

**OBTENCIÓN DE UN AISLANTE TÉRMICO CON PROPIEDADES IGNÍFUGAS,
A PARTIR DE PAPEL POST CONSUMO**

**SANDRA ARIZA MATEUS
CRISTIAN FERNANDO BAUTISTA PINZON**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

**OBTENCIÓN DE UN AISLANTE TÉRMICO CON PROPIEDADES IGNÍFUGAS,
A PARTIR DE PAPEL POST CONSUMO**

**SANDRA ARIZA MATEUS
CRISTIAN FERNANDO BAUTISTA PINZON**

**Trabajo de grado presentado como requisito para
Obtener el título como Ingenieros Químicos**

**Director de proyecto
JOSE CARLOS GUTIERREZ GALLEGO
Químico M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A nuestros padres, y a quienes fueron como nuestros padres estando nosotros lejos de casa, quienes con su esfuerzo y dedicación nos han brindado su apoyo incondicional durante la estadía en la Universidad Industrial de Santander, permitiéndonos obtener una formación superior como Ingenieros Químicos. A ellos que con su ejemplo y alta moral nos guiaron por este camino estando pendientes de cada paso, felicitándonos si era necesario y corrigiéndonos con su amor si en algún momento nos equivocamos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas sus bendiciones.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la oportunidad de ser parte de ella.

Al profesor José Carlos Gutiérrez, por su colaboración y apoyo en el desarrollo del proyecto de investigación.

A nuestros compañeros del laboratorio de Química Industrial, los cuales nos aportaron con su conocimiento y amistad.

A nuestros familiares y amigos, los cuales nos brindaron su apoyo incondicional en los momentos difíciles, permitiéndonos continuar y hoy en día llegar a ser mejores personas y grandes profesionales.

A una persona muy especial, quien siempre estuvo apoyándonos y acompañándonos en el proceso estudiantil, convirtiéndose en casi como un padre en cada momento de nuestros días.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. DESARROLLO EXPERIMENTAL	20
1.1. DISPOSICIÓN DE LAS LÁMINAS:	21
1.2. PRENSADO:	22
1.3. SECADO:	22
1.4. TRATAMIENTO TÉRMICO:	23
1.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS:	23
1.5.1. Características geométricas	23
1.5.2. Resistencia a agentes atmosféricos	24
1.5.3. Resistencia al ataque químico.	24
1.5.4. Determinación de densidad	24
1.6. TEST DE LLAMA	25
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS	26
2.1. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS PIROLIZADAS	31
2.1.1. Características geométricas	32
2.1.2. Determinación de densidad	33
2.1.3. Resistencia a agentes atmosféricos	34
2.1.4. Resistencia al ataque químico.	34
2.1.5. Test de Llama.	35
2.2. OTRAS CONSIDERACIONES OBSERVADAS:	37
2.3. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL AISLANTE TERMICO OBTENIDO	37
2.4. APORTE SOCIAL, AMBIENTAL, ECONÓMICO Y TECNOLÓGICO	38
2.4.1. Aporte social.	38

2.4.2. Aporte ambiental.....	39
2.4.3. Aporte económico.....	39
2.4.4. Aporte tecnológico.....	40
CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
BIBLIOGRAFIA.....	46
ANEXOS.....	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Funciones, características y ejemplos de aislantes térmicos.....	18
Tabla 2. Tiempo de pirólisis según el tipo de muestra.....	32
Tabla 3. Comparación entre las muestras antes y después del tratamiento térmico.	33
Tabla 4. Determinación de la densidad de las probetas.....	34
Tabla 5. Resultados test de llama.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura1. Diagrama de elaboración del material.....	21
Figura 2. Representación simplificada del proceso de pirólisis.....	27

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Muestras prensadas	49
Foto 2. Poros presentes en el material.	50
Foto 3. Fotos densidad del material.....	40
Foto 4. Fotos de la capa pegajosa de la muestra tipo II	40
Foto 5. Resistencia al ataque químico.	41
Foto 6. Comportamiento del material frente a la llama directa.....	41
Foto 7. Adherencia del material a varias superficies.....	42
Foto 8. Comportamiento del ácido bórico con silicato de sodio	42

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	Prensado del material inicial.....	49
Anexo B.	Porosidad del material.....	50
Anexo C.	Determinación de la densidad.....	51
Anexo D.	Ataque del ambiente al material.....	52
Anexo E.	Ataque Químico.....	53
Anexo F.	Test de Llama.....	54
Anexo G.	Dilatación y capacidad de adherencia del material.	55
Anexo H.	Necesidad del papel post consumo.....	56

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN DE UN AISLANTE TÉRMICO CON PROPIEDADES IGNÍFUGAS, A PARTIR DE PAPEL POST CONSUMO^{*}.

AUTORES: Sandra Ariza Mateus. Cristian Fernando Bautista Pinzón^{**}.

PALABRAS CLAVE: Reciclar, Aislante Térmico, Propiedades Ignífugas, Papel Post- consumo, Silicato de Sodio, Ácido Bórico.

CONTENIDO:

En la actualidad, el reciclaje se perfila como la mejor opción para un mejor aprovechamiento de la energía y la protección y conservación del medio ambiente; con su adecuada implementación, se espera que la industria del papel deje de ser una de las más contaminantes del mundo y se convierta en un modelo ecológico y una alternativa viable para evitar la contaminación.

El presente proyecto se llevó a cabo con el objetivo de obtener un aislante térmico a partir de Papel Post-consumo, Ácido Bórico y Silicato de Sodio. Inicialmente se hicieron muestras o probetas utilizando solución saturada de ácido bórico. En adición, se repitió el proceso utilizando ácido bórico en polvo, sometiendo las muestras a procesos de prensado, secado y pirolisis, tras los cuales fueron caracterizadas, determinando sus propiedades físicas y químicas. Entre los diferentes ensayos realizados se cuentan los de permeabilidad, resistencia al ataque químico, resistencia a agentes atmosféricos, determinación de la densidad, test de llama y otros de carácter cualitativo, por medio de las cuales se evidenciaron ciertas características propias de los materiales aislantes térmicos como: porosidad, buena resistencia mecánica y geometría uniforme.

Al finalizar la etapa de experimentación y caracterización, el paso por seguir fue el análisis de datos. El material presentó porosidad uniforme, baja densidad y características ignífugas, las últimas demostradas en el test de llama. Se pudo corroborar la efectividad de los reactivos utilizados para mantener el material estable frente a altas temperaturas, así como se hizo indispensable utilizar láminas de papel post consumo como matriz. A pesar de los buenos resultados se hace necesario ampliar y profundizar en el tema para optimizar el proceso de obtención y caracterización.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director. José Carlos Gutiérrez Gallego.

ABSTRACT

TITLE: PRODUCTION OF A HEAT INSULATING WITH FLAME RETARDANT, FROM POST CONSUMER PAPER^{*}.

AUTHORS: Sandra Ariza Mateus. Cristian Fernando Pinzón Bautista^{**}.

KEY WORDS: Recycle, Thermal insulation, fireproofing, Post-consumer paper, sodium silicate, boric acid.

CONTENT

Nowadays, recycling is becoming the best choice for a better use of energy and the protection and conservation of the environment; with proper implementation, it is expected that the paper industry will be no longer one of the world's most polluting and will become an ecological model and a viable alternative to prevent contamination.

This project was conducted with the objective of obtaining thermal insulation from post-consumer paper, boric acid and sodium silicate. Initially, samples or specimens were made using saturated boric acid solution. In addition, the process was repeated using boric acid powder, subjecting the samples to processes of pressing, drying and pyrolysis, after which the samples were characterized, determining their physical and chemical properties. Some of the conducted tests were permeability test, resistance to chemical attack, resistance to atmospheric agents, density determination, flame test and other qualitative tests, by means of which some characteristics of thermal insulation materials such as porosity, good mechanical strength and uniform geometry were showed.

After the stage of experimentation and characterization, the data was analyzed. The material presented uniform porosity, low density and fire proof characteristics, the latter demonstrated in the test flame. It was possible to confirm the effectiveness of the reagents used to keep the material stable at high temperatures. The utilization of post-consumer paper sheets as the matrix was essential. Despite the good results it is necessary to broaden and deepen in this field to optimize the process of production and characterization.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director. José Carlos Gutiérrez Gallego.

