

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño de un biocompuesto de poliisocianurato reciclado y cascarilla de arroz para  
elaborar paneles termoacústicos

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero/a en Materiales**

Presentado por:

Alanis Karelis Menéndez San Lucas

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## Dedicatoria

---

Me gustaría dedicar el siguiente proyecto a mis padres, por haberme criado y formado en la persona que soy hoy, por confiar en mí y por su cariño incondicional. A mis hermanas por siempre escucharme y aconsejarme, demostrándome que a pesar de la distancia siempre estarán para mí.

A mi mejor amiga y mi confidente, Melani, por brindarme su apoyo y darle esa chispa de alegría a cada semestre. A mi gatita, Poli, que sin saberlo me ha sacado una sonrisa en momentos en los que más lo necesitaba.

Finalmente, me gustaría hacer una dedicatoria especial para mi hermano, Omar, por siempre demostrarme lo orgulloso que estaba de mí, por siempre expresarse con emoción al hablar de mi carrera, por siempre cuidarme y defenderme. Por ser mi ejemplo a seguir y enseñarme que no hay amor más grande y sincero que el de la familia.

## Agradecimientos

---

Agradezco principalmente a mi mamá por ayudarme a pensar en soluciones cuando se me presentaba algún inconveniente, a mi papá por siempre estar dispuesto a ayudarme cuando lo necesitaba.

A Melani, que siempre mostró preocupación y me aconsejó a lo largo del proyecto. A Erick por sus palabras de aliento cuando me sentía bajo mucho estrés.

A David por su paciencia, apoyo y dedicación durante todos estos semestres, en especial este último, su preocupación genuina por estudiantes es admirable. Al Dr. Rigail por apoyarme desde que estaba a mitad de la carrera y ayudarme en mi desarrollo como profesional.

## Declaración Expresa

---

Yo Alanis Karelis Menéndez San Lucas acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 11 de marzo del 2024.

Alanis M.

---

Alanis Karelis Menéndez San Lucas

## **Evaluadores**

---

**David Reyes, M.Phil.**

Profesor de Materia

---

**Andres Rigail, P.hD.**

Tutor de proyecto

## Resumen

En Ecuador, se produce una gran cantidad de cascarilla de arroz, de la cual solo se utiliza el 35%. Además, las empresas que fabrican paneles de poliisocianurato generan residuos, resultando en un impacto ambiental negativo. Para abordar esto, se busca diseñar paneles termoacústicos que incorporen ambos residuos, analizando sus propiedades térmicas, mecánicas y acústicas para evaluar la viabilidad técnica del proyecto y minimizar el impacto ambiental. Se realizó cada uno de los ensayos bajo la norma respectiva: aislamiento acústico, norma ISO 10140-2; inflamabilidad, ASTM D635; y el de compresión, ISO 844. Además, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) para comparar la estabilidad térmica del material. Los resultados indicaron que el compuesto con cascarilla de arroz presenta un mejor aislamiento acústico (10,25 dB), además, no influye significativamente en la inflamabilidad del material. Por otro lado, en el ensayo de compresión, se identificó un mayor esfuerzo de fluencia al compuesto con poliisocianurato reciclado (0,204 MPa). También, se calculó una TIR del 25,4% y un tiempo de retorno de 3 años y 4 meses. La mejor formulación es la del compuesto que tiene ambos refuerzos, dando como resultado un producto viable económicamente y competitivo frente a otros productos en el mercado.

**Palabras Clave:** residuos de poliisocianurato, biocompuesto, espumas rígidas, economía circular.

### **Abstract**

In Ecuador, a large amount of rice husks is produced, of which only 35% is used. In addition, companies that manufacture polyisocyanurate panels generate waste, resulting in a negative environmental impact. To address this, the aim is to design thermoacoustic panels that incorporate both wastes, analyzing their thermal, mechanical, and acoustic properties to evaluate the technical feasibility of the project and minimize the environmental impact. Each of the tests was carried out under the respective standard: acoustic insulation, ISO 10140-2; flammability, ASTM D635; and compression, ISO 844. In addition, a thermogravimetric analysis (TGA) was performed to compare the thermal stability of the material. The results indicated that the rice husk composite has a better acoustic insulation (10.25 dB) and does not significantly influence the flammability of the material. On the other hand, in the compression test, a higher yield stress was identified for the composite with recycled polyisocyanurate (0.204 MPa). Also, an IRR of 25.4% and a payback time of 3 years and 4 months were calculated. The best formulation is the composite with both reinforcements, resulting in a product that is economically viable and competitive with other products on the market.

**Keywords:** polyisocyanurate waste, biocomposite, rigid foams, circular economy.

## Índice general

Resumen .....	I
Abstract .....	II
Índice general .....	III
Abreviaturas .....	V
Simbología .....	VI
Índice de figuras .....	VII
Índice de tablas.....	VII
Capítulo 1 .....	1
1. Introducción .....	2
1.1 Descripción del Problema .....	2
1.2 Justificación del Problema .....	3
1.3 Objetivos .....	3
<i>1.3.1 Objetivo general</i> .....	3
<i>1.3.2 Objetivos específicos</i> .....	3
1.4 Marco teórico .....	4
<i>1.4.1 Uso de cascarilla de arroz en espumas de poliuretano</i> .....	4
<i>1.4.2 Uso de residuos de espumas de poliisocianurato</i> .....	5
<i>1.4.3 Preparación de las espumas de poliisocianurato con residuos agroindustriales</i> .....	5
<i>1.4.4 Paneles termoacústicos tipo sándwich</i> .....	7
Capítulo 2 .....	9
2. Metodología .....	10
2.1 Selección del refuerzo .....	10
2.2 Materiales .....	12
2.3 Elaboración del compuesto .....	13
2.4 Caracterización de muestras.....	14
<i>2.4.1 Ensayo de compresión</i> .....	14

2.4.2 Ensayo de inflamabilidad.....	15
2.4.3 Análisis termogravimétrico (TGA).....	15
2.4.4 Ensayo de aislamiento acústico .....	15
Capítulo 3 .....	16
3. Resultados y análisis .....	17
3.1 Análisis Termogravimétrico.....	17
3.2 Ensayo de Inflamabilidad.....	18
3.3 Ensayo de compresión.....	19
3.4 Ensayo de aislamiento acústico .....	22
3.5 Análisis financiero.....	22
Capítulo 4.....	24
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....	25
4.1.1 Conclusiones .....	25
4.1.2 Recomendaciones .....	26
Referencias	
Anexos	

### Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NACE	National Association of Corrosion Engineer
SSC	Electrodo de Plata Cloruro de Plata
CSE	Electrodo de Cobre Sulfato de Cobre
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level
CIS	Inspección pasó a paso, medición de potenciales de encendido
MPY	Milésimas de pulgadas por año
PIR	Poliisocianurato reciclado
CA	Cascarilla de arroz
TGA	Análisis termogravimétrico
TIR	Tasa Interna de retorno
VAN	Valor actual neto

## Simbología

mil	Milésima de pulgada
mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
mV	Milivoltio
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo

### Índice de figuras

Figura 1.1. Reacción para obtener poliisocianurato.....	6
Figura 1.2. Diagrama de la preparación del compuesto.....	6
Figura 1.3. Composición de un panel tipo sándwich.....	7
Figura 1.4. Línea de producción continua de paneles de PIR.....	8
Figura 1.5. Línea de producción discontinua de paneles de PIR.....	8
Figura 2.1. Pasos para elaborar espumas de poliisocianurato con residuos.....	14
Figura 3.1. (a) gráfica DTG y (b) gráfica TGA de las espumas de PIR.....	18
Figura 3.2. Muestras sometidas a ensayo de inflamabilidad.....	19
Figura 3.3. Resultados de ensayo de tracción de los compuestos.....	20
Figura 3.4. Flujo neto acumulado en el transcurso de 5 años.....	23

### Índice de tablas

Tabla 2.1. Ponderación de criterios para la selección del residuo.....	11
Tabla 2.2. Matriz de decisión para la selección del residuo.....	12
Tabla 2.3. Formulaciones de los compuestos de PIR.....	13
Tabla 3.1. resultados de ensayo de compresión.....	21
Tabla 3.2. Resultados de ensayo de aislamiento acústico.....	22
Tabla 3.3. Resultados de análisis financiero.....	22

# Capítulo 1

## **1. Introducción**

La producción agrícola es un sector importante de la economía ecuatoriana, sin embargo, también genera residuos, como la cascarilla de arroz. Una solución innovadora que se está explorando en el país es la incorporación de estos desechos en matrices poliméricas. Este enfoque no solo aborda el desafío de gestionar los desechos agrícolas, sino que también ofrece oportunidades para crear materiales con propiedades únicas, que pueden utilizarse en una variedad de aplicaciones, como la construcción [1].

### **1.1 Descripción del Problema**

En Ecuador, la producción de arroz es un sector importante de la economía, contribuyendo con un 3,5% al Producto Interno Bruto (PIB) del país [2]. De esta producción se genera un residuo llamado cascarilla de arroz (CA) que representa aproximadamente el 20% del peso de la cosecha y se convierte en un problema ambiental [3].

Se estima que, en Ecuador, la cantidad de residuos de cascarilla de arroz trimestral es de 366.418,5 toneladas, de las cuales solo el 35% es aprovechado [4]. El 65% restante se quema en apiladoras y terrenos aislados (75%), se coloca en el borde de las carreteras (15%), se deposita en fuentes hídricas (5%) y se mezcla en el ambiente (5%) [4]. La quema de la cascarilla de arroz genera emisiones de gases de efecto invernadero y partículas que pueden afectar la calidad del aire y pueden ser perjudiciales para la salud humana [5][6].

