

**PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS  
MACIZOS H5 COMPUESTOS DE MATERIAL ARENA-PET MEDIANTE  
TRATAMIENTO TÉRMICO**

**LISSETH YULLIANA MUÑOZ BERMÚDEZ  
JULIAN MATEO SERRANO CÁCERES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2023**

**PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS  
MACIZOS H5 COMPUESTOS DE MATERIAL ARENA-PET MEDIANTE  
TRATAMIENTO TÉRMICO**

**LISSETH YULLIANA MUÑOZ BERMÚDEZ  
JULIAN MATEO SERRANO CÁCERES**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director**

**LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA  
MSc. En Ciencias de la información**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2023**

## **DEDICATORIA**

*A mi amada madre, Flor Esther Bermúdez, no puedo agradecerle lo suficiente por ser mi luz, por todo su amor, apoyo incondicional y comprensión, ha sido mi mayor fortaleza en este camino, y me siento infinitamente agradecida por tenerla a mi lado.*

*A mi hermana, Paula Tatiana Muñoz, gracias por ser mi mejor amiga y compañera de vida.*

*Gracias por animarme a seguir adelante incluso cuando las cosas parecían imposibles.*

*A mis hermanos Manuel Andrés y Jorge David por todo su amor y el valor que me han dado en sus vidas, siempre me han apoyado y han sido una fuente constante de motivación en mí.*

*A mi padre Jorge Muñoz González por estar siempre a mi lado cuando lo necesitaba y enseñarme la importancia de la fortaleza, la constancia y la perseverancia.*

*A mis amigos que me acompañaron en todo el proceso, gracias por cada experiencia, risas y momentos compartidos. Su apoyo ha sido invaluable para mi éxito en este camino.*

*A los profesores y a todos aquellos que aportaron positivamente a mi formación, sus consejos, enseñanzas y apoyo han sido fundamentales para mi formación profesional y personal, gracias por ser parte de mi historia.*

*A la Universidad Industrial de Santander por cada momento de felicidad y orgullo que me ha brindado en este camino.*

**Liseth Yulliana Muñoz Bermúdez**

## **DEDICATORIA**

*A mi director Luis Alberto Capacho Silva su tiempo y disposición durante el desarrollo de este proyecto de grado, sin su conocimiento y dedicación no sería posible la realización de este significativo trabajo.*

*A la Universidad Industrial de Santander por darme la oportunidad de formar parte de esta prestigiosa familia.*

*A todos los profesores que durante la carrera me brindaron su conocimiento y su experiencia, la cual es fundamental para afrontar los retos que la vida profesional exige. A la selección de fútbol por brindarme tan bonitas experiencias, permitirme conocer grandes personas y amigos, por forjar un carácter competitivo y ganador, agradezco que todo esto me acompañara por el resto de la vida.*

*A mis hijos, Julián, María Andrea y Nicolas, por ser esa fuerza que me impulsa a seguir cada día sin importar las dificultades del camino, a mis padres, Fabio y María por ese apoyo incondicional que sin importar las circunstancias me ven como yo veo a mis hijos y es ahí donde me doy cuenta de lo que serían capaz de hacer por mí.*

*A mi esposa Leydy, que siempre me brindo su apoyo, me acompañó durante los momentos más difíciles y decidió recorrer su camino junto al mío, a mis hermanos, Norman y Paula por siempre tener una voz de aliento y una cara alegre en muestra de su apoyo.*

*Finalmente, a todas las personas que siempre estuvieron presentes y aportaron positivamente en este proceso tan valioso.*

**Julián Mateo Serrano Cáceres**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	12
1. OBJETIVOS .....	14
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
2 MARCO TEÓRICO .....	15
2.1 POLIETILENO TEREFALATO (PET).....	15
2.2 LADRILLO.....	15
2.3 MATERIAL COMPUESTO .....	16
3 METODOLOGÍA .....	18
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA FINA .....	18
3.1.1. Granulometría de la arena fina. ....	19
3.1.2. Peso específico de la arena fina .....	19
4. Ensayo de peso unitario de la arena fina .....	20
5. Materia orgánica .....	21
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIETILENO DE TEREFALATO (PET).....	21
4 ELABORACIÓN DE LADRILLOS DE MATERIAL COMPUESTO.....	22
5 FASE EXPERIMENTAL .....	26
5.1 FASE 1.....	26
5.2 FASE 2.....	27
5.3 FASE 3.....	28
6 RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO .....	32
6.1 ENSAYO A COMPRESIÓN .....	32
6.2 ENSAYO A FLEXIÓN .....	33
6.3 COMPRESIÓN DE MURETES .....	35
6.4 RESISTENCIA A LA INTEMPERIE.....	40
6.5 RESISTENCIA AL FUEGO .....	41