INTRODUCCIÓN

El reciclaje es un proceso mediante el cual material que ya ha sido utilizado es recolectado, procesado y transformado nuevamente en productos y bienes de consumo. Este proceso permite prolongar el ciclo de vida útil de los llamados “desechos”, al reincorporarlos en las cadenas productivas, al tiempo que ofrece una mejor alternativa para su disposición. Es por ello que, en la actualidad, el reciclaje se perfila como la mejor opción para un mejor aprovechamiento de la energía, la protección y conservación del medio ambiente.

Los procesos productivos de la industria papelera son, en gran medida, responsables de la degradación del medio ambiente. Por ello, la adecuada implementación de procesos de reciclaje puede ser una respuesta al impacto ambiental generado por la producción de papel, desde la tala de árboles hasta su disposición final, pasando por la industria papelera. El papel se puede reutilizar en un 100%, para elaborar nuevamente pulpa, papel, cartón, entre otros, evitando así el consumo desenfrenado de madera. Se ha demostrado que la producción de papel a partir de material reciclado, contribuye con la disminución del consumo de agua, disminuye el volumen de los desechos y la emisión de contaminantes [1].

En años recientes, como resultado de campañas intensas de educación ambiental, así como la colocación de contenedores de recogida selectiva, las tasas de reciclaje y recuperación de papel han incrementado significativamente [2]. Una innovación importante en la cadena productiva es el uso creciente de materia prima 100% reciclada, en un proceso que solo requiere el 10% del agua y el 55% de la energía que se utilizan para la obtención de papel a partir de pulpa virgen. Esto ha generado un sub-mercado del reciclaje que mueve más de \$80.000 millones al año y la creación de varias empresas que se han dedicado a este proceso. En promedio, Colombia consume 1,1 millones de toneladas de papel al año, de las cuales el 63% se abastece con la producción nacional [3].

Sin embargo, aun cuando el papel reciclado ha sido reincorporado al ciclo útil de la industria papelera, las tasas de recuperación de papel en procesos de reciclaje son bajas, según reporta la Asociación nacional de empresarios de Colombia (ANDI), con valores no superiores al 45% [4], y nuevas formas de aprovechamiento del papel desechado deben ser estudiadas. El uso de papel post consumo como fuente de material de alto contenido en celulosa para la producción de aislantes térmicos o acústicos, podría ser una de ellas.

El aislamiento con celulosa, es una tecnología de amplio uso en el sector de la construcción que, proporciona una considerable resistencia al flujo de calor, control del ruido en tratamientos acústicos y excelentes propiedades retardantes de llama e ignífugas, siendo sus mayores ventajas, las facilidades con las que cuenta su producción y su bajo costo, pues está conformado principalmente por papel reciclado [5]; más del 85% del contenido de los materiales aislantes a base de celulosa es fibra procesada de papel post consumo que ha sido tratada químicamente para conferirle resistencia a la llama [6, 7]. Este tipo de materiales cumplen con todos los requisitos que definen a un buen aislante térmico, según se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Funciones, características y ejemplos de aislantes térmicos.

FUNCIONES	CARACTERÍSTICAS	EJEMPLOS
<ul style="list-style-type: none"> • Economizar energía. • Reducir la pérdida en los envolventes. • Mejorar el confort térmico. • Mejorar la eficiencia térmica en los envolventes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosos (celdas con aire o algún gas seco encapsulado en su interior, en estado inerte o quieto). • Posee baja capacidad de conductividad. • Alta reflectividad. • Impermeable al vapor de agua. • Materiales blancos y brillantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corcho aglomerado. • Espuma de poliuretano. • Poliéster expandido. • Lana de vidrio. • Vermiculita. • Arcilla expandida. • Piedra pómez. • Fibras de celulosa obtenida a partir de material reciclado.

Fuente: Los autores del proyecto.

Si bien, la celulosa proporciona el material base para la producción de aislantes térmicos, es necesario recalcar que las propiedades ignífugas y/o retardantes de llama son debidas, en gran medida, a los agentes químicos con los que es tratada. Aproximadamente el 90% de los compuestos retardantes a la llama empleados actualmente, pertenece a uno de los siguientes grupos: trihidrato de alúmina, compuestos organoclorados y organobromados, compuestos organofosforados, óxidos de antimonio y compuestos de boro. Sin embargo, algunos compuestos de silicio, de azufre, óxidos y carbonatos de metales diferentes del antimonio y ácidos de Lewis como el cloruro férrico han mostrado efectividad [8].

Basados en las anteriores premisas, el propósito del presente trabajo de investigación fue la elaboración de un aislante térmico a partir de papel post consumo, papel periódico para este caso particular, centrando especial atención en el uso de ácido bórico (H_3BO_3) y silicato de sodio (Na_2SiO_3), como agentes químicos retardantes de llama, dada su probada efectividad [8-11]. Se espera que el material a producir sea una alternativa para el aprovechamiento del papel post consumo, ayudando a minimizar el impacto generado por los desechos de la industria papelera y, dando pie a un nuevo método para el reciclaje de papel.

De igual manera, se pretende utilizar el material obtenido como aislante térmico con propiedades ignífugas para reducir la transferencia de calor desde y hacia el ambiente, con la consecuente disminución del consumo de energía y protección del medio ambiente. En este sentido, la presente investigación puede llegar a representar un gran aporte al desarrollo de tecnologías propias, no sólo en su componente tecnológico sino también en el económico.

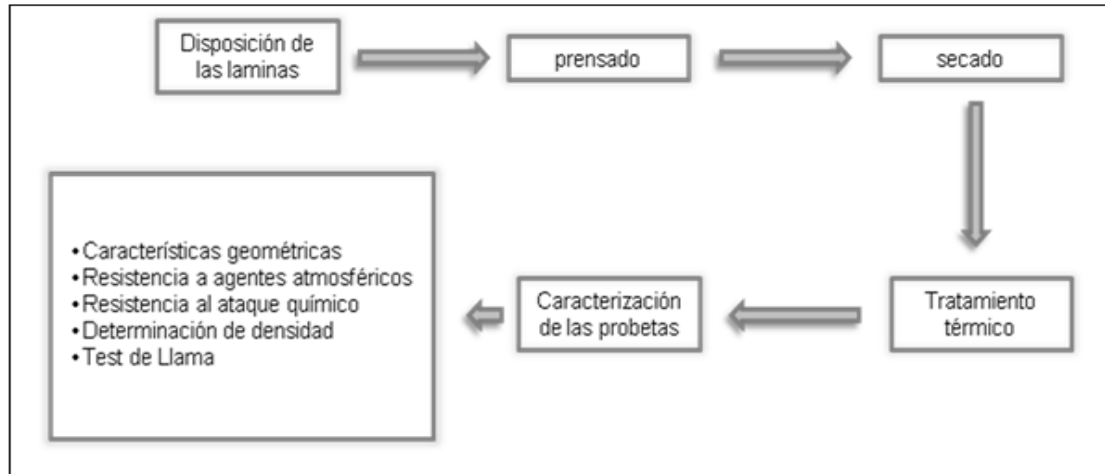
1. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del aglomerado se utilizaron los siguientes materiales: papel post consumo, ácido bórico (H_3BO_3) y silicato de sodio (Na_2SiO_3). Las probetas serán de tipo I, identificadas con números, y tipo II, identificadas con letras, de las cuales las tipo I son hechas con ácido bórico en solución saturada y las tipo II con ácido bórico en polvo.

- **Papel post consumo:** Su función en el proceso es constituir la matriz del material a elaborar.
- **Silicato de sodio:** Este compuesto es un agente térmico que le da al material resistencia cuando es expuesto a altas temperaturas y actúa como agente aglomerante.
- **Ácido bórico:** Su función es actuar como fundente y agente retardante de llama, lo que le proporcionará al material consistencia en el tratamiento térmico y buenas características ignífugas y aislantes.

El desarrollo del proyecto demandó la elaboración de 50 probetas, 35 de las tipo I y 15 de las tipo II, sometidas a los procedimientos explicados en la presente sección y resumidos en la figura 1.