Por otro lado, una empresa metalmecánica ecuatoriana se enfrenta a un desafío doble en su proceso de fabricación de paneles termoacústicos de poliisocianurato (PIR). En primer lugar, la empresa depende de materia prima importada para la producción de PIR, lo que genera costos elevados y vulnerabilidad a las fluctuaciones del mercado internacional [7]; especialmente en relación con la variabilidad del tipo de cambio, lo que puede impactar negativamente en los costos de producción y la estabilidad financiera [7]. Además, durante la producción de espumas de PIR

se generan residuos que no son aprovechados de manera eficiente, lo que resulta en una gestión ineficaz de los desechos industriales, costos adicionales y un impacto ambiental negativo [8].

## **1.2 Justificación del Problema**

La cascarilla de arroz es un material local y de bajo costo que podría ayudar a la empresa a reducir su dependencia de materia prima importada. Además, su uso para la producción de PIR contribuiría a la economía circular, a la reducción de la contaminación ambiental y al apoyo de la economía local. Asimismo, la compra de cascarilla de arroz a los productores locales ayudaría a reducir la quema de este residuo, disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero y partículas finas que pueden afectar la calidad del aire y la salud humana [1].

Finalmente, el desarrollo de un biocompuesto elaborado con residuos de cascarilla de arroz y de PIR contribuiría a una gestión sostenible de residuos, otorgándoles un valor agregado y permitiendo contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9 y 12.

## **1.3 Objetivos**

A continuación, se describe el objetivo general y los objetivos específicos que orientan el desarrollo del proyecto:

### ***1.3.1 Objetivo general***

Diseñar un biocompuesto para paneles termoacústicos utilizando cascarilla de arroz y poliisocianurato reciclado mediante el estudio de sus propiedades mecánicas, térmicas y acústicas para minimizar el impacto ambiental y reducir la dependencia de material importado.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Definir la composición óptima del biocompuesto mediante ensayos de compresión, ensayos de inflamabilidad y ensayos acústicos para evaluar su viabilidad de uso.
- Analizar las transiciones térmicas y estabilidad de distintas formulaciones mediante los resultados de ensayos de TGA y ensayo de inflamabilidad para compararlas con la muestra de referencia.

- Evaluar la viabilidad económica de la producción del biocompuesto mediante un análisis financiero para determinar su competitividad frente a otros productos en el mercado.

## **1.4 Marco teórico**

En esta sección se detalla una revisión de literatura, la cual proporciona una sólida base teórica para respaldar el enfoque del proyecto.

### ***1.4.1 Uso de cascarilla de arroz en espumas de poliuretano***

La cascarilla de arroz presenta varios componentes importantes como: lignina (22,5%), hemicelulosa (28,3%), celulosa (27,2%) y sílice (22%) [9]. La lignina y la sílice influyen en la estabilidad térmica del material, ya que mientras mayor sea el contenido de lignina mayor será la estabilidad térmica [10]. Por otro lado, la celulosa presenta una baja conductividad térmica, lo que contribuye a la capacidad de aislamiento térmico de la cascarilla de arroz, con un valor de 0.070-0.080 W/m K, además de una alta resistencia mecánica y una baja densidad [11]. Asimismo, la alta porosidad de la cascarilla le permite absorber el sonido, convirtiéndola en una buena alternativa para aplicaciones en las que se requiere un buen aislamiento acústico [12]. Además, su temperatura de incineración elevada provoca que no sea fácil de quemar [3].

En diversos estudios se ha analizado el uso de cascarilla de arroz como refuerzo para espumas de poliuretano y de poliisocianurato debido a que su contenido de lignina y celulosa le permiten reaccionar con los grupos funcionales isocianato [3]. Por ejemplo, una investigación ha explorado la viabilidad técnica de emplear cascarilla de arroz como un refuerzo en la producción de espumas rígidas de poliuretano, concluyendo que las propiedades mecánicas de la espuma disminuyen al incrementar el porcentaje de cascarilla, además la temperatura máxima de descomposición mejora ligeramente de 116°C a 118°C [13].

Otro estudio encontró que la adición de un 10% de cascarilla de arroz como reforzante en las espumas de poliisocianurato mejoró sus propiedades físico-mecánicas. Los resultados mostraron un incremento en la densidad aparente, alcanzando los 43 kg/m<sup>3</sup>, junto a un notorio

incremento en la resistencia a la compresión, siendo esta de 226 kPa. Este valor superó la resistencia a la compresión de la espuma de PIR sin cascarilla (186 kPa) [14]. Un comportamiento similar ocurre en el estudio de M. Golmohammadi. Al usar un 5% de cascarilla de arroz se registró una resistencia a la compresión de 230 kPa. No obstante, al incrementar a un 15% la resistencia a la compresión se redujo a 180 kPa [15].

Por otro lado, S. Mahzan demostró que el utilizar un 10% de cascarilla de arroz como refuerzo en espumas de poliuretano resulta en un incremento de las propiedades de absorción acústica, en especial a 250 Hz. Los resultados revelaron que la espuma de poliuretano sin cascarilla presentó un coeficiente de absorción acústica en el rango de 0.3 y 0.4, mientras que el que contiene 10% de cascarilla de arroz se encuentra entre 0.4 y 0.5 [16].

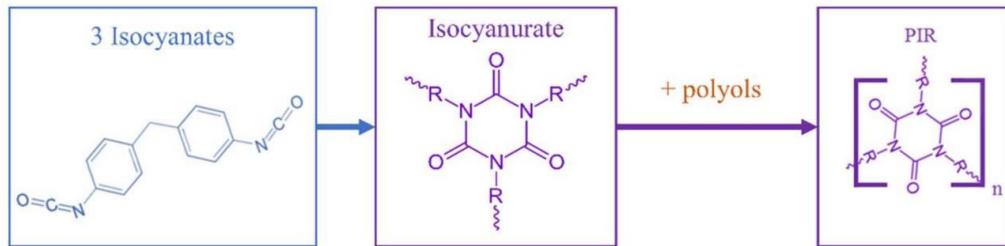
#### ***1.4.2 Uso de residuos de espumas de poliisocianurato***

La espuma de PIR es ampliamente utilizada en la construcción, el transporte y diversas aplicaciones industriales, incluyendo el aislamiento de suelos, techos, paredes, así como la fabricación de productos como frigoríficos y congeladores [17]. Sin embargo, la gestión de los residuos de espuma de PIR a menudo implica su disposición en vertederos [18]. Con el fin de abordar este problema, se han realizado investigaciones, incluyendo un estudio que sugiere que la molienda y reincorporación de residuos de PIR en nuevas formulaciones de espuma de PIR es una opción viable [19]. Sin embargo, no es un tema que se ha evaluado a profundidad.

#### ***1.4.3 Preparación de las espumas de poliisocianurato con residuos agroindustriales***

La espuma de PIR se produce al combinar una mezcla de isocianato con una resina de polioliol mediante una reacción química, dando como resultado una plancha de espuma con excelentes propiedades aislantes [20]. Como se muestra en la figura 1.1, las espumas de poliisocianurato, o PIR, se forman mediante una reacción de ciclotrimerización, en la que tres moléculas reaccionan juntas en una configuración de anillo[21]. El polioliol proporciona los grupos hidroxilo necesarios para la reacción con los isocianatos, dando lugar a la formación de la matriz

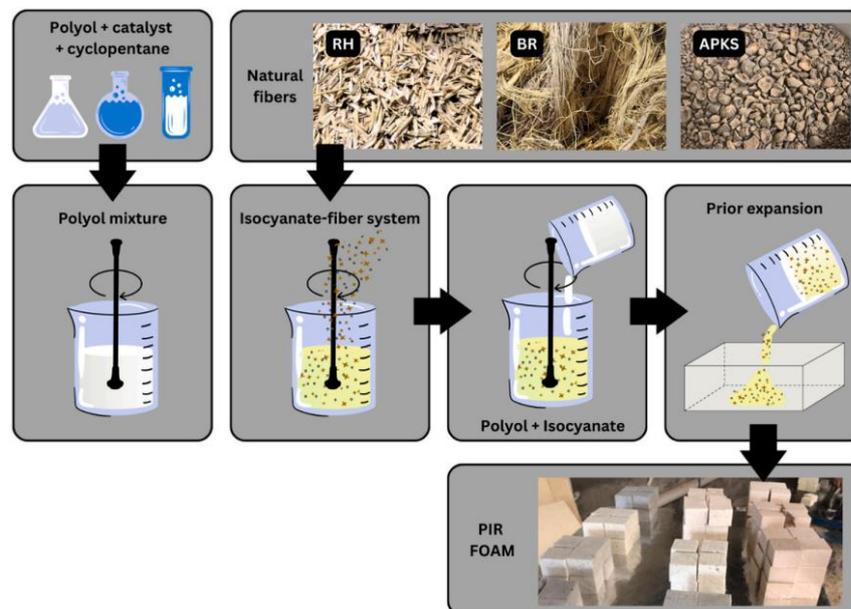
[22]. Por tanto, las espumas PIR forman un polímero heterogéneo que contiene un anillo de isocianurato unido a polioles a través de enlaces de uretano y urea [21].