7	OBSERVACIONES .....	43
8	CONCLUSIONES .....	43
9	RECOMENDACIONES .....	45
10	BIBLIOGRAFÍA .....	45
11	ANEXOS .....	48

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Ilustración 1. Arena fina.....	18
Ilustración 2. Ensayo de materia orgánica. ....	21
Ilustración 3. PET triturado.....	22
Ilustración 4. Material en el molde al horno.....	24
Ilustración 5. Mufla .....	24
Ilustración 6. Mezcla de material compuesto.....	25
Ilustración 7. Montaje de ladrillo en la prensa. ....	25
Ilustración 8.Resultado final del ladrillo. ....	25
Ilustración 9.Ensayo a compresión posición estampa.....	29
Ilustración 10. Ensayo a compresión en posición sogá.....	30
Ilustración 11.Montaje ensayo a flexión de ladrillos de arcilla. ....	33
Ilustración 12. Montaje ensayo a flexión de ladrillos arena - PET. ....	34
Ilustración 13.Dimensiones del murete. ....	35
Ilustración 14. Falla del murete en el ensayo de compresión de muretes.....	37
Ilustración 15. Fuerza axial vs deformación ensayo de compresión de muretes de ladrillo arena – PET. ....	38
Ilustración 16. Montaje de prueba de resistencia a la intemperie.....	40
Ilustración 17. Montaje de prueba de resistencia al fuego. ....	42
Ilustración 18. Resultados de prueba contra fuego. ....	42
Ilustración 19. Murete luego de un ensayo contra fuego.....	43

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resultados granulometría de la arena fina.....	19
Tabla 2. Peso específico de la arena fina. ....	20
Tabla 3. Peso unitario, porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos.....	20
Tabla 4. Resultados del ensayo a compresión posición estampa fase 1. ....	26
Tabla 5. Resultados del ensayo a compresión posición estampa fase 2. ....	27
Tabla 6. Resultados del ensayo a compresión método 3 en posición estampa. ....	28
Tabla 7. Resultados del ensayo a compresión en posición sogá.....	30
Tabla 8. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural (NTC 4205). .....	31
Tabla 9. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural (NTC 4205). .....	31
Tabla 10. Resultados del ensayo a compresión.....	32
Tabla 11. Resultados de flexión para ladrillo de arcilla convencional y ladrillo compuesto arena-PET.....	34
Tabla 12. Dimensiones de ancho, espesor y altura de los muretes a ensayar. ....	36
Tabla 13. Dimensiones promedio de los muretes a ensayar.....	36
Tabla 14. Resultados de compresión de muretes. ....	38
Tabla 15. Factor de corrección altura contra espesor para la resistencia a la compresión de muretes de mampostería.....	39
Tabla 16. Resultados de compresión de muretes corregidos por el factor de corrección. .....	39

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Datos registrados en el ensayo de resistencia al fuego.....	46

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS MACIZOS H5 COMPUESTOS DE MATERIAL ARENA-PET MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO\*

**AUTOR:** LISSETH YULLIANA MUÑOZ BERMÚDEZ; JULIAN MATEO SERRANO CÁCERES\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Arena, material compuesto, PET, reciclaje.

El PET (tereftalato de polietileno), es un polímero plástico, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección y termoformado, pero es un material no biodegradable que contamina el medio ambiente. Por este motivo, es muy importante tratarlo correctamente para que no se convierta en basura y acabe contaminando mucho más nuestro planeta ya que por sus características se convierte en uno de los materiales más utilizados en la fabricación de todo tipo de productos. Este proyecto de investigación busca promover la reutilización del PET y plantea la elaboración y el uso del ladrillo macizo H5 compuesto de arena - PET, siendo este un material más liviano, lo cual reduce el peso en las estructuras y busca que el ladrillo cumpla con las funciones de un ladrillo convencional como lo menciona la Norma Técnica Colombiana (NTC 4205). Con esto se obtuvo como resultado un producto ecológico, ya que incentiva a disminuir la contaminación generada por el mal manejo del PET, dado que gracias a sus cualidades es un material reciclable y muy resistente. En el desarrollo de la investigación se cumplió satisfactoriamente con el objetivo ya que se mejoró el procedimiento en la elaboración de los ladrillos utilizando procesos de tratamiento térmico y compactación del material compuesto, cumpliendo así con los parámetros de resistencia requeridos por la NTC en cuanto al ensayo de compresión para unidades de mampostería no estructurales obteniendo un esfuerzo de 19,2 (MPa) superando ampliamente lo indicado en la norma, una resistencia a la flexión de los ladrillos de material compuesto de 2,7 (kN) a diferencia de los ladrillos de arcilla convencionales que soportan 1,27 (kN), una resistencia a compresión de muretes de material compuesto mayor a la de los muretes de arcilla convencionales y finalmente se comprobó el buen comportamiento de los ladrillos en situaciones de incendio ya que soportaron temperaturas superiores a los 700° C durante más de 20 minutos.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva. MSc. en informática.