Figura1. Diagrama de elaboración del material.



Fuente: Los autores del proyecto

ELABORACIÓN DEL MATERIAL

El material objeto de estudio del presente trabajo fue elaborado de acuerdo con las etapas mostradas en la figura 1. La descripción de los procedimientos realizados en cada etapa se muestra a continuación:

1.1. DISPOSICIÓN DE LAS LÁMINAS:

Para la elaboración del material se utilizaron 28 láminas de papel post consumo de 8.5*7.5 cm. Inicialmente se armaron las probetas tipo I, disponiendo de forma alternada láminas de papel impregnadas con los agentes retardantes escogidos, primero con una solución de ácido bórico saturada y la siguiente con silicato de sodio, hasta alcanzar un espesor determinado.

Para las probetas tipo II el procedimiento fue similar, sin embargo, en lugar de usar el ácido bórico en solución, este se agregó directamente sobre láminas de

papel impregnadas con silicato de sodio, con la respectiva remoción del material sobrante.

1.2. PRENSADO:

Las probetas obtenidas en la etapa previa fueron sometidas a un proceso de prensado, para el cual se dispuso de una prensa hidráulica marca CARVER, aplicando una fuerza de 2 toneladas. El objetivo de esta etapa fue la remoción del exceso de líquido en la muestras, así como permitió una mayor compactación del material. La eliminación del exceso de líquidos, representó una reducción de los tiempos de secado y ello, un ahorro de energía significativo. La presión aplicada debió ser monitoreada con rigurosidad, pues incrementos de la misma mostraron ser causal de agrietamiento y ruptura de las muestras, como se observó en las probetas 9, 19, 21 y 22, en las cuales la presión aplicada fue de 2.5 a 3 toneladas métricas.

1.3. SECADO:

Posteriormente las probetas fueron dispuestas en un horno a una temperatura de 30 grados centígrados hasta que la humedad fue eliminada casi en su totalidad, aproximadamente 14 horas. Luego de sacarlas del horno, las probetas fueron depositadas en un desecador y se dejaron en reposo. Durante esta etapa se llevó un control diario del peso de las probetas, por 2 o 3 días hasta su estabilización. Es necesario tener cuidado con la temperatura y velocidad de secado, ya que una velocidad de secado elevada o una alta temperatura de secado, pueden causar la separación de las capas de la probeta, deformando el material.

1.4. TRATAMIENTO TÉRMICO:

El tratamiento térmico, pirolisis, estuvo sujeto a la forma en cómo se elaboró el material y a la temperatura óptima para que las características del material fueran las deseadas. De acuerdo con la anterior, se llevaron a cabo ensayos a diferentes temperaturas, para determinar la más apropiada para cada tipo de probeta (I o II). Para las muestras con ácido bórico en solución saturada (tipo I) la temperatura fue de 650 grados centígrados y para las muestras con ácido bórico en polvo (tipo II) la temperatura final fue de 750 grados centígrados.

Otra variable de importancia para el proceso fue el tiempo de duración, hallando que los tiempos óptimos fueron $2\frac{1}{2}$ y 3 horas para las muestras de tipo I y II respectivamente. La tasa de incremento de la temperatura fue controlada, pues se observó que para cierto valor de temperatura las capas desaparecían, las laminillas de papel y los demás componentes comenzaban a fundirse, formándose una superficie de naturaleza vítrea, característica en este tipo de materiales.

1.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS:

1.5.1. Características geométricas.

La medición de las dimensiones de las probetas fue realizada en el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS. Se procedió a tomar las medidas de longitud y espesor con ayuda de un calibrador o pie de rey. Para ello se escogió una muestra del tipo II que se encontraba en óptimas condiciones y dos muestras tipo I. las dimensiones promedio de las probetas fueron: 6,5 cm \pm 0,5 cm de longitud, 6 cm \pm 0,5 cm de ancho, y 0,8 cm \pm 0,2 cm de espesor.

1.5.2. Resistencia a agentes atmosféricos.

Prueba realizada en el Laboratorio de Química Industrial de la UIS con las muestras pirolizadas. Las muestras fueron expuestas al medio ambiente, para observar la higroscopicidad, propiedad que influye en gran medida en el peso. La temperatura a la que se realizó el ensayo, fue una variable importante de esta etapa. Para el caso la prueba se llevó a cabo a temperatura ambiente, durante el día, a $28^{\circ}\text{C} \pm 2$ y en la noche a $22^{\circ}\text{C} \pm 2$. Otra variable tomada en cuenta fue el grado de humedad del medio ambiente, en este caso la ciudad de Bucaramanga presenta una humedad aproximada de $80\% \pm 10$. Se hizo seguimiento de las probetas durante un lapso de 8 semanas, haciendo un sondeo por semana.

1.5.3. Resistencia al ataque químico.

Prueba realizada en el Laboratorio de Química Industrial de la UIS. Los agentes químicos escogidos para la prueba fueron soluciones diluidas de ácido sulfúrico al 10%p/p y al 20%p/p. Se tomaron 50ml de cada solución. Las muestras pirolizadas fueron sumergidas en cada una de las soluciones mencionadas, el ensayo se realizó a temperatura ambiente, en el día a $28^{\circ}\text{C} \pm 2$ y en la noche a $22^{\circ}\text{C} \pm 2$, y a presión atmosférica. Se hizo seguimiento durante 15 días para observar los cambios en cada una de las muestras, haciendo sondeos diarios.

1.5.4. Determinación de densidad.

Prueba realizada en el Laboratorio de Química Industrial de la UIS. Se determinó la densidad de la muestra. Para determinar la densidad de la muestra pirolizada, se usó como objeto de experimentación la muestra B. El principio básico para la determinación de esta propiedad fue conocer la masa de la muestra y el volumen que esta desplazaba cuando se sumergía en 20 ml de Varsol. Este solvente fue

escogido luego de observar que la muestra pirolizada no absorbía el Varsol debido a las propiedades vítreas ya mencionadas.

1.6. TEST DE LLAMA

Prueba realizada en el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS, con la muestra B tipo II. La muestra se expuso a la llama de un mechero que utiliza gas natural como combustible. Se observó la velocidad de combustión, la formación de la llama y el tiempo de auto extinción. Para este procedimiento se contó con un soporte universal en el cual se dispuso una termocupla para llevar un control de la temperatura, también se utilizó un cronómetro para medir el tiempo. La muestra fue expuesta a la llama directa durante una hora, tiempo de acción estimado para los bomberos frente a un incendio. La temperatura de la llama a la que se expuso la muestra fue de 211 grados centígrados.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Antes de discutir en detalle los resultados obtenidos, es conveniente evaluar el conjunto de reacciones que ocurren a lo largo del proceso de producción del material aislante diseñado, de manera que sus propiedades puedan ser explicadas en base a la composición del mismo.

La química implicada en el proceso comienza desde sus etapas tempranas, presentándose en las primeras instancias la disociación del ácido bórico, un ácido de Lewis, en agua (probetas tipo I), según se muestra a continuación:



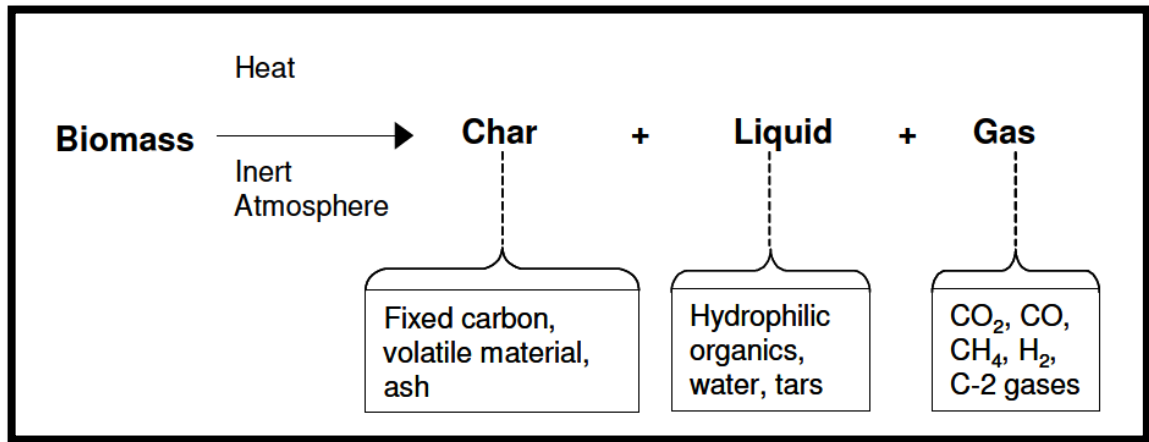
Sin embargo, dicha reacción no resulta trascendente para el proceso por su misma naturaleza reversible, por la cual, en etapas posteriores, y tras la evaporación del agua, el ácido bórico pasa a su fase sólida nuevamente. Por otra parte, el agua en la solución saturada de H_3BO_3 puede interactuar con el silicato de sodio (Na_2SiO_3), llevándolo a una forma más hidratada.