**Figura 1.1** Reacción para obtener poliisocianurato[21].

En un recipiente plástico, se mezclan el polioliol, el catalizador, el ciclopentano y el refuerzo a utilizarse. El catalizador se utiliza para iniciar y acelerar la reacción entre los componentes. Por otro lado, el ciclopentano se emplea como agente espumante. A medida que se forma la espuma, el ciclopentano se evapora, creando burbujas de gas que le dan lugar a la estructura celular de la espuma [22].

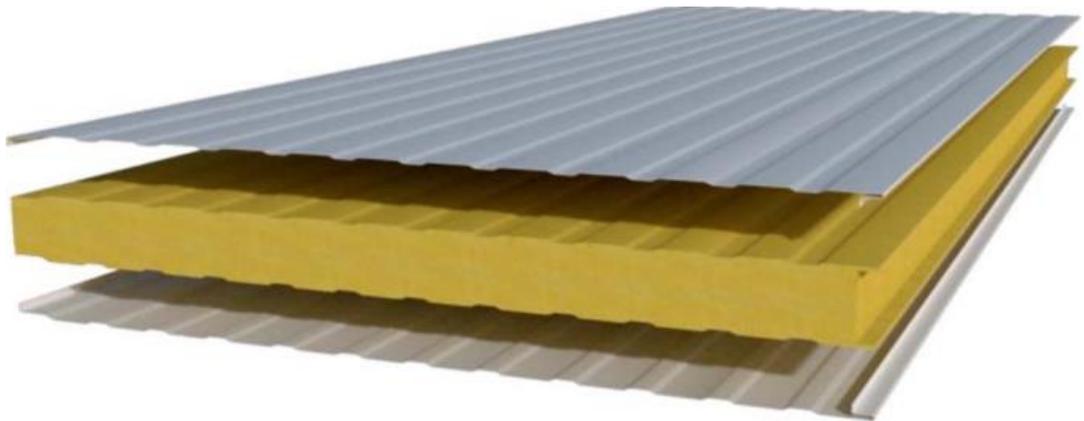
Posteriormente, la mezcla de polioliol se agrega a la mezcla de isocianato hasta que se observa una expansión [14]. Finalmente se vierte en el molde y se deja reposar como se muestra en la figura 1.2.



**Figura 1.2.** Diagrama de la preparación del compuesto de PIR y desechos [14].

#### **1.4.4 Paneles termoacústicos tipo sándwich**

Los paneles tipo sándwich consisten en dos láminas de acero y un material aislante en su núcleo [23], como se muestra en la figura 1.3. La selección del material para el núcleo es de vital importancia para asegurar un adecuado rendimiento en cuanto a aislamiento y es esencial que tenga la rigidez necesaria en la dirección perpendicular a las caras del panel.



**Figura 1. 3.** Composición de un panel tipo sándwich [24]

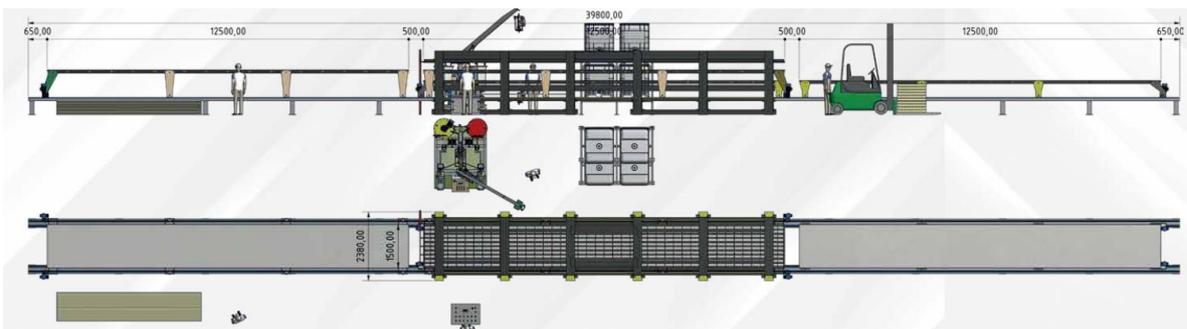
Comúnmente, se utilizan materiales como poliuretano (PUR) y/o PIR para este propósito [25]. Existen dos líneas de producción para paneles tipo sándwich: línea de producción continua y línea de producción discontinua.

**1.4.4.1 Línea de producción continua.** En este proceso los materiales para el panel se procesan juntos a toda velocidad. La espuma PIR es rociada continuamente sobre los materiales de la superficie superior e inferior. La polimerización toma lugar entre las láminas metálicas dando paso a la formación del panel. Una vez el panel está completamente formado, se realiza el corte a la longitud deseada y la línea de corte no se detiene [26]. Todo este proceso se lleva a cabo en la maquinaria que se muestra en la figura 1.4.



**Figura 1.4.** Línea de producción continua de paneles de PIR [26].

**1.4.4.2 Línea de producción discontinua.** En este proceso los materiales se procesan por separado, las láminas de metal se forman y se cortan por separado, después la mezcla de PIR se distribuyen dentro de las láminas. Este proceso se utiliza para productos con formas que no se pueden realizar en el proceso continuo, o cuando el ritmo de producción no justifica la inversión [27]. La maquinaria en la que se lleva a cabo el proceso se puede observar en la figura 1.5.



**Figura 1.5.** Línea de producción discontinua de paneles de PIR [28].

## **Capítulo 2**

## 2. Metodología

En esta sección, se detalla el proceso de selección del residuo, la elaboración de los paneles de poliisocianurato, los materiales empleados, las formulaciones y los ensayos realizados.

### 2.1 Selección del refuerzo

Para elegir el residuo de refuerzo se consideraron distintos criterios para garantizar la calidad del material utilizado y se ponderaron como se muestra en la tabla 2.1:

**Disponibilidad:** La disponibilidad del desecho puede influir en la cantidad de material disponible para su uso como agregado parcial. Si no hay material suficiente disponible, se vuelve difícil mantener un proceso de producción estable a largo plazo. Además, la disponibilidad del desecho incide directamente en costos de adquisición y logística. De igual manera, es necesario considerar el impacto ambiental de la generación y transporte del material recuperado. Por lo tanto, es importante seleccionar desechos que estén disponibles en cantidades suficientes y que sean sostenibles desde el punto de vista ambiental y económico [29].

**Aislamiento térmico:** La efectividad de los paneles de poliisocianurato como sistema de aislamiento térmico depende en gran medida de su conductividad térmica [14]. Por lo tanto, el residuo seleccionado debe mejorar o al menos mantener los niveles de aislamiento térmico del panel original de PIR. De lo contrario, se comprometería su funcionalidad primordial como sistema de aislamiento en aplicaciones de construcción [30]. Además, debe mantener la baja inflamabilidad característica del PIR

**Resistencia mecánica:** La inclusión de desechos como agregados parciales puede afectar las propiedades mecánicas del panel. Propiedades como la resistencia a la compresión resultan esenciales para garantizar la integridad estructural y durabilidad de los paneles en aplicaciones de construcción [14]. Por lo tanto, el residuo seleccionado debería aumentar o al menos conservar los niveles de resistencia mecánica a compresión exhibidos por el panel original de PIR. Caso

contrario, se comprometería la capacidad del sistema para soportar las cargas externas que podrían poner en riesgo la estabilidad estructural.

**Costo:** El costo del desecho como agregado parcial puede influir significativamente en el costo total de producción de los paneles termoacústicos, lo que a su vez puede afectar su precio de venta y su competitividad en el mercado. Además, considerar el costo del desecho es crucial para evaluar la rentabilidad y sostenibilidad económica del uso de materiales reciclados o residuos como agregados en la fabricación de paneles PIR [31] [14].

**Tabla 2.1.** Ponderación de cada criterio para seleccionar el residuo.

<b>Criterio</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Resistencia térmica</b>	<b>Resistencia mecánica</b>	<b>Costo</b>	$\sum +1$	<b>Ponderación</b>
<b>Disponibilidad</b>	-	0	1	0,5	2,5	0,25
<b>Resistencia térmica</b>	1	-	1	1	4	0,40
<b>Resistencia mecánica</b>	0	0	-	0	1	0,10
<b>Costo</b>	0,5	0	1	-	2,5	0,25
				Suma	10	1,00

El criterio con mayor ponderación fue la resistencia térmica, dado que es la función principal que debe cumplir un panel termoacústico. Después, se consideró la disponibilidad regional y el bajo costo de adquisición del desecho, como factores determinantes de la viabilidad económica y facilidad de implementación a escala industrial. Finalmente, pese a la relevancia de garantizar un comportamiento mecánico adecuado, la resistencia a compresión tuvo un peso inferior debido al aporte estructural de las láminas externas de acero en el panel tipo sándwich.

Basándonos en estos criterios, se procedió a la selección del residuo, considerando las siguientes opciones:

**Cascarilla de arroz:** Esta opción se destaca por su mayor disponibilidad en el mercado, un costo asequible de \$6 por saco, y una resistencia mecánica superior a otros residuos como el

raquis de banano y el cuesco de palma aceitera. No obstante, es importante señalar que presenta una menor resistencia térmica en comparación con las alternativas disponibles [14].

**Raquis de banano:** Esta opción tiene menor disponibilidad en comparación con la cascarilla de arroz, un costo más elevado, y su resistencia mecánica es más baja que la de los otros residuos. Sin embargo, destaca por una mayor resistencia térmica en comparación con la cascarilla [14].

**Cuesco de palma aceitera:** Esta opción se encuentra en menor cantidad que la cascarilla y el raquis de banano. Aunque su resistencia mecánica supera la del raquis, es inferior a la de la cascarilla y también presenta un costo más elevado. No obstante, destaca por una mejor resistencia térmica [14]. En la Tabla 2.2, se logró determinar que la cascarilla de arroz es la opción más favorable como residuo a utilizar.

