29 de septiembre de 2017

MUESTRAS RECIBIDAS:

Se reciben dos muestras relacionadas por el cliente como cáscara de arroz y cáscara de mango para análisis de celulosa y lignina.

Identificación cliente	Condiciones de recepción	Identificación LIAC	Custodia No	Matriz
Cascara de Arroz	Temperatura Ambiente	4965	35	Otro Tipo
Cascara de Mango	Temperatura Ambiente	4966	35	Otro Tipo

MÉTODOS DE REFERENCIA:

Los análisis fueron realizados siguiendo estrictamente las especificaciones de los métodos de referencia.

NORMATIVIDAD DE REFERENCIA:

N.A.

RESULTADOS:

Este informe presenta fielmente los resultados obtenidos para las muestras analizadas bajo las condiciones especificadas y corresponden exclusivamente a las muestras recibidas.

NOTA1: Este informe de resultados no puede ser reproducido parcialmente, solo en forma total con previa autorización por escrita de la dirección del LIAC.



Bogotá Sede Chapinero-Carrera 5 N°59A -44, Teléfono 2174587- 3488000 Ext.1291-1292 email:liac@lasalle.edu.co
Informe No360



Page 1 of 3

FL-019 Formato Reporte de Resultados – Versión 5 – 09/07/2015

NOTA2: El laboratorio no realizo el muestreo por lo que no se hace responsable del mismo ni de la información relacionada en la cadena de custodia incluyendo la procedencia de las muestras.

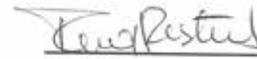
NOTA3:

Este informe de resultados consta de un total de 3 páginas de informe.

Este informe de resultados incluye 0 anexos.



Elsa Fonseca
T.P.Q 1353
Directora Laboratorio



Diana Chaveli Sánchez
T.P 315
Jefe de Área

INFORME DE RESULTADOS No. 360							
Código LIAC	Matriz	Método/Referencia	Unidades	Resultado	Rango Normatividad	Fecha Análisis	Observaciones
4965	Otro Tipo	Lignina - Van Soest P.J. - Cornell University/Gr	%	30.40	NA	12/10/2017	
4965	Otro Tipo	Celulosa - Oxidación con KMnO4/Gravimétrico	%	28.80	NA	13/10/2017	
4966	Otro Tipo	Celulosa - Oxidación con KMnO4/Gravimétrico	%	11.77	NA	13/10/2017	



Bogotá Sede Chapinero-Carrera 5 N°59A -44, Teléfono 2174587- 3488000 Ext.1291-1292 email:liac@lasalle.edu.co
Informe No360



A Waters Company
Laboratory of Excellence

INFORME DE RESULTADOS No. 360							
Código LIAC	Matriz	Método/Referencia	Unidades	Resultado	Rango Normatividad	Fecha Análisis	Observaciones
4966	Otro Tipo	Lignina - Van Soest P.J. - Cornell University/Gr	%	3.76	NA	12/10/2017	

Este Informe de resultados termina en esta linea



Bogotá Sede Chapinero-Carrera 5 N°59A -44, Telefono 2174587- 3488000 Ext.1291-1292 email:liac@lasalle.edu.co
Informe No360



ANEXO B

RESULTADOS ENSAYOS DE TENSIÓN.



CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS
REGIONAL DISTRITO CAPITAL

Versión: 003
Código: F-055
Página: 11 de 12

Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR
-------------------	-----------------

DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: TRACCIÓN						
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-29			
Material del ítem de ensayo	ESPUMA DE POLIURETANO	Fecha emisión del informe:	2017-11-29			
Descripción del ítem de ensayo:	ESPUMA DE POLIURETANO	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá			
RESULTADOS DE ENSAYO: TRACCIÓN						
ANALISTA :	ANDRES FERNANDO GIL PLAZAS					
EQUIPO UTILIZADO :	Máquina Universal SHIMADZU UH-50A					
METODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Ítem suministrado por el cliente					
ID LAB	ID CLIENTE	PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE Uexp (k)	MÉTODO DE ENSAYO
CME-17-045-1	M1 S0	CARGA MÁXIMA	N	32,0	NR	INTERNO
CME-17-045-2	M2 SCM5	CARGA MÁXIMA	N	39,0	NR	INTERNO
CME-17-045-3	M3 SCM10	CARGA MÁXIMA	N	76,0	NR	INTERNO
CME-17-045-4	M4 SCM15	CARGA MÁXIMA	N	63,0	NR	INTERNO
CME-17-045-5	M5 SCAS	CARGA MÁXIMA	N	53,0	NR	INTERNO
CME-17-045-6	M6SCA10	CARGA MÁXIMA	N	43,0	NR	INTERNO
CME-17-045-7	M7 SCA15	CARGA MÁXIMA	N	51,0	NR	INTERNO
CME-17-045-8	M8 SMCC5	CARGA MÁXIMA	N	65,0	NR	INTERNO
CME-17-045-9	M9 CMCC10	CARGA MÁXIMA	N	54,0	NR	INTERNO
CME-17-045-10	M10 SMCC15	CARGA MÁXIMA	N	49,0	NR	INTERNO
OBSERVACIONES						
NO SE CALCULA EL ESFUERZO MAXIMO A TENSIÓN PUESTO QUE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MUESTRA NO ES HOMOGÉNEA, NO OBSTANTE SE REPORTAN LOS VALORES EN DONDE LA SECCIÓN ERA MÁS HOMOGÉNEA. M1 S0=23.64X16.06 M2 SCM5=20.62X16.29 M3 SCM10=28.27X17.21 M4 SCM15=21.52X22.32 M5 SCAS=22.26X17.46 M6SCA10=19.63X20.09 M7 SCA15=22.82X17.20 M8 SMCC5=25.36X16.53 M9 CMCC10=24.69X15.42 M10 SMCC15=23.65X17.01						

ANEXOS
NINGUNO
OBSERVACIONES
1. No se aplica muestreo, el ítem de ensayo es suministrado por el cliente a los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS. 2. Información adicional se puede consultar en los registros de los laboratorios del SENA-REGIONAL DISTRITO CAPITAL-CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS.

ANEXO C

RESULTADOS ESPECTROSCOPIA FTIR.



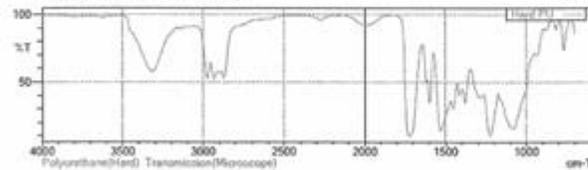
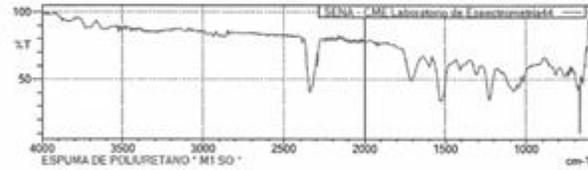
CENTRO DE MATERIALES Y ENSAYOS
REGIONAL DISTRITO CAPITAL

Versión: 003
Código: F-055
Página: 1 de 12

Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR		
DATOS DEL CLIENTE			
Cotización N°	CME-17-045-FTIR		
Nombre de la empresa / cliente	LINA MARIA VELASQUEZ BARACALDO	NIT	1016076665
Nombre del contacto	LINA MARIA VELASQUEZ BARACALDO		
Dirección	AV CARRERA 50 No. 33 - 40 Sur	Ciudad	BOGOTA
Teléfono	3125393513	E-mail	lina.velasquez@estudiantes.uamerica.edu.co
DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimerico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.
RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán		
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 300		
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento Interno		
ID LAB:	CME-17-045-1-FTIR		
ID CLIENTE:	M1 50		
ANALISTA:	CMB		
MATERIAL:	POLIMÉRICO		

SHIMADZU



C:\Users\kiana\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-1-FTIR.spr

Score	Library	Name	Comment
1 774	31 - Y.Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard)
2 143	32 - Y.Polymer2	PU	Polyurethane
3 876	31 - XIR.Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard)
4 883	36 - Y.Polymer2	Soft PU	Polyurethane(Soft)
5 848	32 - XIR.Polymer2	D_PU3	Polyurethane (Dow)mp@B3

OBSERVACIONES
Compuesto mayor coincidencia (Score: 774): Hard PU Polyurethane(Hard)

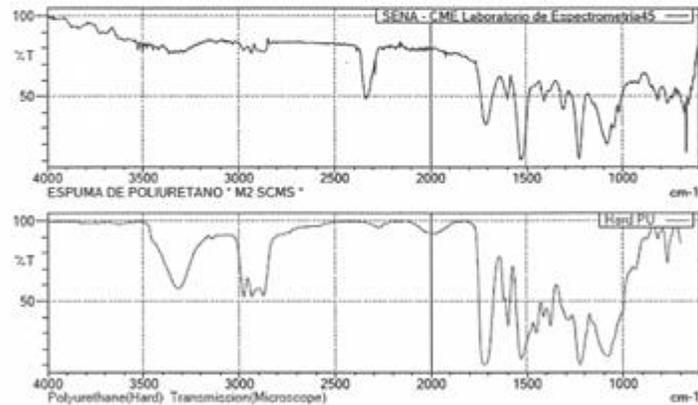


Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR
------------	-----------------

DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimérico	Fecha emisión del Informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el Informe:	Bogotá D.C.

RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO	
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno
ID LAB: CME-17-045-3-FTIR	
ID CLIENTE: M2 SCM 5	
ANALISTA: CMB	
MATERIAL: POLIMÉRICO	



C:\Users\kiana\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-3-FTIR.spd

	Score	Library	Name	Comment
1	845	31 - T-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmision(Microscope)
2	808	32 - T-Polymer2	PU	Polyurethane Transmision(Microscope)
3	778	31 - ATR-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard) HardSample 1
4	733	32 - ATR-Polymer2	D_PU3	Polyurethane_CursiSample 2
5	714	30 - T-Polymer2	Soft PU	Polyurethane(Soft) Transmision(Microscope)

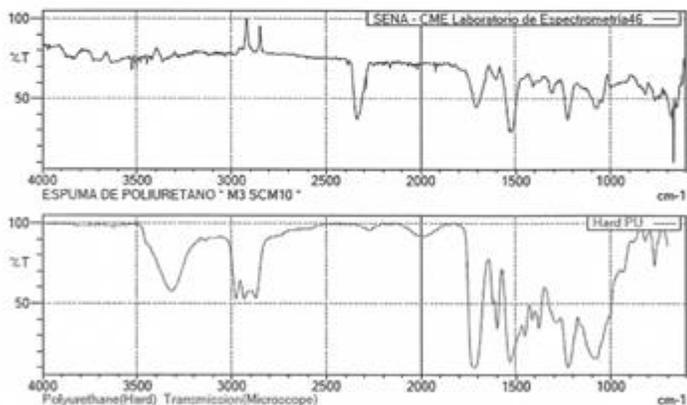
OBSERVACIONES
Compuesto mayor coincidencia (Score: 845): Hard PU Polyurethane(Hard)



Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR
------------	-----------------

DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimerico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.
RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán		
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100		
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno		
ID LAB:	CME-17-045-5-FTIR		
ID CLIENTE:	M3 SCM 10		
ANALISTA:	CMB		
MATERIAL:	POLIMERICO		



C:\Users\seana\Documents\SENSAYOS FTR\WOME-17-045\WOME-17-045-5-FTIR.lspd

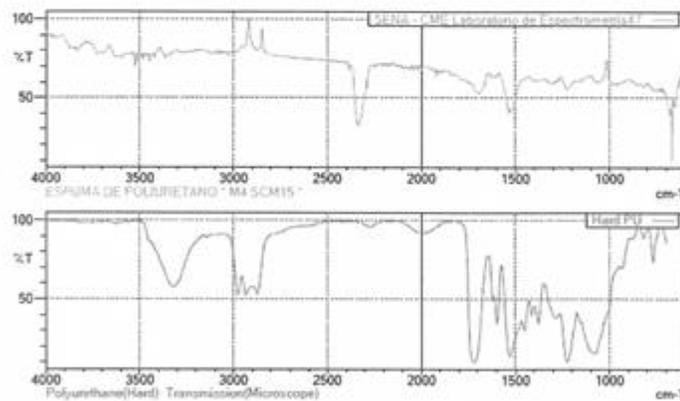
Score	Library	Name	Comment
1 730	31 - T-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmission(Microscope)
2 667	32 - T-Polymer2	PU	Polyurethane Transmission(Microscope)
3 665	31 - ATR-Polymer2	D_FU1	Polyurethane(Hard) DuraGama® II
4 642	32 - ATR-Polymer2	D_FU3	Polyurethane DuraGama® II
5 611	30 - T-Polymer2	Soft PU	Polyurethane(Soft) Transmission(Microscope)

Documento controlado, prohibida su reproducción parcial o total sin autorización.



Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR		
OBSERVACIONES			
Compuesto mayor coincidencia (Score: 730): Hard PU Polyurethane(Hard)			
DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo:	Polimérico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.
RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán		
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100		
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno		
ID LAB:	CME-17-045-7-FTIR		
ID CLIENTE:	M4 SCH 15		
ANALISTA:	CMB		
MATERIAL:	POLIMÉRICO		



C:\Users\saena\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-7-FTIR.lspd

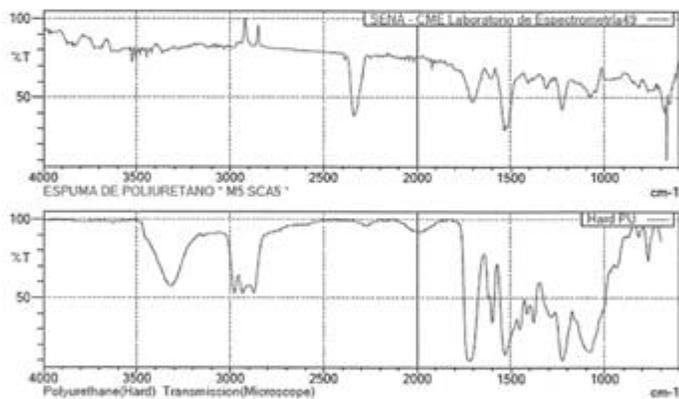
	Score	Library	Name	Comment
1	588	31 - Y-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmission(Microscope)
2	583	32 - Y-Polymer2	PU	Polyurethane Transmission(Microscope)
3	305	32 - ATR-Polymer2	D_PU3	Polyurethane DuraSample
4	547	31 - ATR-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(CPLEX) DuraSample
5	544	31 - ATR-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard) DuraSample

OBSERVACIONES			
Compuesto mayor coincidencia (Score: 596): Hard PU Polyurethane(Hard)			



Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR		
DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimérico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.
RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán		
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100		
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno		
ID LAB:	CME-17-045-9-FTIR		
ID CLIENTE:	M5 SCA 5		
ANALISTA:	CMB		
MATERIAL:	POLIMÉRICO		



C:\Users\kkena\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-9-FTIR.spd

	Score	Library	Name	Comment
1	714	31 - T-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmission(Microscope)
2	690	32 - T-Polymer2	PU	Polyurethane Transmission(Microscope)
3	642	31 - ATR-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard) DuraSample-8
4	637	32 - ATR-Polymer2	D_PU3	Polyurethane DuraSample-8
5	602	30 - T-Polymer2	Soft PU	Polyurethane(Soft) Transmission(Microscope)

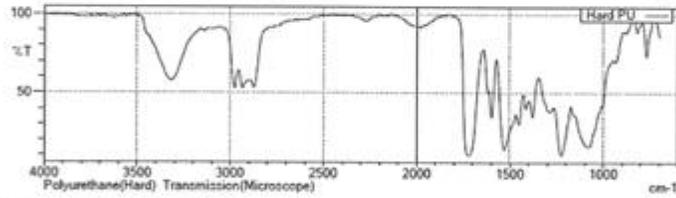
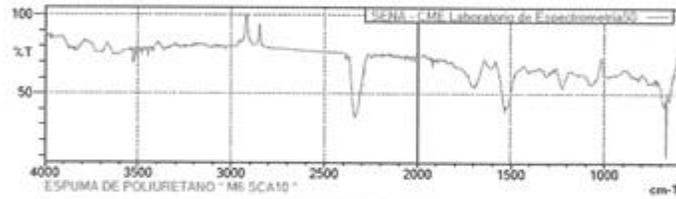
OBSERVACIONES

Compuesto mayor coincidencia (Score: 714): Hard PU Polyurethane(Hard)



Informe de Resultados

ID INFORME		CME-17-045-FTIR	
DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimerico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.
RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán		
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100		
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno		
ID LAB:	CME-17-045-11-FTIR		
ID CLIENTE:	M6 SCA 10		
ANALISTA:	CMB		
MATERIAL:	POLIMÉRICO		



C:\Users\reana\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-11-FTIR.jpg

	Score	Library	Name	Comment
1	548	31 - Y-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmission(Microscope)
2	628	32 - Y-Polymer2	PU	Polyurethane Transmission(Microscope)
3	589	31 - ATR-Polymer2	D_PU3	Polyurethane - Dury(Camp)IR 31
4	588	31 - ATR-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard) DataSmarts 1
5	561	30 - Y-Polymer2	SoR PU	Polyurethane(Soft) Transmission(Microscope)