Posteriormente, con la implementación de los procesos de prensado y secado, se elimina el exceso de agua del sistema, aunque el prensado implica la pérdida de cierta fracción de H_3BO_3 y Na_2SiO_3 . A partir de este punto comienza la etapa más importante del proceso: el tratamiento térmico. Con el incremento de la temperatura se presentan una serie de reacciones químicas y cambios de fase que definen la estructura última del aislante, según se propone a continuación, para ciertos rangos aproximados de temperatura.

Papel Post-Consumo

La pirólisis de material celulósico, conlleva una serie de transformaciones químicas de carácter complejo, similares, en el presente caso de estudio, a las experimentadas por la madera [12-14]. Sin embargo, los diversos autores referenciados coinciden en un modelo básico y generalizado de la pirólisis del material celulósico, según se muestra en la figura 2.

Figura 2. Representación simplificada del proceso de pirólisis.



Fuente: Brownsort, P. A. [14]

El papel post-consumo constituye la matriz del aislante diseñado, y está compuesto principalmente por celulosa y hemicelulosa, presentando algunas trazas de lignina. Los mencionados componentes sufren una serie de transformaciones químicas con el aumento de la temperatura en el tratamiento de pirólisis y los productos de dicha reacción son una combinación de los productos esperados de la pirólisis individual de cada componente.

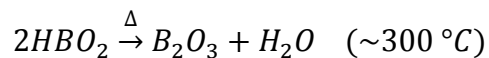
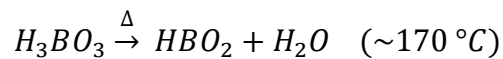
En el intervalo de temperaturas de 250 °C a 300 °C se da la fase más importante de la pirólisis de los materiales lignocelulósicos, presentándose la descomposición térmica de la hemicelulosa y de gran parte de la celulosa, lo que implica la ruptura de enlaces glicosídicos, con la consecuente despolimerización parcial del material

celulósico. A temperaturas superiores a los 300 °C, la despolimerización del material celulósico continúa y se favorece la formación de diferentes cantidades de gas (CO₂, CO, CH₄, vapor de agua, H₂, etc.), líquido (tar) y carbón (char).

La carbonización del material celulósico es el propósito de la pirólisis, pues el carbón, por su estructura porosa, resulta ser la matriz apropiada del aislante diseñado. Durante la pirólisis, y con el incremento de la temperatura, los átomos de carbono se reorganizan en estructuras microcristalinas tipo grafito, que se polimerizan originando un sistema planar de moléculas tipo benceno condensadas, que resultan en un sólido debido a los enlaces C-C entre planos vecinos. En el rango de temperaturas desde 400 °C hasta 700 °C, los sistemas antes mencionados crecen (probetas tipo I y II). Entre 700 °C y 800 °C, hay eliminación de átomos de hidrógeno y los grupos hidrocarbonados son eliminados, dando paso a la formación de pequeños cristales con una estructura similar al grafito y con un mayor ordenamiento estructural (en las probetas tipo II).

Ácido Bórico

Durante la pirólisis, el ácido bórico (H₃BO₃), por acción de la temperatura, experimenta una serie de reacciones que conllevan a la formación de óxido de boro (B₂O₃), según sugieren estudios realizados por *Ohlemiller* [15]:



El óxido de boro es un aditivo de uso común en la producción de vidrios, aumenta su durabilidad, reduce su coeficiente de expansión térmica e incrementa su temperatura de transición vítrea [16-19].

Silicato de Sodio

La solución de silicato de sodio, conocida en el argot popular como vidrio líquido, es una mezcla de óxidos de silicio y sodio hidratados ($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-xH}_2\text{O}$). Una vez impregnada en las láminas de papel, se distribuye completamente sobre la superficie del carbón. Por acción del calor, el agua de la solución se evapora, dejando atrás una capa de $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$, de naturaleza vítrea, a modo de recubrimiento sobre el material. Algunos autores han estudiado el uso de Na_2SiO_3 , para la producción de conglomerados tridimensionales de SiO_2 (componente principal del vidrio), por su alto contenido en este último [10].

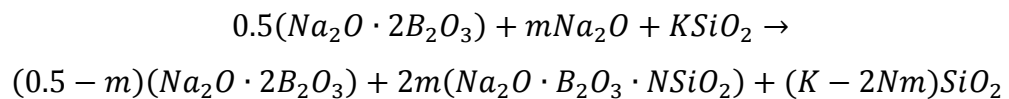
Sin embargo, independientemente de las transformaciones que sufren los agentes retardantes de llama, resulta de mayor importancia para el proceso el estudio de las posibles interacciones $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{SiO}_3$, así como el efecto que puedan tener por independiente dichos componentes sobre el sistema. Consideremos en primera instancia la no interacción $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{SiO}_3$.

El B_2O_3 es un óxido formador de vidrios de borato, funde a una temperatura de $480\text{ }^\circ\text{C}$ y puede actuar a modo de recubrimiento del material base, previniendo la ignición del mismo al aislarlo del medio. Es reconocido por su dureza y gran resistencia térmica. Una capa de B_2O_3 , dispersa de manera uniforme, sobre la superficie del carbón refuerza la resistencia de la estructura, al tiempo que provee gran resistencia a los choques térmicos al material, características deseadas en un aislante y que podrían explicar algunos de los resultados observados.

En cuanto al Na_2SiO_3 , cabe la posibilidad de que de paso a la formación de conglomerados tridimensionales de sílice, lo cual explicaría la apariencia vítrea del material producido, entre otras características, como su resistencia térmica, propia de materiales cerámicos.

Si bien los comportamientos mencionados tienen sus claras ventajas, por la naturaleza misma del proceso también implicarían una serie de desventajas y/o complicaciones. Es necesario tener en cuenta que, los procedimientos utilizados para la producción del aislante no permiten asegurar una distribución uniforme de las fases vítreas de los óxidos de boro y silicio, disminuyendo su efectividad como recubrimientos, así como no resuelven los problemas de solubilidad del Na_2SiO_3 , lo que representa un grave inconveniente para el aislante en medios acuosos o muy húmedos.

La otra perspectiva, la interacción $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{SiO}_3$, resulta mucho más interesante y puede implicar más beneficios. El sistema $\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ha sido ampliamente estudiado [16-19], y los vidrios borosilicatos alcalinos son de uso generalizado, siendo uno de sus mayores representantes el vidrio Pyrex. Los vidrios borosilicatos alcalinos pueden ser producidos a temperaturas de aproximadamente 500 grados centígrados, al mezclar ácido bórico y silicatos sódicos diversos [19], condiciones dadas en este proceso. La producción de borosilicatos alcalinos es un proceso complejo, sujeto a las proporciones utilizadas de los diferentes precursores (B_2O_3 , Na_2O y SiO_2). Una expresión generalizada de la reacción implicada es la siguiente:



Donde K es la relación $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ y N es el promedio de grupos SiO_2 en la estructura [20]. El compuesto de interés en nuestro estudio es el $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{NSiO}_2$, propio de los vidrios borosilicatos alcalinos, siendo sus principales derivados la reedmergnerita, NaBSi_3O_8 , y los conglomerados tipo danburita, NaBSiO_4 .