**Tabla 2.2.** Matriz de decisión para la selección del residuo.

<b>Conclusión</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Resistencia térmica</b>	<b>Resistencia mecánica</b>	<b>Costo</b>	<b>Sumatoria</b>
<b>Cascarilla de arroz</b>	0,20	0,05	0,10	0,05	0,37
<b>Raquis de banano</b>	0,13	0,10	0,03	0,08	0,30
<b>Cuesco de palma aceitera</b>	0,07	0,15	0,07	0,03	0,33

## 2.2 Materiales

Los materiales que se usaron para elaborar las distintas formulaciones fueron:

- Polioli
- Isocianato
- Catalizador
- Ciclopentano
- PIR reciclado
- Cascarilla de arroz

La Tabla 2.3 presenta las composiciones seleccionadas para la elaboración de los paneles compuestos, incorporando un 5% en peso de partículas del residuo de PIR. La cascarilla de arroz se incorporó en un 10%. Esta proporción de cascarilla se escogió basándose en un estudio previo de Lazo et al. [14], donde se determinó que un contenido de 10% lograba el mejor balance entre propiedades mecánicas y térmicas en el producto final.

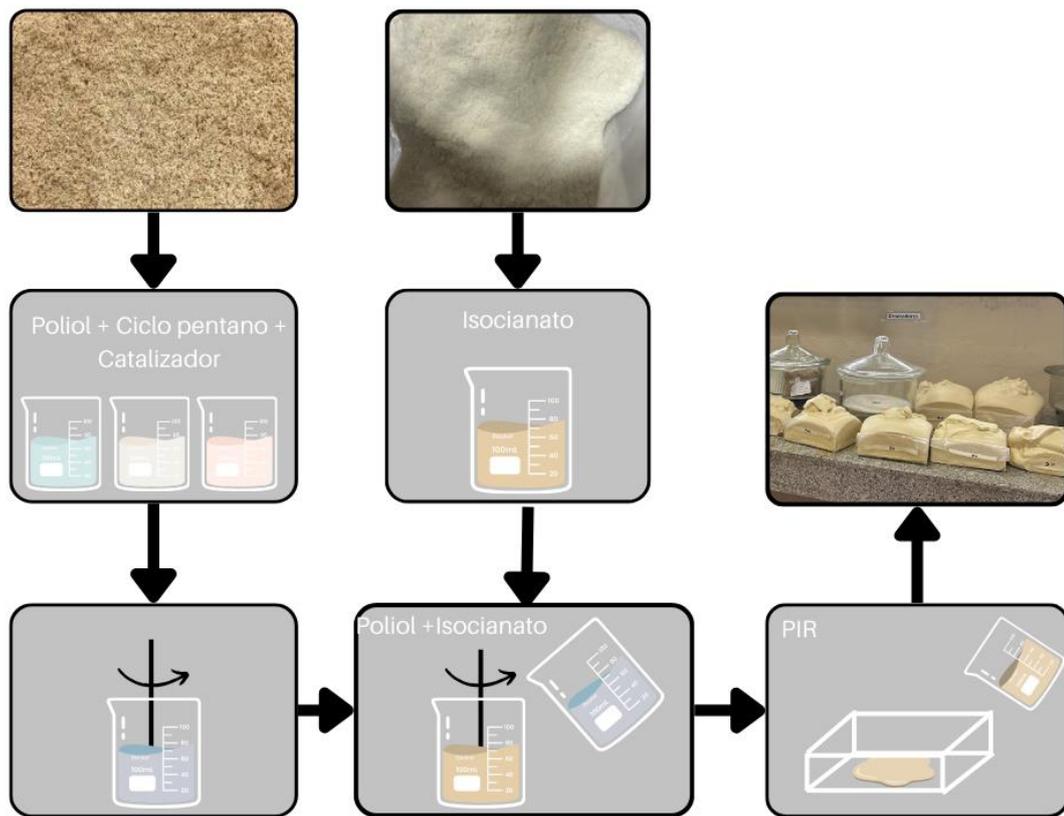
**Tabla 2.3.** Formulaciones de los compuestos con poliisocianurato reciclado y cascarilla de arroz.

	<b>PIR (g)</b>	<b>PIR + Cascarilla (g)</b>	<b>PIR + PIR reciclado (g)</b>	<b>PIR + Cascarilla (g) + PIR reciclado (g)</b>
<b>Poliol</b>	69,570	65,463	69,092	61,820
<b>Catalizador</b>	2,10	1,955	2,070	1,850
<b>Ciclo pentano</b>	9,74	9,154	9,670	8,650
<b>Isocianato</b>	139,84	131,580	138,860	124,26
<b>PIR reciclado</b>	-	-	12,075	12,075
<b>Cascarilla</b>	-	23,126	-	23,126

### 2.3 Elaboración del compuesto

Para la elaboración del compuesto se siguió un proceso similar al de Lazo et al. [14]. Primero, la cascarilla de arroz se secó en una estufa a 60°C durante 24 horas y luego se trituró en un molino mecánico con 4 placas de corte reversible. De manera similar, se pulverizó el PIR reciclado en una trituradora de 8 cuchillas.

Se prepararon dos mezclas diferentes: la primera consistió en juntar el polioliol, el catalizador y el ciclopentano agregándole la cascarilla de arroz para las formulaciones en las que se requería. La segunda mezcla consistió en el isocianato, y el PIR reciclado en las formulaciones que lo requerían. Luego, se vertió la mezcla del isocianato en la mezcla del polioliol y se mezclaron con el agitador mecánico IKA Labortechnik a 2000 rpm, hasta que se observe la formación de la espuma que da paso a la expansión. Finalmente, se esparció la mezcla final en el molde y se dejó reposar durante 24 horas. Este proceso se puede observar en la figura 2.1. Una vez listas las muestras se procedió a realizar los cortes con una sierra mecánica para darle las medidas de los especímenes requeridos para cada uno de los ensayos.



**Figura 2.1.** Pasos para laborar espumas de poliisocianurato con residuos.

## 2.4 Caracterización de muestras

En esta sección se describen los ensayos que se realizaron para caracterizar el biocompuesto y cómo se evaluaron sus propiedades mecánicas, térmicas y acústicas.

### 2.4.1 Ensayo de compresión

Este ensayo se basa en la norma ISO844. Esta norma establece requisitos específicos para la preparación de la muestra, incluyendo el tamaño y la forma de la sección transversal, así como la altura mínima y máxima de la muestra (5 cm x 5 cm x 5 cm). Además, se detallan los procedimientos para la realización de la prueba, estableciendo una velocidad 5mm/min hasta deformar la muestra 30 mm [32]. Este ensayo se realizó con el objetivo de identificar el efecto que tienen el PIR reciclado y la cascarilla de arroz como refuerzo en la espuma de PIR.

#### **2.4.2 *Ensayo de inflamabilidad***

Este ensayo se realiza bajo la normal ASTM D635. La norma describe el procedimiento para realizar la prueba, que implica colocar una muestra del material plástico en posición horizontal y exponerla a una llama controlada. Se registran parámetros clave, como el tiempo que tarda en comenzar a arder, la tasa de propagación de la llama y el tiempo total de combustión. Los resultados obtenidos se utilizan para evaluar el comportamiento de combustión del material plástico en función de la velocidad de propagación de la llama, la duración de la combustión y la extensión de la zona afectada [33]. Este ensayo se realiza para conocer si la adición de la cascarilla de arroz o del PIR reciclado afecta a la inflamabilidad del material.

#### **2.4.3 *Análisis termogravimétrico (TGA)***

El análisis TGA proporciona información sobre la degradación térmica, incluido el inicio de la descomposición, el intervalo de temperatura en el que se produce la descomposición y la cantidad de pérdida de masa en función de la temperatura [34]. Se realizó en una atmósfera controlada de nitrógeno de 0 a 600 °C. Este análisis es crucial para estudiar los efectos de la adición de la cascarilla de arroz y del PIR reciclado en las propiedades térmicas del biocompuesto.

#### **2.4.4 *Ensayo de aislamiento acústico***

La norma ISO 10140-2 establece métodos de medición en laboratorio para determinar la capacidad de aislamiento acústico de elementos de construcción cuando se trata de la transmisión de sonido aéreo. Se basa en la utilización de transductores acústicos y una fuente normalizada de sonido para medir tanto la señal incidente como la transmitida y los resultados se utilizan para calcular el sonido absorbido [35] con el objetivo de identificar el efecto de la cascarilla de arroz y el PIR reciclado en el material compuesto al compararlo con el PIR sin refuerzos.