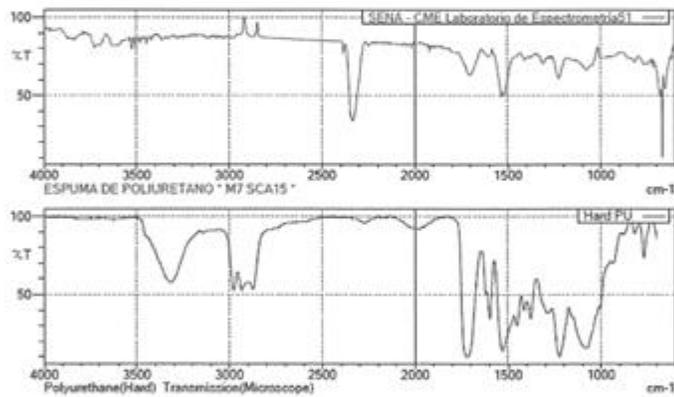
OBSERVACIONES

Compuesto mayor coincidencia (Score: 648): Hard PU Polyurethane(Hard)



Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR		
DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimerico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.
RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán		
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100		
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno		
ID LAB: CME-17-044-13-FTIR			
ID CLIENTE: M7 SCA 15			
ANALISTA: CMB			
MATERIAL: POLIMÉRICO			



C:\Users\rsena\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-13-FTIR.jpgd

	Score	Library	Name	Comments
1	666	31 - T-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmission(Microscope)
3	646	32 - T-Polymer2	PU	Polyurethane Transmission(Microscope)
3	598	31 - ATR-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard) DuraLam®(H)
4	592	32 - ATR-Polymer2	D_PU3	Polyurethane_DuraLam®(H)
5	578	30 - T-Polymer2	Soft PU	Polyurethane(Soft) Transmission(Microscope)

OBSERVACIONES
Compuesto mayor coincidencia (Score: 666): Hard PU Polyurethane(Hard)

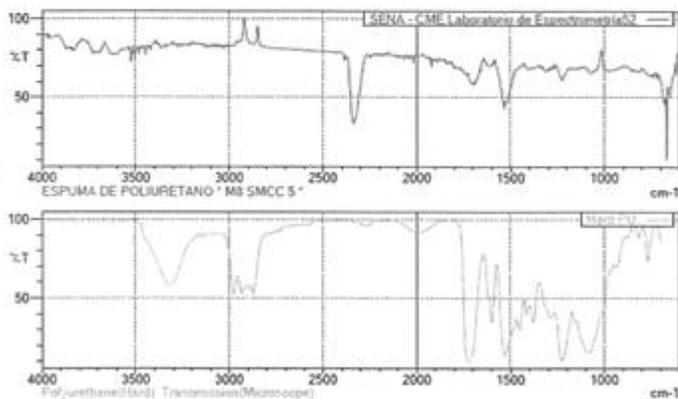


Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR
------------	-----------------

DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimérico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.

RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO	
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno
ID LAB:	CME-17-045-15-FTIR
ID CLIENTE:	M8 SMCC 5
ANALISTA:	CMB
MATERIAL:	POLIMÉRICO



C:\Users\keana\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-15-FTIR.iad

Score	Library	Name	Comment
1 621	31 - T-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmission(Microscope)
2 607	32 - T-Polymer2	PU	Polyurethane Transmission(Microscope)
3 564	32 - ATR-Polymer2	D_PU3	Polyurethane_DuraSample II
4 561	31 - ATR-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard) DuraSample II
5 547	51 - ATR-Polymer2	D_PI1	Polyimide(UPILEX) DuraSample II

OBSERVACIONES
Compuesto mayor coincidencia (Score: 621): Hard PU Polyurethane(Hard)

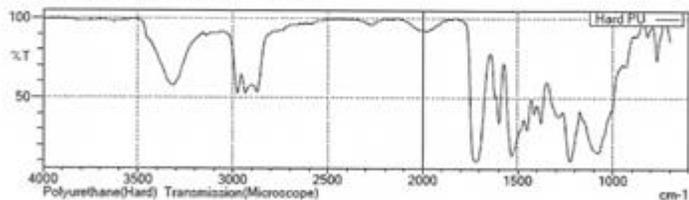
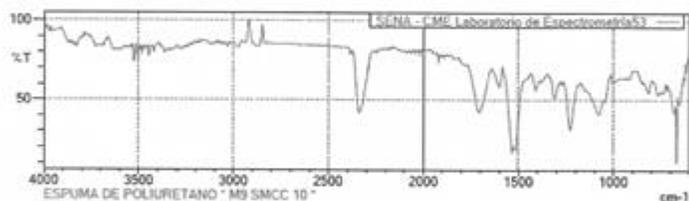


Informe de Resultados

ID INFORME	CME-17-045-FTIR
------------	-----------------

DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimérico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.

RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO	
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento interno
ID LAB: CME-17-045-17-FTIR	
ID CLIENTE: M9 SMCC 10	
ANALISTA: CMB	
MATERIAL: POLIMÉRICO	



C:\Users\kensa\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-17-FTIR.apd

Score	Library	Name	Comment
768	31 - T-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmission(Microscope)
740	32 - T-Polymer2	PU	Polyurethane Transmission(Microscope)
700	31 - ATR-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard) Ductalens(B) 3
588	32 - ATR-Polymer2	D_PU3	Polyurethane_Ductalens(B) 3
547	30 - T-Polymer2	Soft PU	Polyurethane(Soft) Transmission(Microscope)

OBSERVACIONES
Compuesto mayor coincidencia [Score: 768]: Hard PU Polyurethane(Hard)

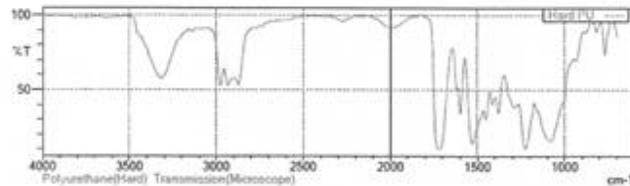
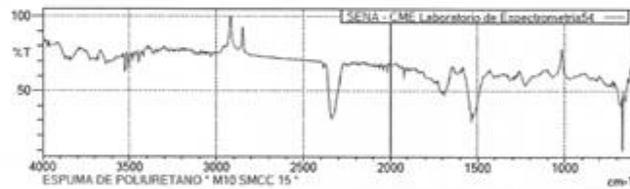


ID INFORME	CME-17-045-FTIR
------------	-----------------

DATOS DEL ÍTEM (S) DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO			
Fecha de recepción del ítem de ensayo:	2017-11-09	Fecha ejecución del ensayo:	2017-11-15
Material del ítem de ensayo	Polimerico	Fecha emisión del informe:	2017-11-16
Descripción del ítem de ensayo:	Espuma de poliuretano	Ciudad de emisión el informe:	Bogotá D.C.

RESULTADOS DE ENSAYO: ANÁLISIS QUÍMICO	
ANALISTA :	Carlos Montañez Beltrán
EQUIPO UTILIZADO :	Espectrómetro SHIMADZU IRT Racer - 100
MÉTODO DE PREPARACIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO:	Procedimiento Interno
ID LAB: CME-17-045-19-FTIR	
ID CLIENTE: M10 SMCC 15	
ANALISTA: CMB	
MATERIAL: POLIMERICICO	

SHIMADZU



C:\Users\rsano\Documents\ENSAYOS FTIR\CME-17-045\CME-17-045-19-FTIR.spd

Score	Library	Name	Comment
1 606	31 - Y-Polymer2	Hard PU	Polyurethane(Hard) Transmisión(Microscope)
2 584	32 - Y-Polymer2	PU	Polyurethane Transmisión(Microscope)
3 584	32 - AYB-Polymer2	D_PU3	Polyurethane_DuraLamell®.3
4 584	31 - AYB-Polymer2	D_PU1	Polyurethane(Hard) DuraLamell®.1
5 547	31 - AYB-Polymer2	D_PU2	Polyurethane(Hard) DuraLamell®.2

OBSERVACIONES

Compuesto mayor coincidencia (Score: 606): Hard PU Polyurethane(Hard)

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Nosotros **WILLIAM FERNEY GARCÍA CAMACHO** y **LINA MARÍA VELÁSQUEZ BARACALDO** en calidad de titulares de la obra **EVALUACIÓN DEL USO DE FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS PARA EL REFORZAMIENTO DE ESPUMAS DE POLIURETANO A NIVEL LABORATORIO**, elaborada en el año 2017, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

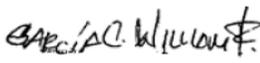
AUTORIZAMOS	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C., a los 5 días del mes de febrero del año 2018.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
WILLIAM FERNEY	GARCÍA CAMACHO
Documento de identificación No	Firma
1018.476.839	

Autor 2

Nombres	Apellidos
LINA MARÍA	VELÁSQUEZ BARACALDO
Documento de identificación No	Firma
1016.076.665	