Los borosilicatos alcalinos deben su resistencia a la adición de B_2O_3 . En los boratos el B_2O_3 se organiza en estructuras triangulares en las que el boro tiene número de coordinación de 3; sin embargo, en el sistema $Na_2O-B_2O_3-SiO_2$, la presencia de iones Na^+ , hace que el Boro cambie su número de coordinación a 4, formando estructuras tetraédricas que proporcionan mayor ordenamiento de rango medio al material y que aumentan el entrecruzamiento de las grupos SiO_4 del vidrio, al eliminar la presencia de oxígenos no puente. Lo anterior se traduce en el incremento de la dureza del material, en el aumento de su temperatura de transición vítrea y en la disminución de su coeficiente de expansión térmica [20].

2.1. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS PIROLIZADAS

El tratamiento térmico fue implementado en las muestras tipo I y tipo II con mejor contextura y de mayor compactación. Un factor que se tuvo en cuenta fue que durante el proceso de horneado, las probetas no perdieran su disposición inicial y sus láminas conservaran la forma geométrica dada en el prensado (ver Anexo A, foto 1).

Durante el tratamiento térmico se observaron puntos importantes como la transición de la temperatura de 190 hasta 293 grados centígrados, intervalo en el cual se observó formación de humo en la mufla, evidencia de los gases producidos por la reacción mostrada con anterioridad en la figura 2. La degradación del material orgánico en las probetas fue evidente pero, al cabo de 9 minutos aproximadamente, cuando la temperatura se acercó a los 293 grados centígrados, el humo disminuyó considerablemente hasta extinguirse. Es de mencionar que, el incremento súbito de la temperatura causó la deformación de las muestras.

Dado lo expuesto con anterioridad, fue necesario implementar cambios en el tiempo de pirólisis, pues el tratamiento requería de tasas de incremento de la temperatura bajas, para evitar la deformación del material debido a la exposición brusca a altas temperaturas. El tiempo estipulado para alcanzar una temperatura de 293 °C durante el tratamiento térmico, de manera que pudiera evitarse la deformación de las muestras, se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Tiempo de pirólisis según el tipo de muestra.

TIPO MUESTRA	TEMPERATURA. [°C], ±2	TIEMPO. [minutos]
I	293	45
II	293	70

Fuente: Los autores del proyecto

2.1.1. Características geométricas.

Al revisar las probetas después del proceso térmico, fue evidente la considerable disminución de su volumen. Ello se explica por la pérdida de volátiles y la degradación de otros componentes sugerida en el mecanismo de reacción ya mencionado y brevemente explicado en la figura 2. La formación de gases resta masa a la muestra, así como el agua evaporada, lo cual se refleja directamente en la disminución del volumen de las probetas. Esto se corroboró con la información consignada en la tabla 3, donde se hace una comparación entre las muestras antes y después del tratamiento térmico. La reacción de pirólisis implica cambios drásticos en la forma y estructura de las muestras, las láminas de papel son reemplazadas por una estructura de carbón rica en poros (ver Anexo B, foto 2), característica importante para un buen aislante térmico. La presencia de estos poros es debida, probablemente, a la difusión de los gases liberados durante la pirólisis a través del material, durante la formación del carbón.

Tabla 3.Comparación entre las muestras después del tratamiento térmico.

PESO ANTES DE LA PIROLISIS [g]	PESO DESPUÉS DE LA PIROLISIS [g]
38,0	10,9
42,2	11,2
37,1	10,7

Fuente: Los autores del proyecto.

2.1.2. Determinación de densidad

Las muestras, luego del tratamiento térmico, adquirieron una apariencia vítrea, la cual se atribuye, principalmente, a la formación de borosilicatos alcalinos, que actúan como recubrimiento y sellante del material base (carbón). Dado que el proceso se lleva a altas temperaturas (hasta 750 °C), los precursores B_2O_3 (fundido) y Na_2SiO_3 (inicialmente en fase líquida), se dispersan uniformemente sobre la estructura de carbón y la recubren casi en su totalidad.

Dada la naturaleza del silicato de sodio, cabe la posibilidad, de no formarse el vidrio borosilicato, y de que el recubrimiento obtenido pueda solubilizar en agua tras periodos largos de exposición, es por ello que en la determinación de la densidad del material se utilizó varsol, buscando evitar el posible deterioro del material o la absorción de agua, lo cual podría influir negativamente en la exactitud de la medición realizada.

En esta etapa se midió la densidad aparente, tomando como parámetros el volumen y la masa de la probeta. La densidad real se estimó utilizando el principio de Arquímedes, con el volumen desplazado y la masa de la probeta (ver Anexo C, foto 3.). Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Determinación de la densidad de las probetas.

PARAMETROS		DENSIDAD APARENTE	DENSIDAD REAL
MASA [g]	VOLUMEN [cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
11.1	55.81	0.200	0.193
1.54	3	0.513	0.520

Fuente: Los autores del proyecto.

Con la determinación de este parámetro se puede ver que el material es apto para recubrimientos aislantes en los cuales se necesite un volumen elevado y bajo peso, ya que su masa se reduce alrededor del 70%.

2.1.3. Resistencia a agentes atmosféricos.

La fase vítrea presente en el material evitó que este fuera atacado por agentes presentes en la atmósfera. El material no retiene humedad del medio y por lo tanto no se presentan formaciones de origen biológico en él, lo cual concuerda con las cualidades atribuidas a los compuestos derivados del boro [9]. Sin embargo, lo anterior se cumple siempre que el tratamiento térmico sea el adecuado, y la temperatura sea la óptima. Como ejemplo de ello, se tiene la muestra B del tipo II, para la cual se tomó una temperatura experimental por debajo de la óptima, que condujo a la formación de una capa pegajosa y oscura en la superficie (ver Anexo D, foto 4), susceptible de ser disuelta y altamente higroscópica. El silicato de sodio y el ácido bórico que no fundieron fueron disueltos, razón por la cual la probeta mostró un notable deterioro y debilidad ante los agentes atmosféricos presentes.

2.1.4. Resistencia al ataque químico.

Según el seguimiento hecho a las muestras dejadas en contacto con solución de ácido sulfúrico al 10 y 20% P/P, se pudo comprobar que el material elaborado presenta una elevada resistencia a medios corrosivos ácidos. La muestra no presentó deterioro ni formación de partículas visibles, conservándose incolora,

como evidencia de que no hubo disolución del material base (Ver Anexo E, foto 5). Nuevamente, las propiedades observadas, son características de los materiales cerámicos.

2.1.5. Test de Llama.

El material, expuesto a la acción directa de la llama por un tiempo de 34 minutos y una temperatura constante de 211 grados centígrados, no presentó formación de llama, ni se consumió durante el tiempo estipulado para la prueba. Dicho lo anterior, cabe resaltar que el material posee buenas características ignífugas. Es de mencionar que, durante el procedimiento se formó una gota, debida probablemente a líquidos residuales al interior del material, sobre la superficie expuesta a la llama, pero esta permaneció adherida. Por lo tanto no hubo goteo ni desprendimiento de material en la muestra. El color de la llama fue el característico de productos a base de silicio. Los datos de la prueba se resumen en la tabla 5.

El resultado del test de llama también revela que durante la pirólisis de las probetas, también ocurre la oxidación del carbono, lo cual explica porque no se observa combustión del aislante tras su exposición directa al mechero.

Tabla 5. Resultados test de llama.

TIPO DE MATERIAL	TIEMPO DE PRUEBA	INTERVALO DE TEMPERATURA	OBSERVACIONES
MUESTRA C TIPO II	34 minutos	138 – 150 °C	Al retirar la muestra de la llama se comprobó la ausencia de esta.

Fuente: Los autores del proyecto.

Nótese que se reporta un intervalo de temperatura, esto debido a que la prueba se realizó manualmente, razón por la cual se presentaron cambios en la temperatura,

según se presentaron cambios en la posición de la muestra respecto a la llama y la termocupla. Como se observa en la foto 6 (ver anexo F), la superficie superior de la muestra no presentó ninguna transformación y la temperatura en la misma fue menor a la correspondiente al mechero. La observación del proceso nos permite decir que el calor se transmite por convección, a través del aire contenido en los poros del material y por conducción entre las paredes externas del poro. Puesto que las características aislantes arrojadas por el test de llama son notables, puede decirse que se obtuvo un material apropiado para su uso como aislamiento térmico.