## **Capítulo 3**

### **3. Resultados y análisis**

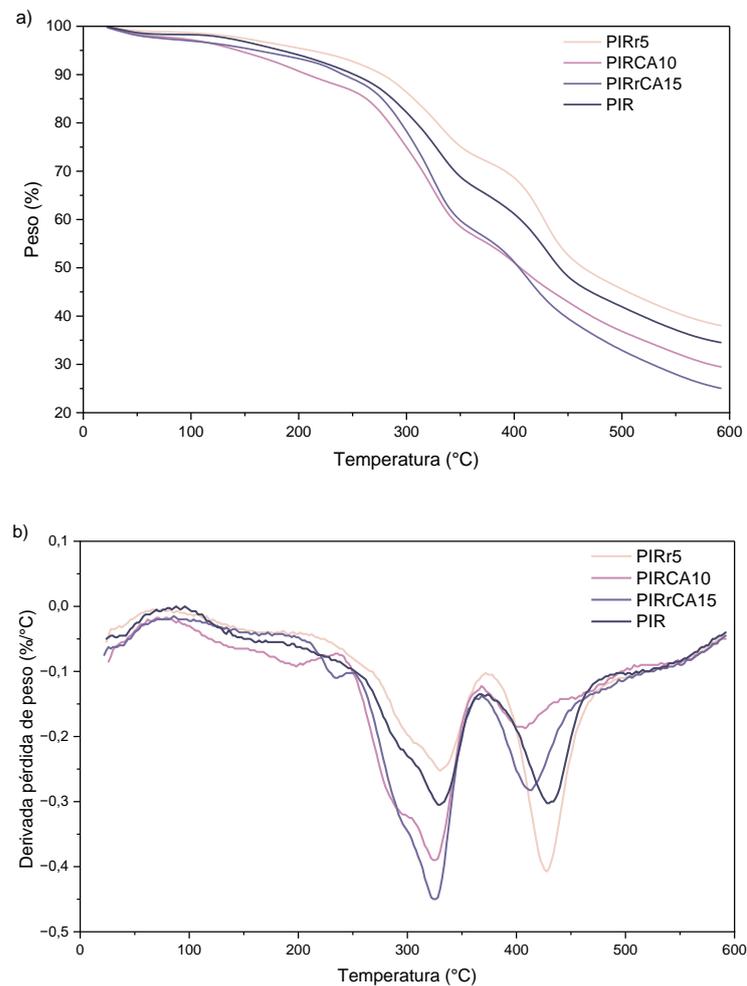
Se elaboraron una serie de ensayos, que incluyeron pruebas de compresión, análisis termogravimétrico (TGA), evaluación de inflamabilidad, mediciones de aislamiento acústico, y un análisis financiero con el propósito de evaluar la viabilidad y rentabilidad de las espumas de poliisocianurato elaboradas con cascarilla de arroz y PIR reciclado para paneles termoacústicos. Para identificar las formulaciones específicas, se designaron de la siguiente manera: el compuesto sin ningún refuerzo se definió como PIR; aquel que contenía un 5% de PIR reciclado, se designó como PIRr5; el compuesto con un 10% de cascarilla de arroz fue denominado PIRCA10; y aquel que incorporó tanto cascarilla como PIR reciclado en un 15%, se designó como PIRrCA15.

#### **3.1 Análisis Termogravimétrico**

En la figura 3.1b se observa una pérdida de masa inicial en el rango de 100 a 150 °C correspondiente a la eliminación de la humedad debido a la evaporación del agua absorbida por las espumas [36]. Estudios previos han demostrado que la cascarilla de arroz presenta la capacidad de absorber agua, por esto, la curva del compuesto PIRCA10 exhibe un pico de eliminación de humedad más pronunciado en comparación a los otros compuestos [37]. Posteriormente, se identifican dos picos distintivos: uno a 208 °C para la mezcla PIRCA10 y otro a 240 °C para la mezcla PIRrCA15. Estos picos están asociados con la degradación térmica de la cascarilla de arroz. Además, entre los 250 y 350°C se visualiza una gran pérdida de peso en todos los compuestos que se puede atribuir a la disociación de los enlaces de uretano [14] [36]. Por último, el pico presente en todas las muestras después de los 350 °C ocurre debido a la descomposición del polioliol [14].

En la figura 3.1a se puede resaltar que la temperatura de descomposición del compuesto que tiene únicamente 10% de cascarilla como relleno es la más baja (144°C) y que la que tiene una temperatura de descomposición más elevada es el compuesto que solo tiene PIR reciclado en un 5% (210°C), sugiriendo que el PIR reciclado contribuye a mejorar la estabilidad térmica de las espumas. Por otro lado, el compuesto que tiene tanto cascarilla como PIR reciclado tiene una

estabilidad térmica intermedia (160°C). Este comportamiento se atribuye a que la cascarilla contribuye a la degradación térmica del material, como se evidencia en la figura 3.1b, donde la degradación del compuesto PIRCA10 empieza antes que la de los compuestos sin cascarilla. Este efecto es más notable al compararla con la curva del compuesto que solo tiene PIR reciclado, donde la degradación empieza después de las demás.

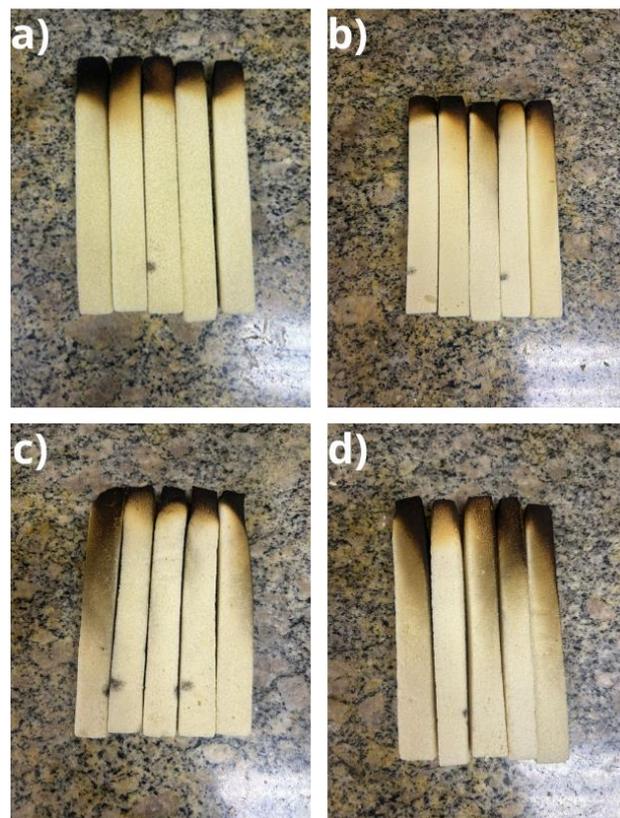


**Figura 3.1.** (a) Gráfica DTG y (b) gráfica TGA de las espumas de PIR y los demás compuestos.

### 3.2 Ensayo de Inflamabilidad

Las muestras de la figura 3.2 fueron sometidas a la llama durante 30 segundos a un ángulo de 45 grados. Las muestras "a" y "b" corresponden a muestras que no tienen cascarilla de arroz (PIR y PIRr5) y al ser sometidas a la llama, la llama se autoextinguió. Mientras que las muestras "c" y "d" contienen cascarilla de arroz (PIRCA10 y PIRrCA15) y la llama se extingue después de

un segundo de retirarla de la flama, indicando que la cascarilla no influye de manera significativa a la combustión del poliisocianurato [38], [39]. Por otro lado, todas las muestras revelaron una carbonización localizada en las áreas en contacto con la flama, indicando algún grado de degradación térmica, a pesar de su capacidad para autoextinguirse o extinguirse rápidamente. Sin embargo, las muestras que contienen cascarilla de arroz presentan una mayor zona carbonizada debido a que la cascarilla es un material lignocelulósico lo cual influye en la formación de carbono durante la combustión [40].



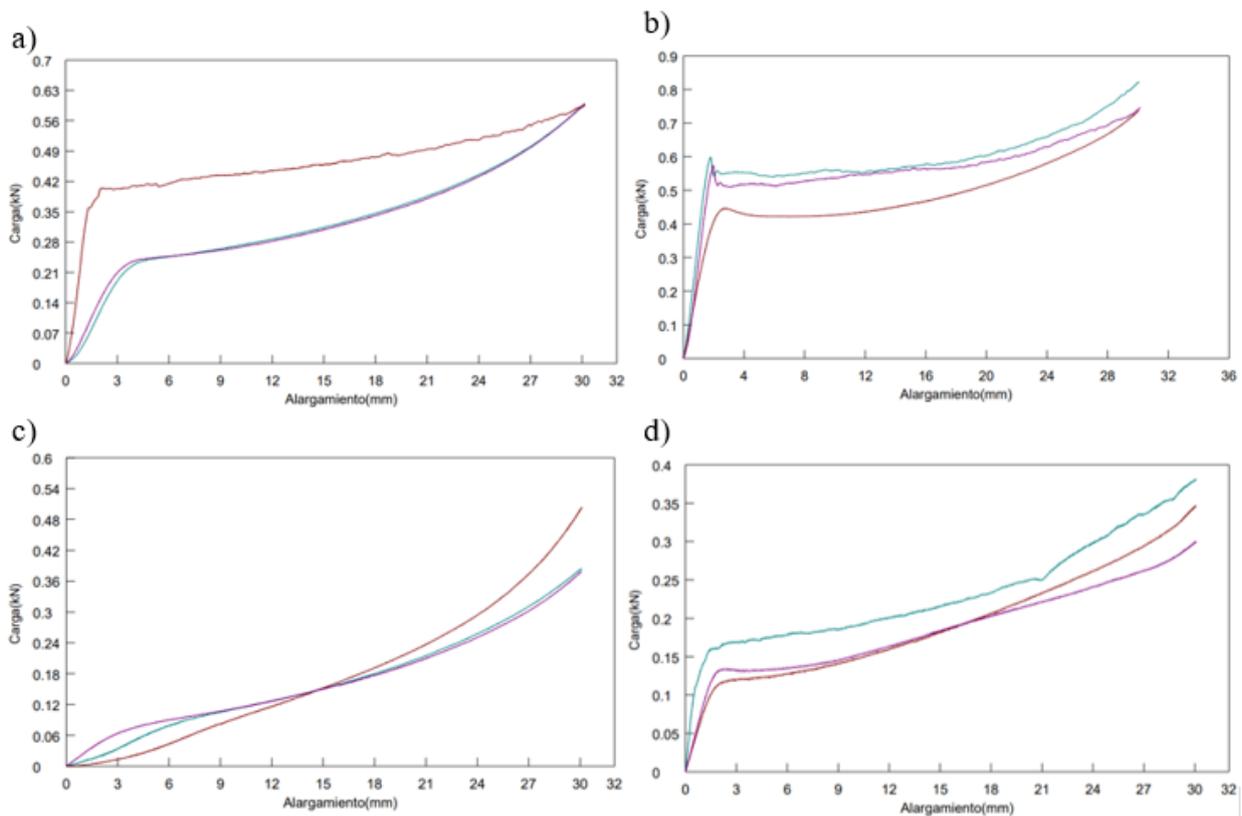
**Figura 3.2.** Muestras sometidas a ensayo de flamabilidad de los compuestos (a) PIR, (b) PIRr5, (c) PIRCA10 y (d) PIRrCA15.