Se ha discutido con anterioridad sobre la posible formación de conglomerados de óxido de silicio y la formación de óxido de boro. Estos componentes son de vital importancia para las propiedades mostradas por el aislante producido, y con su presencia se abren algunas posibilidades que podrían explicar dichas propiedades:

1. En primera instancia, debe considerarse la posibilidad de que el Na_2SiO_3 , en su fase sólida al deshidratarse y el B_2O_3 , tras fundir a los $480\text{ }^\circ\text{C}$ y luego solidificarse estén formando una mezcla de materiales de naturaleza vítrea (característica común a ambos), a la cual se deba, por su naturaleza cerámica, la resistencia a la llama y la baja conductividad. La capa formada sobre el material base, protegería al mismo del proceso de combustión al aislarlo del ambiente, medio rico en oxígeno, que podría dar inicio a la ignición.
2. La presencia de SiO_2 y B_2O_3 , sugiere que en el proceso puede ocurrir la formación de vidrio de borosilicato, un material con alta resistencia a los tratamientos térmicos (ampliamente utilizado en los instrumentos de laboratorio), con un bajo coeficiente de expansión térmica, baja conductividad y de resistencia media [21]. De ser así, las propiedades aislantes del material podrían explicarse por la presencia de dicho compuesto.

Ambos planteamientos son plausibles, aunque el segundo es probablemente el más acertado. El tratamiento térmico realizado alcanza una temperatura máxima de 750 °C, temperatura suficiente para la formación de borosilicatos alcalinos.

2.2. OTRAS CONSIDERACIONES OBSERVADAS:

Una observación importante en cuanto a los resultados de la experimentación, es que las etapas y pruebas realizadas durante la elaboración del material revelaron propiedades del mismo, que no estaban contempladas en el planteamiento inicial y no eran esperadas o se ignoraban completamente. Una característica que se pudo observar durante la experimentación, fue que la dilatación del material por la acción del calor fue menor, comparada de manera apreciativa, con la dilatación que sufrió el latón de aluminio, el cual sirvió como soporte durante el tratamiento térmico. Lo anterior se evidenció al retirar la muestra de la mufla y dejarla enfriar; el material se fracturó en dos zonas; una inferior que se adhirió al material y una superior que se pudo retirar y poseía un espesor mayor (Ver anexo G, foto 7).

Al utilizar papel post consumo para la elaboración de las muestras se asegura la formación de los poros característicos de los aislantes térmicos y a su vez se le da una excelente estructura física, propiedades que no se evidenciaron al utilizar los dos reactivos sin el papel (Ver anexo H, foto 8).

2.3. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL AISLANTE TERMICO OBTENIDO

Los costos implicados en la elaboración del material son mínimos, pues la materia prima principal es el papel post consumo, cuyo valor en el comercio está alrededor de 8.000 pesos la arroba. El ácido bórico y el silicato de sodio son reactivos de fácil acceso y su costo es relativamente bajo, además su consumo en el proceso

es mínimo. Es claro entonces que, el material elaborado conlleva bajos costos en cuanto a materias primas y, puesto que las etapas de elaboración y los equipos no son precisamente complejos, sus costos energéticos no son elevados.

La alternativa de uso para el papel post consumo, propuesta en el presente trabajo, puede tener un impacto positivo, no solo para el ambiente y la sociedad, sino también para la industria. El papel residual podría dejar de ser un agente contaminante, que en lugar de ocupar espacio en rellenos sanitarios podría prestar un servicio con un alto valor agregado.

La industria utiliza grandes cantidades de aislantes térmicos, que no son amigables con el medio ambiente o que de serlo, tienen un costo elevado en el mercado. La alternativa que proponemos busca concientizar a la industria de la necesidad que se tiene de un material con buenas características aislantes, económico y amigable con el ambiente, como el elaborado en el presente proyecto.

2.4. APORTE SOCIAL, AMBIENTAL, ECONÓMICO Y TECNOLÓGICO

2.4.1. Aporte social.

La elaboración de este material a nivel industrial puede tener un alto impacto social, teniendo en cuenta las oportunidades de empleo que podría generar directa e indirectamente. Una planta diseñada para la elaboración de este material, necesitaría de trabajadores internos, así como podría congregarse a las comunidades recicladoras, sacándolas de la informalidad.

La implementación de este tipo de tecnologías podría ser un excelente medio para promover una cultura de pensamiento verde, en la que el reciclaje se vea no

como una cuestión netamente ambiental si no, como una alternativa para dar valor agregado a los desechos, con la consecuente remuneración fruto de su implementación.

2.4.2. Aporte ambiental.

Es bien conocido que, los aislantes térmicos utilizados son, en su mayoría, altamente contaminantes y tienen un impacto negativo en el medio ambiente. Con el material elaborado, se pretende proponer una alternativa para la sustitución de materiales como la espuma de polietileno y el poliestireno, entre otros, evitando la contaminación debida a su producción y a posibles procesos de combustión en los que pudieran verse envueltos, ya que producen gases tóxicos.

El aprovechamiento del papel post consumo reduce el volumen de residuos depositados en los rellenos sanitarios, lo que amplía la vida útil de estos. El sector industrial utiliza en Colombia alrededor de 1,1 millones de toneladas anuales de materia prima, de los cuales 500 mil son procedentes de papel reciclado, lo que quiere decir que para la elaboración del nuevo material se podría aprovechar las 600 mil adicionales que no se está reciclando. El material elaborado no representa un impacto ambiental negativo, pues en su elaboración, el agua utilizada y la posible contaminación generada son bajas.

2.4.3. Aporte económico.

La elaboración de este tipo de aislantes no requiere una gran inyección de capital, como se ha mencionado en reiteradas ocasiones, la materia prima principal para su elaboración es el papel post consumo y su bajo costo es una propiedad que merece ser recalcada.

La elaboración de aislantes a base de papel post consumo, puede conducir a la disminución de la producción de otros tipos de materiales aislantes, que demandan altas cantidades de agua y de energía, tienen elevados costos de producción y demandan un mayor poder adquisitivo por parte del usuario. Lo anterior, unido al costo de las materias primas, le da la ventaja para ser producido con alta efectividad como aislante y generando un buen beneficio económico.

2.4.4. Aporte tecnológico.

Grandes aportes se pueden tener al desarrollar un material multifuncional aislante térmico con propiedades ignífugas, ya que puede ser útil para recubrimientos de tuberías, para sistemas de refrigeración, en el transporte de sustancias que necesiten estar refrigeradas, como recubrimiento en construcciones civiles y cualquier pieza que requiera ser aislada o conservada ante la acción de las llamas.

El desarrollo del material trae a la sociedad beneficios de tipo económico e impulsa la investigación de nuevas tecnologías, propias del material, buscando la optimización y la máxima funcionalidad del mismo. Lo anterior conlleva un beneficio económico ya que genera empleos con mano de obra especializada y no especializada.

CONCLUSIONES

Es posible elaborar un material con propiedades aislantes e ignífugas, utilizando papel post consumo como materia prima, con la adición de ácido bórico y silicato de sodio como agentes retardantes de llama. El material elaborado presenta un buen conjunto de propiedades propias de los aislantes térmicos como lo son, una baja densidad, porosidad, buen comportamiento ante la humedad y el ataque de agentes atmosféricos, baja conductividad, propiedades de tipo ignífugo, y, lo más importante, un bajo costo de producción.

El papel post consumo mostró ser un material apropiado para la elaboración de un aislante térmico. Al someterlo al proceso de pirólisis, su comportamiento fue acorde con el modelo de reacción sugerido por los diversos autores referenciados en el presente trabajo, ofreciendo como soporte del aislante elaborado una estructura porosa, con distribución uniforme de poros, apropiada para ser usada como aislante térmico. El uso de la matriz de papel se hace indispensable, sin ella, el material obtenido no tendría la geometría, ni la porosidad apropiada, como lo reveló la investigación realizada.

La adición de ácido bórico y silicato de sodio como agentes retardantes de llama y aglomerantes resultó ser acertada. Las condiciones del proceso, así como la resistencia a los choques térmicos y el bajo coeficiente de expansión térmica exhibidos por el material, son probatorios de la formación de borosilicatos alcalinos. Dichos borosilicatos confieren notables propiedades de barrera al material, que no solo protegen la integridad del mismo, sino que le confieren la resistencia térmica requerida por un buen aislante térmico.