### 3.3 Ensayo de compresión

En la tabla 3.1 se presenta el promedio de los resultados de los ensayos de compresión realizados en tres muestras de cada formulación, hasta alcanzar una deformación del 60%. Las curvas de fuerza-alargamiento de las tres formulaciones exhiben un comportamiento similar al de

una espuma rígida sometida a compresión [41]. Se pueden distinguir dos regiones: una región elástica, caracterizada por una pendiente lineal considerable en la curva, y la región plástica.

Al observar las gráficas de fuerza-alargamiento en la figura 3.3 se observó que la formulación que contiene cascarilla de arroz mostró un comportamiento similar al de una espuma flexible, mientras que las otras composiciones exhibieron el comportamiento típico de una espuma rígida.



**Figura 3.3.** Resultados de ensayo de tracción de los compuestos (a) PIR, (b) PIRr5, (c) PIRCA10 y (d) PIRrCA15

Al comparar este comportamiento con estudios previos, se esperaba que el compuesto se comportara como una espuma rígida, al igual que las demás formulaciones [42]. Al ser una espuma flexible se considera que el esfuerzo de fluencia será igual al esfuerzo máximo [43] por ende se considera que el esfuerzo de fluencia en este caso es de 0,17 MPa, lo que difiere con los resultados obtenidos por Lazo [14], donde la resistencia a la compresión fue de 0,226 MPa. Este fenómeno puede atribuirse a la capacidad de la cascarilla de arroz para absorber humedad, convirtiéndose en

parte de la reacción entre el polioliol y el isocianato. Los grupos OH del agua presente en la cascarilla también reaccionan con el isocianato, generando cambios en la densidad y en las celdas de las espumas. Como resultado, la espuma presenta celdas abiertas, otorgándole una mayor flexibilidad [38], [39], [44].

Por otro lado, entre las otras tres formulaciones, la que obtuvo un mayor esfuerzo de fluencia fue la que contiene un 5% de PIR reciclado con un esfuerzo de 0,204 MPa superando al PIR sin reciclar, que fue de 0,10 MPa. Esto sugiere que el PIR reciclado incrementa la resistencia a la compresión de la espuma. En base a lo mencionado previamente, tiene sentido que como resultado la muestra que mezcla cascarilla de arroz y poliisocianurato reciclado se obtenga una espuma rígida, pero con un esfuerzo de fluencia mucho menor (0,044 MPa), posiblemente a que al agregar PIR reciclado se impide la formación de burbujas durante la formación del compuesto, reduciendo el tamaño de las celdas del compuesto [14]. Sin embargo, al basarse en los resultados del estudio realizado por Lazo [14] la resistencia a la compresión al utilizar cascarilla de arroz debería ser incluso mayor que la que contiene PIR reciclado.

**Tabla 3.1** Resultados de ensayo de compresión de los compuestos

<b>Formulación</b>	<b>Carga de fluencia (kN)</b>	<b>Esfuerzo de fluencia (MPa)</b>	<b>Carga a 60% de deformación (kN)</b>	<b>Esfuerzo a 60% de deformación (MPa)</b>
<b>PIR</b>	0,25	0,10	0,60	0,24
<b>PIRr5</b>	0,51	0,204	0,77	0,31
<b>PIRCA10</b>	0,42	0,17	0,42	0,17
<b>PIRrCA15</b>	0,11	0,044	0,34	0,14

### 3.4 Ensayo de aislamiento acústico

En la tabla 3.2, se resumen los resultados del ensayo de aislamiento acústico en el que se pudo determinar que al bloquear el paso del sonido con una pared de PIR sin ningún agregado se tiene una absorción de 9,43 dB. Sin embargo, al agregar el PIR reciclado el valor disminuye hasta 7,03 dB indicando que el uso del PIR reciclado disminuye el aislamiento acústico del compuesto. Por otro lado, la adición de cascarilla de arroz resulta en un incremento en la absorción de sonido, alcanzando los 10,25 dB debido a la estructura porosa de este material [39]. Además, se observa un aumento en la absorción de sonido en el compuesto que contiene tanto PIR reciclado como cascarilla de arroz en comparación con aquel que solo presenta PIR reciclado.

**Tabla 3.2** Resultados de ensayo de aislamiento acústico

<b>Exposición al ruido</b>	<b>Promedio de sonido transmitido (dB)</b>	<b>Sonido absorbido (dB)</b>
<b>Sin impedimento</b>	81,5	-
<b>Pared PIR</b>	72,1	9,43
<b>Pared PIRr5</b>	74,5	7,03
<b>Pared PIRCA10</b>	71,3	10,25
<b>Pared PIRrCA15</b>	72,8	8,70

### 3.5 Análisis financiero

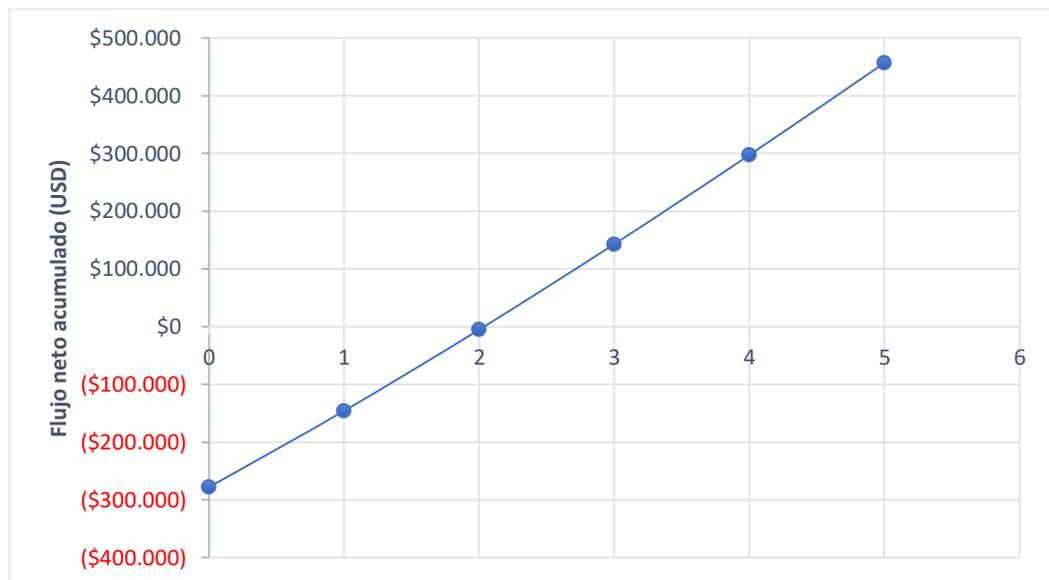
El análisis financiero del proyecto se realizó considerando una inversión inicial de \$195000 para adquirir la maquinaria necesaria para la fabricación de los paneles. Se estimó el costo de los paneles en \$17 el metro cuadrado, el cual es \$2 menor al costo usual de los paneles termoacústicos tipo sándwich en el mercado, y se proyectó a 5 años. Se incluyeron costos variables y costos fijos como la materia prima y la mano de obra. La formulación de PIRrCA15 se seleccionó debido a sus buenas propiedades mecánicas y de aislamiento acústico en comparación con otras

formulaciones. Además, se consideraron 8 trabajadores durante todo el año, sin contar fines de semana ni feriados.

**Tabla 3.3.** Resultado de análisis financiero

TIR (%)	VAN (USD)	Tiempo de retorno
25,4%	\$47.709,11	3 años y 4 meses

Según la tabla 3.3 y la figura 3.3, se concluye que el proyecto es altamente rentable y financieramente atractivo. La Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanza el 52,1%, superando notablemente la tasa de descuento del 15%. El Valor Actual Neto (VAN) positivo de \$297,151.80 indica que el proyecto generará un valor adicional, y el tiempo de retorno de 2 años y un mes sugiere una recuperación rápida de la inversión inicial de \$27,800. En resumen, los resultados respaldan la viabilidad económica del proyecto, mostrando su potencial financiero positivo y convirtiéndolo en una inversión favorable.



**Figura 3.4.** Flujo neto acumulado en el transcurso de 5 años

## Capítulo 4

## **4.1 Conclusiones y recomendaciones**

A continuación, se presentan las conclusiones en base a los objetivos expresados en el primer capítulo y las recomendaciones en función de lo que se puede hacer para mejorar el análisis.