Puesto que la elaboración del aislante térmico, según los objetivos planteados en principio, es totalmente posible y brinda, como se probó con la experimentación,

un aislante térmico de excelentes propiedades y muy bajo costo de producción, el material y la tecnología propuestas son una excelente alternativa para la problemática de las basuras en el país, específicamente en lo que corresponde a la disposición del papel, ofreciendo una alternativa verde para su utilización, que además puede dejar muy buenos réditos.

El desarrollo experimental reveló que, la velocidad de secado y la temperatura son determinantes en las características geométricas y en la formación de los poros en el material, un secado acelerado deforma el material y la uniformidad en la porosidad es menor.

Las muestras tipo II demostraron un mejor comportamiento y resistencia durante el proceso de elaboración, esto también se evidenció al ser sometidas a las diferentes pruebas de caracterización. Su estructura física fue más sólida, menos frágil y con una disposición mayor de poros.

Finalmente, si bien el desarrollo experimental permitió la elaboración de un material con buenas propiedades aislantes a partir de papel post consumo, la presente investigación es solo la base para una serie de estudios que deben ahondar en la temática, buscando la optimización del material y los procesos productivos, así como su implementación y elaboración a escala industrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] COLCIENCIAS, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA (UPME). Ahorro de energía en la industria del papel. Documento PDF. <<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/papel.pdf>>

[2] ELIAS, Xavier. Reciclaje de residuos industriales. 2da ed. Díaz de Santos, 2007.

[3] MARTINEZ, Jorge. El reciclaje, La forma más fácil de mantener nuestro planeta vivo. 2007. [en línea]. < <http://www.gestiopolis.com>> [Citado el 7 de Febrero de 2012]

[4] ASOCIACIÓN NACIONAL DE EMPRESARIOS DE COLOMBIA (ANDI). Reciclaje de papel y cartón en Colombia. Agosto de 2012. Documento PDF. <<http://asociacionrecicladoresbogota.org/wp-content/uploads/2012/08/120822-Reciclaje-de-Papel-en-Colombia-v2-Modo-de-compatibilidad1.pdf>>

[5] CELLULOSE INSULATION MANUFACTURERS ASSOCIATION (CIMA). Sitio web: <<http://www.cellulose.org/CIMA/>>

[6] CELLULOSE INSULATION MANUFACTURERS ASSOCIATION (CIMA). Cellulose insulation: codes, regulations, and specifications. CIMA technical bulletin # 1. Documento PDF. <<http://www.cellulose.org/userdocs/TechnicalSpecifications/CIMA-TechnicalBulletin01.pdf>>

[7] ADVANCED HOME ENERGY. Dense-pack cellulose insulation. Documento en línea: <<http://www.advancedhomeenergy.com/sites/default/files/Dense%20Pack%20Cellulose%20Wall%20Insulation-updated.pdf>>

[8] MORENO, C. Síntesis de polímeros organoborados retardantes a la llama. Universitat Rovira i Virgili. Memoria para optar al título Doctor en Química. Tarragona, Octubre de 2005.

[9] ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY. Effect of boric acid on fire retardant properties of compressed mineral added cellulosic insulators. Istanbul, Turkey.

[10] JONKER, A. Insulating refractory materials from inorganic waste resources. Tshwane University of Technology. Memoria para optar al título Doctor en Química. Diciembre de 2006.

[11] VALCHEV, I.; LASHEVA, V.; TZOLOV, Tz.; JOSIFOV, N. Silica products from Rice hulls. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 44, 3, 2009.

[12] SINHA, S.; JHALANI, A.; RAVI, M. R.; RAY, A. Modeling of Pyrolysis in Wood: A Review. Documento PDF. Disponible en línea: <<http://web.iitd.ac.in/~ravimr/Publications/IndianJournals/sesi-sanjiv.pdf>>

[13] PRAKASH N.; KARUNANITHI, T. Kinetic Modeling in Biomass Pyrolysis - A Review. Journal of Applied Sciences Research, 4(12): 1627-1636, 2008.

[14] BROWNSORT, P. A. Biomass Pyrolysis Process: Review of scope, Control and Variability. Documento PDF. Disponible en: <www.biochar.org.uk/download.php?id=14>

[15] OHLEMILLER, T. J. Smoldering Combustion Hazards of Thermal Insulation Materials. Documento PDF. Disponible en línea: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire81/PDF/f81010.pdf>>

[16] MANARA, D.; GRANDJEAN, A.; NEUVILLE, D. R. Advances in understanding the structure of borosilicate glasses: A Raman spectroscopy study. *American Mineralogist*, 94: 777-784, 2009.

[17] GRAVES, B. Influence of composition on structure and Caesium volatilization from Glasses for HLW confinement. The University of Warwick. Memoria para optar al título Doctor en filosofía de Física. Noviembre de 2007.

[18] NANBA, T.; NISHIMURA, M.; MIURA, Y. A theoretical interpretation of the chemical shift of Si-29 NMR peaks in alkali borosilicate glasses. *Geology Fields*. Okayama University, 2004.

[19] TOROPOV, N. A. *et al.* Army Foreign Science and Technology Center. Phase Diagrams of Silicate Systems: Handdbook, Ternary systems. 3th ed. Charlottesville, Virginia, 1974.

[20] MANARA, D.; GRANDJEAN, A.; NEUVILLE, D. R. Structure of borosilicate glasses and melts: A revisionof the Yun, Bray and dell model. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355: 2528-2531, 2009.

[21] <<http://www.qorpak.com/WhatisBorosilicateGlass.aspx>>. Consultado en: Agosto 20 de 2012.

BIBLIOGRAFIA

ADVANCED HOME ENERGY. Dense-pack cellulose insulation. Documento en línea: <<http://www.advancedhomeenergy.com/sites/default/files/Dense%20Pack%20Cellulose%20Wall%20Insulation-updated.pdf>>

ASOCIACIÓN NACIONAL DE EMPRESARIOS DE COLOMBIA (ANDI). Reciclaje de papel y cartón en Colombia. Agosto de 2012. Documento PDF. <<http://asociacionrecicladoresbogota.org/wp-content/uploads/2012/08/120822-Reciclaje-de-Papel-en-Colombia-v2-Modo-de-compatibilidad1.pdf>>

BROWNSORT, P. A. Biomass Pyrolysis Process: Review of scope, Control and Variability. Documento PDF. Disponible en: <www.biochar.org.uk/download.php?id=14>

CELLULOSE INSULATION MANUFACTURERS ASSOCIATION (CIMA). Cellulose insulation: codes, regulations, and specifications. CIMA technical bulletin # 1. Documento PDF. <<http://www.cellulose.org/userdocs/TechnicalSpecifications/CIMA-TechnicalBulletin01.pdf>>

CELLULOSE INSULATION MANUFACTURERS ASSOCIATION (CIMA). Sitio web: <<http://www.cellulose.org/CIMA/>>

COLCIENCIAS, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA (UPME). Ahorro de energía en la industria del papel. Documento PDF. <<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/papel.pdf>>

ELIAS, Xavier. Reciclaje de residuos industriales. 2da ed. Díaz de Santos, 2007.

GRAVES, B. Influence of composition on structure and Caesium volatilization from Glasses for HLW confinement. The University of Warwick. Memoria para optar al título Doctor en filosofía de Física. Noviembre de 2007.

<<http://www.qorpak.com/WhatisBorosilicateGlass.aspx>>. Consultado en: Agosto 20 de 2012.

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY. Effect of boric acid on fire retardant properties of compressed mineral added cellulosic insulators. Istanbul, Turkey.

JONKER, A. Insulating refractory materials from inorganic waste resources. Tshwane University of Technology. Memoria para optar al título Doctor en Química. Diciembre de 2006.

MANARA, D.; GRANDJEAN, A.; NEUVILLE, D. R. Advances in understanding the structure of borosilicate glasses: A Raman spectroscopy study. American Mineralogist, 94: 777-784, 2009.