### **4.1.1 Conclusiones**

- Se crearon tres biocompuestos de PIR, uno de los cuales incluía cáscara de arroz, otro estaba compuesto de PIR reciclado y el tercero combinaba ambos refuerzos. Al someter estos biocompuestos a pruebas mecánicas, acústicas y térmicas y comparar los resultados con la formulación sin refuerzos, se determinó que la composición más prometedora es la que incorpora ambos refuerzos.
- La adición de PIR reciclado al compuesto de PIR disminuye el aislamiento acústico en un 25%, mientras que la adición de cáscara de arroz aumenta la absorción acústica en un 8,7% y el compuesto con ambos refuerzos presenta mejores propiedades de aislamiento que el que sólo contiene PIR reciclado. Por lo tanto, la cascarilla de arroz compensa parte del efecto negativo del PIR reciclado sobre las propiedades acústicas.
- Al añadir cascarilla de arroz las propiedades mecánicas son inferiores a las del compuesto con PIR reciclado, mostrando incluso un comportamiento de espuma flexible en lugar del comportamiento común de una espuma rígida debido a la absorción de humedad de la cáscara antes de preparar el compuesto.
- La cascarilla de arroz no influye significativamente en la inflamabilidad del material, sin embargo, si mejora su estabilidad térmica e incrementa su temperatura de degradación.
- La combinación de ambos refuerzos no solo reduce la dependencia de materiales importados, sino que también posibilita la obtención de un costo del producto notablemente competitivo. Esta estrategia se traduce en una inversión favorable que establece una sólida viabilidad económica para el proyecto.

#### **4.1.2 Recomendaciones**

- Se sugiere realizar el secado de la cascarilla de arroz antes de su utilización con el fin de prevenir posibles alteraciones en las propiedades del producto final. Este procedimiento garantizará la eliminación de la humedad, asegurando así la calidad y consistencia deseadas en el resultado final.
- Optar por un tamaño de partícula reducido para el PIR reciclado facilitará su incorporación al isocianurato, minimizando el espacio que ocupa en el recipiente.
- Utilizar un tamaño de partícula menor para la cascarilla de arroz podría mejorar la resistencia mecánica del compuesto.
- Realizar un ensayo de conductividad térmica para evaluar de manera precisa la influencia de la cascarilla de arroz y el PIR reciclado en la conductividad térmica del producto final.
- Utilizar moldes de medidas superiores a las medidas de las probetas para poder realizar los cortes y utilizar la parte del núcleo de la muestra ya que, al expandirse, la espuma no se expande uniformemente.
- Realizar un análisis de la microestructura del compuesto con PIR reciclado y compararla con el que no tiene ningún refuerzo para determinar cómo afecta el PIR en la microestructura y poder relacionarlo con las propiedades obtenidas.

## Referencias

- [1] C. Alfredo Cedeño-Palacios III, U. I. Eduardo Alcívar-Cedeño, and G. I. Alejandra Zambrano-Zambrano, “Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa,” vol. 6, pp. 415–437, 2021, doi: 10.23857/pc.v6i4.2572.
- [2] A. Prada and C. E. Cortés, “Thermal decomposition of rice husk: an alternative integral use,” vol. 14, no. 1, pp. 155–170, 2010.
- [3] J. Vargas, P. Alvarado, J. Vega-Baudrit, and M. Porras, “Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos,” *Revista Científica*, vol. 23, no. 1, pp. 87–102, Dec. 2013, doi: 10.54495/rev.cientifica.v23i1.115.
- [4] J. C. López Ayala, X. R. Cazorla Vinueza, G. O. Zambrano Cárdenas, and W. F. Chancusig Marcillo, “La economía circular de los desechos generados por la gramínea de arroz frente al efecto ambiental,” *Polo del conocimiento*, vol. 6, 2021, doi: 10.23857/pc.v6i3.2411.
- [5] D. A. Ladino Manjarrés and H. Bastidas López, “Componentes naturales para el control de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporoides*) en guanabana (*Annona muricata* L.),” *Sistemas de producción agroecológicos*, 2017, doi: <https://doi.org/10.22579/22484817.693>.
- [6] V. Andrés and V. Burbano, “Pontificia Universidad Católica del Ecuador Facultad de Economía”.
- [7] F. O. Cardona, A. Temático, J. E. Escalante, A. Metodológico, and U. Cuellar, “Análisis de costos para una empresa del sector metalmeccánico,” 2015.
- [8] ADIMIRA (Asociación de Industriales Metalúrgicos de la República de Argentina, “Sector metalmeccánico Guía para una producción sustentable.”
- [9] N. Johar, I. Ahmad, and A. Dufresne, “Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk,” *Ind Crops Prod*, vol. 37, no. 1, pp. 93–99, May 2012, doi: 10.1016/j.indcrop.2011.12.016.
- [10] M. J. Rosado, J. Rencoret, G. Marques, A. Gutiérrez, and J. C. del Río, “Structural Characteristics of the Guaiacyl-Rich Lignins From Rice (*Oryza sativa* L.) Husks and Straw,” *Front Plant Sci*, vol. 12, Feb. 2021, doi: 10.3389/fpls.2021.640475.
- [11] N. Marín-Calvo, S. González-Serrud, and A. James-Rivas, “Thermal insulation material produced from recycled materials for building applications: cellulose and rice husk-based material,” *Front Built Environ*, vol. 9, 2023, doi: 10.3389/fbuil.2023.1271317.

- [12] C. W. Kang, S. W. Oh, T. B. Lee, W. Kang, and J. Matsumura, "Sound absorption capability and mechanical properties of a composite rice hull and sawdust board," *Journal of Wood Science*, vol. 58, no. 3, pp. 273–278, 2012, doi: 10.1007/s10086-011-1243-5.
- [13] L. J. Vargas Arrones, "Factibilidad técnica para la producción de espuma rígida de poliuretano utilizando cascarilla de arroz como refuerzo," 2010, Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/73285>
- [14] M. Lazo *et al.*, "Mechanical and thermal properties of polyisocyanurate rigid foams reinforced with agricultural waste," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 8, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscee.2023.100392.
- [15] M. Golmohammadi, M. Barnar, and M. Barikani, "Effect of isocyanate modification of rice husk as a filler on the properties of rigid polyurethane foam," 2014.
- [16] S. Mahzan, A. M. Ahmad Zaidi, M. I. Ghazali, M. N. Yahya, and M. Ismail, "Investigation on Sound Absorption of Rice-Husk Reinforced Composite," *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology*, Jun. 2009.
- [17] I. Vitkauskiene, R. Makuška, U. Stirna, and U. Cabulis, "Thermal properties of polyurethane-polyisocyanurate foams based on poly(ethylene terephthalate) waste," *Medziagotyra*, vol. 17, no. 3, pp. 249–253, 2011, doi: 10.5755/j01.ms.17.3.588.
- [18] EPD International, "DECLARACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTO," 2019. Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: [www.environdec.com](http://www.environdec.com).
- [19] C. Henry, A. Gondaliya, M. Thies, and M. Nejad, "Studying the Suitability of Nineteen Lignins as Partial Polyol Replacement in Rigid Polyurethane/Polyisocyanurate Foam," *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 2535, vol. 27, no. 8, p. 2535, Apr. 2022, doi: 10.3390/MOLECULES27082535.
- [20] G. K. Latinwo, S. E. Agarry, B. K. Olopade, V. E. Efevbokhan, and J. O. Hamed, "Preparation and Characterization of Polyisocyanurate Modified Polyimide Foam," *American Journal of Polymer Science*, vol. 8, no. 2, pp. 23–28, 2018, doi: 10.5923/J.AJPS.20180802.01.
- [21] A. M. Borrero-López, V. Nicolas, Z. Marie, A. Celzard, and V. Fierro, "A Review of Rigid Polymeric Cellular Foams and Their Greener Tannin-Based Alternatives," *Polymers*, vol. 14, no. 19. MDPI, Oct. 01, 2022. doi: 10.3390/polym14193974.
- [22] P. Lehmann, P. Von Malotki, G. Tomasi, G. Peden, and R. Hensiek, "Polyisocyanurate rigid foam and method for the production thereof." Aug. 21, 2006. Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: <https://typeset.io/papers/polyisocyanurate-rigid-foam-and-method-for-the-production-1mjyno0aw0>

- [23] D.-R. Tăma, stăma, s-Gavrea *et al.*, “A Novel Acoustic Sandwich Panel Based on Sheep Wool”, doi: 10.3390/coatings10020148.
- [24] Y. C. Wang and A. Foster, “Experimental and numerical study of temperature developments in PIR core sandwich panels with joint,” 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.03.003.
- [25] Y. C. Wang and A. Foster, “Experimental and numerical study of temperature developments in PIR core sandwich panels with joint,” *Fire Saf J*, vol. 90, pp. 1–14, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.03.003.
- [26] “Continuous line for the manufacturing of wall and roofing sandwich panels with the PUR, PIR filler.” Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: <https://profholod.com/manufacture/line/>
- [27] “Sandwich Panel Production Technologies - Metal Construction News.” Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.metalconstructionnews.com/articles/sandwich-panel-production-technologies/>
- [28] “PU-PIR Sandwich Panel Production Line Discontinuous Panel Production Line Polyurethane Foam Machine Trapezoidal Sheet Roof Forming Machine Metal Tile Roof Roof Forming Machine Cut to Length Line / Slitting Line Flexible U-C Purlin Machine”, Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: [www.polyurethanefoammachine.com](http://www.polyurethanefoammachine.com)
- [29] F. A. S. Hansted, D. Z. Mantegazini, T. M. Ribeiro, C. E. C. Gonçalves, and J. A. P. Balestieri, “A mini-review on the use of waste in the production of sustainable Portland cement composites,” *Waste Management and Research*, vol. 41, no. 4. SAGE Publications Ltd, pp. 828–838, Apr. 01, 2023. doi: 10.1177/0734242X221135246.
- [30] E. Iffa, F. Tariku, and W. Y. Simpson, “Highly insulated wall systems with exterior insulation of polyisocyanurate under different facer materials: Material characterization and long-term hygrothermal performance assessment,” *Materials*, vol. 13, no. 15, pp. 1–15, Aug. 2020, doi: 10.3390/ma13153373.
- [31] J. Wang and B. Du, “Experimental studies of thermal and acoustic properties of recycled aggregate crumb rubber concrete,” *Journal of Building Engineering*, vol. 32, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101836.
- [32] “Rigid cellular plastics-Determination of compression properties Plastiques alvéolaires rigides-Détermination des caractéristiques de compression,” 2021, Accessed: Jan. 21, 2024. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/89f1920c-0c4e-4dd2-be07->
- [33] ASTM international, “Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position”.

- [34] E. Apaydın Varol and Ü. Mutlu, “TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 9, pp. 3674–3674, Apr. 2023, doi: 10.3390/EN16093674.
- [35] “Acoustics-Laboratory measurement of sound insulation of building elements-Part 2: COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT,” 2021, Accessed: Jan. 21, 2024. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/75ffc25b-c841-4f95-a6b3->
- [36] M. Kirpluks, U. Cabulis, and A. Avots, “Flammability of Bio-Based Rigid Polyurethane Foam as Sustainable Thermal Insulation Material,” in *Insulation Materials in Context of Sustainability*, InTech, 2016. doi: 10.5772/62539.
- [37] L. Cossio and R. Martínez Garcia, “Agglomerate of rice husk with polyurethane commercial adhesive,” 2020.
- [38] R. A. Arias Ortiz, J. D. Meneses Cruz, D. López Valerio, and L. Romero Castro, “Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol,” Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua UNAN-Managua, 2016.
- [39] E. Molina Salas, “Evaluación del uso de la cascarilla de arroz en la fabricación de bloques de concreto,” 2010.
- [40] A. G. Valverde, B. L. SARRIA Ingeniero Mecánico, and J. P. MONTEAGUDO Y Ingeniero Mecánico, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ,” *Scientia et Technica Año XIII*, vol. 37, 2007.
- [41] H. Wang, S. Xie, Z. Feng, K. Jing, J. Zhang, and H. Zhou, “Mechanical properties of rigid and flexible polyurethane foam in-situ foamed Nomex honeycomb,” *Compos Struct*, vol. 322, p. 117365, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.117365.
- [42] L. J. Vargas Arrones, “Factibilidad técnica para la producción de espuma rígida de poliuretano utilizando cascarilla de arroz como refuerzo,” Universidad de Costa Rica, San José, 2010.
- [43] M. K. Neilsen, W.-Y. Lu, B. T. Werner, W. M. Scherzinger, and C. S. Lo, “Flexible Foam Model,” Mar. 2018, doi: 10.2172/1426546.
- [44] J. Cataño, K. Guzman, and M. Perpiñan, “Efecto de la incorporación de cascarilla de arroz sobre las propiedades mecánicas de concretos y bloques de suelo cemento. Una Revisión Sistemática,” 2021.

## Anexos

### Anexo A

**Tabla A1.** Ponderación de residuos en función de su disponibilidad.

Disponibilidad	Cascarilla de arroz	Raquis de banano	Cuesco de palma aceitera		Ponderación
Cascarilla de arroz		1	1	3	0,50
Raquis de banano	0		1	2	0,33
Cuesco de palma aceitera	0	0		1	0,17
				6	1,00

**Tabla A2.** Ponderación de residuos en función de su resistencia térmica.

Resistencia térmica	Cascarilla de arroz	Raquis de banano	Cuesco de palma aceitera		Ponderación
Cascarilla de arroz		0	0	1	0,17
Raquis de banano	1		0	2	0,33
Cuesco de palma aceitera	1	1		3	0,50
				6	1,00

**Tabla A3.** Ponderación de residuos en función de su resistencia mecánica.

Resistencia mecánica	Cascarilla de arroz	Raquis de banano	Cuesco de palma aceitera		Ponderación
Cascarilla de arroz		1	1	3	0,50
Raquis de banano	0		0	1	0,17
Cuesco de palma aceitera	0	1		2	0,33
				6	1,00

**Tabla A4.** Ponderación de residuos en función de su costo.

Costo	Cascarilla de arroz	Raquis de banano	Cuesco de palma aceitera		Ponderación
Cascarilla de arroz		1	1	3	0,50
Raquis de banano	0		1	2	0,33
Cuesco de palma aceitera	0	0		1	0,17
				6	1,00

Anexo B

**Tabla B1.** Datos de ensayo de aislamiento acústico

Fuente de ruido	Número de repeticiones	Exposición al ruido	Frecuencia del sonómetro	RTMS (s)	LMAX (dB)	LMIN (dB)	TAKM (dB)
<b>Sonido ambiental</b>	1	Directa o sin impedimento	1000 Hz	1:01:00	55,2	41,1	53,3
	2		1000 Hz	1:00:00	56,8	43,2	55,2
	3		1000 Hz	1:00:00	53,8	40,5	50,2
<b>Generación de tonos a través de aplicación móvil</b>	1	Directa o sin impedimento	1000 Hz	1:01:00	81,5	71,3	80,8
	2		1000 Hz	1:00:00	80,3	70,5	81,4
	3		1000 Hz	1:00:00	82,6	72,1	80,2
	1	C/ impedimento pared Cascarilla	1000 Hz	1:00:00	82,2	72,9	76,6
	2		1000 Hz	1:00:00	73	69,6	72,4
	3		1000 Hz	1:00:00	80,1	71,4	74,2
	1	C/impedimento pared PIR	1000 Hz	1:00:00	82,2	72,6	79,3
	2		1000 Hz	1:00:00	74,9	70,4	73
	3		1000 Hz	1:00:00	78,2	73,2	76,6
	1	C/impedimento pared RPIR	1000 Hz	1:06:00	79,5	73,1	77,4
	2		1000 Hz	1:00:00	81,1	74,9	78,9
	3		1000 Hz	1:00:00	79,3	75,4	77,5
	1	C/impedimento pared RPIR y cascarilla	1000 Hz	1:00:00	81,8	69,8	78,5
	2		1000 Hz	1:00:00	82	75	78,6
	3		1000 Hz	1:00:00	80,4	73,6	77,8

## Anexo C

### Cálculo del esfuerzo de fluencia

Es conocido que el esfuerzo es igual a fuerza sobre área, considerando que el área de las muestras fue de 2500 mm<sup>2</sup>, se calcula el esfuerzo utilizando la carga de fluencia:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

A continuación, se muestra un cálculo de ejemplo para la muestra de PIR:

$$\sigma = \frac{0,25}{25000}$$

$$\sigma = 0,10 \text{ MPa}$$

El mismo procedimiento se realizó para las otras composiciones

Anexo D

**Tabla D1.** Flujo neto de caja para análisis financiero.

	Flujo Neto de Caja					
	0	1	2	3	4	5
<b>Inversión Inicial</b>	<b>-\$195.000</b>					
Producción (unidades)		50000	50000	50000	50000	50000
Precio venta(PVU) \$/Unid		\$17	\$18,19	\$19,46	\$20,83	\$22,28
Costo variable \$/unid		\$15,00	\$15,75	\$16,54	\$17,36	\$18,23
<b>Ingresos por Venta</b>		<b>\$850.000,00</b>	<b>\$909.500,00</b>	<b>\$973.165,00</b>	<b>\$1.041.286,55</b>	<b>\$1.114.176,61</b>
Costos Variable (-)		\$750.000	\$787.500	\$826.875	\$868.219	\$911.630
Costos Fijos (-)		\$28.800	\$30.240	\$31.752	\$33.340	\$35.007
Depreciacion (-)		\$39.000	\$39.000	\$39.000	\$39.000	\$39.000
<b>Utilidad antes Impuestos</b>		<b>\$32.200</b>	<b>\$52.760</b>	<b>\$75.538</b>	<b>\$100.728</b>	<b>\$128.540</b>
Impuestos (-)		\$8.050	\$13.190	\$18.885	\$25.182	\$32.135
<b>Utilidad neta</b>		<b>\$24.150</b>	<b>\$39.570</b>	<b>\$56.654</b>	<b>\$75.546</b>	<b>\$96.405</b>
Depreciacion (+)		\$39.000	\$39.000	\$39.000	\$39.000	\$39.000
<b>Flujo neto de caja</b>	<b>-\$195.000</b>	<b>\$63.150</b>	<b>\$78.570</b>	<b>\$95.654</b>	<b>\$114.546</b>	<b>\$135.405</b>
Flujo neto descontado	<b>-\$195.000</b>	\$54.913,04	\$59.410,21	\$62.893,73	\$65.492,13	\$67.320,34
<b>Flujo neto acummulado</b>	<b>-\$195.000</b>	<b>-\$140.086,96</b>	<b>-\$80.676,75</b>	<b>-\$17.783,02</b>	\$47.709,11	\$115.029,46

## Anexo E

### Muestras para ensayo de compresión



**Figura E1.** PIR 100%



**Figura E2.** Muestra de PIR con PIR reciclado



**Figura E3.** Muestra con cascarilla de arroz



**Figura E4.** Muestra con cascarilla de arroz y PIR