MANARA, D.; GRANDJEAN, A.; NEUVILLE, D. R. Structure of borosilicate glasses and melts: A revision of the Yun, Bray and dell model. Journal of Non-Crystalline Solids, 355: 2528-2531, 2009.

MARTINEZ, Jorge. El reciclaje, La forma más fácil de mantener nuestro planeta vivo. 2007. [en línea]. < <http://www.gestiopolis.com> > [Citado el 7 de Febrero de 2012]

MORENO, C. Síntesis de polímeros organoborados retardantes a la llama. Universitat Rovira i Virgili. Memoria para optar al título Doctor en Química. Tarragona, Octubre de 2005.

NANBA, T.; NISHIMURA, M.; MIURA, Y. A theoretical interpretation of the chemical shift of Si-29 NMR peaks in alkali borosilicate glasses. Geology Fields. Okayama University, 2004.

OHLEMILLER, T. J. Smoldering Combustion Hazards of Thermal Insulation Materials. Documento PDF. Disponible en línea: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire81/PDF/f81010.pdf>>

PRAKASH N.; KARUNANITHI, T. Kinetic Modeling in Biomass Pyrolysis - A Review. Journal of Applied Sciences Research, 4(12): 1627-1636, 2008.

SINHA, S.; JHALANI, A.; RAVI, M. R.; RAY, A. Modeling of Pyrolysis in Wood: A Review. Documento PDF. Disponible en línea: <<http://web.iitd.ac.in/~ravimr/Publications/IndianJournals/sesi-sanjiv.pdf>>

TOROPOV, N. A. *et al.* Army Foreign Science and Technology Center. Phase Diagrams of Silicate Systems: Handdbook, Ternary systems. 3th ed. Charlottesville, Virginia, 1974.

VALCHEV, I.; LASHEVA, V.; TZOLOV, Tz.; JOSIFOV, N. Silica products from Rice hulls. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 44, 3, 2009.

ANEXOS

PRENSADO DEL MATERIAL INICIAL

Anexo A. Prensado del material inicial.

Foto 1. Muestras prensadas



Fuente: Los autores del proyecto
CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Anexo B. Porosidad del material.

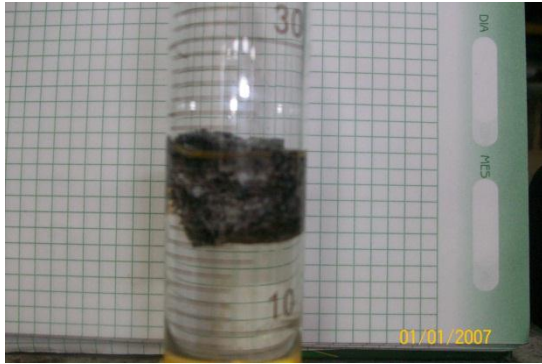
Foto 2. Poros presentes en el material.



Fuente: Los autores del proyecto

Anexo C. Determinación de la densidad.

Foto 3. Fotos densidad del material



Fuente: Los autores del proyecto

Anexo D. Ataque del ambiente al material.

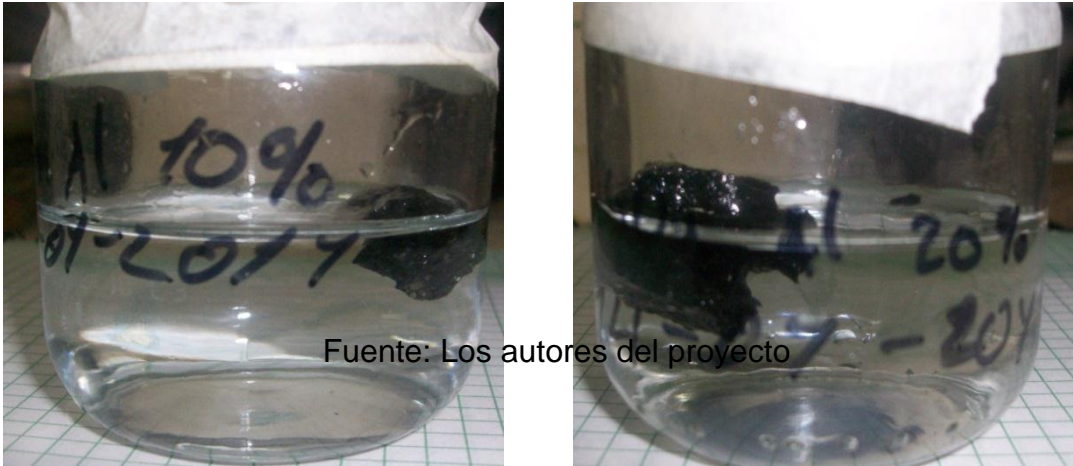
Foto 4. Fotos de la capa pegajosa de la muestra tipo II



Fuente: Los autores del proyecto

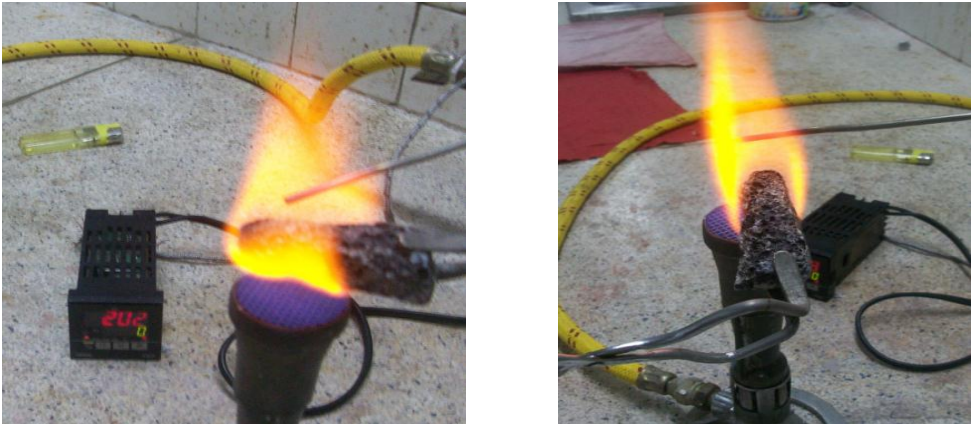
Anexo E. Ataque Químico.

Foto 5. Resistencia al ataque químico.



Anexo F. Test de Llama.

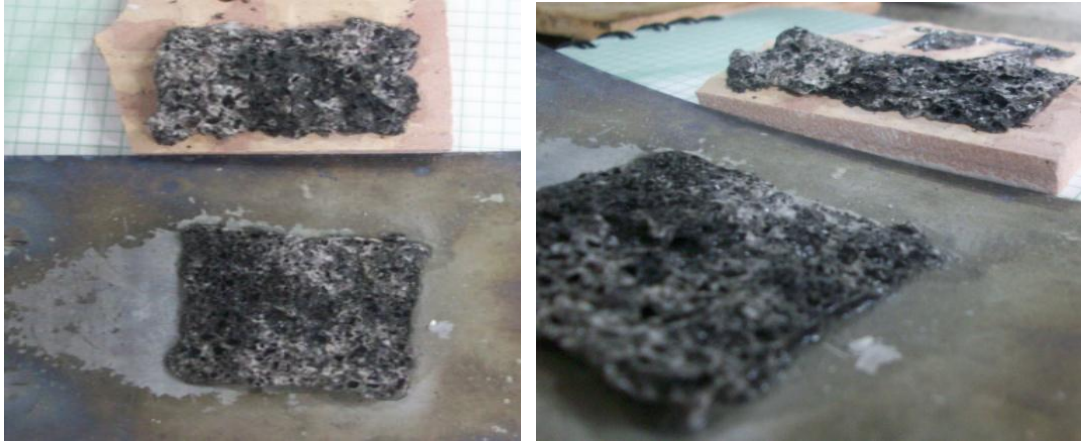
Foto 6. Comportamiento del material frente a la llama directa.



Fuente: Los autores del proyecto

Anexo G. Dilatación y capacidad de adherencia del material.

Foto 7. Adherencia del material a varias superficies



Fuente: Los autores del proyecto

Anexo H. Necesidad del papel post consumo.

Foto 8. Comportamiento del ácido bórico con silicato de sodio



Fuente: Los autores del proyecto