## ABSTRACT

**TITLE:** OPTIMIZATION PROCESSES FOR THE PRODUCTION OF SOLID H5 BRICKS COMPOSED OF SAND-PET MATERIAL THROUGH THERMAL TREATMENT\*

**AUTHOR:** LISSETH YULLIANA MUÑOZ BERMÚDEZ; JULIAN MATEO SERRANO CÁCERES\*\*

**KEY WORDS:** Sand, composite material, PET, recycling.

PET (polyethylene terephthalate) is a linear plastic polymer with a high degree of crystallinity and thermoplastic behavior, which makes it suitable for transformation through extrusion, injection and thermoforming processes, but it is a non-biodegradable material that pollutes the environment. For this reason, it is very important to treat it correctly so that it does not become garbage and end up contaminating our planet much more, since due to its characteristics it becomes one of the most used materials in the manufacture of all kinds of products. This research project seeks to promote the reuse of PET and proposes the development and use of the solid brick H5 composed of sand - PET, this being a lighter material, which reduces the weight in the structures and seeks that it fulfills the functions of a conventional brick as mentioned in the Colombian Technical Standard (NTC 4205). With this, an ecological product was obtained, since it encourages to reduce the contamination generated by the mishandling of PET, since thanks to its qualities it is a recyclable and very resistant material. In the development of the investigation, the objective was satisfactorily fulfilled since the procedure in the elaboration of the bricks was improved using processes of heat treatment and compaction of the composite material, thus complying with the resistance parameters required by the NTC in terms of the test. compression for non-structural masonry units obtaining a stress of 19.2 (MPa) far exceeding what is indicated in the standard, a flexural strength of composite material bricks of 2.7 (kN) unlike bricks of conventional clay that support 1.27 (kN), a compressive strength of walls of composite material greater than that of conventional clay walls and finally, the good behavior of the bricks in fire situations was verified since they withstood temperatures higher than the 700°C for more than 20 minutes.

---

\* Bachelor Thesis.

\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Luis Alberto Capacho Silva. MSc. in computing.

# 1 INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción cada día es más común la utilización de productos ecológicos en el medio ambiente. Una forma adecuada de reducir los agentes contaminantes se puede lograr encontrando un equilibrio entre los materiales de construcción más comunes utilizados durante décadas y materiales que son factores de contaminación en la sociedad. En Colombia, se estima que en las ciudades de Bogotá, Cali, Medellín y Barranquilla se producen semanalmente unas 88100 toneladas de basuras y residuos plásticos de las cuales solo es recogido el 70%, el resto queda en diferentes sitios de las ciudades, es decir, la contaminación por plástico – botellas, es una de las más significativas en la actualidad, ya que una botella plástica tarda alrededor de 700 a 1000 años en degradarse, siendo esto demasiado tiempo para recuperar los daños causados al medio ambiente. En este caso, teniendo en cuenta que los envases elaborados con tereftalato de polietileno (PET) representan una gran fuente de contaminación en el mundo, este proyecto de investigación presenta una alternativa para incentivar la reutilización del PET usándolo como ligante en la fabricación de ladrillos macizos H5 no estructurales compuestos principalmente con arena.

Se han realizado diferentes proyectos de grado en la Universidad Industrial de Santander (UIS) relacionados con el tema de investigación en los cuales se ha trabajado con diferentes tipos de suelo compuesto como: areno - limoso con PET <sup>1</sup>, areno - arcilloso con PET <sup>2</sup> y limoso con PET<sup>3</sup>, en los cuales obtuvieron en sus pruebas cilíndricas

---

<sup>1</sup> García Giselle, Herrera Angie, “Determinación de las propiedades mecánicas de un suelo mezclado areno limoso con material PET (reciclado) mediante cilindros elaborados por medio de tratamiento térmico”, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2018.

<sup>2</sup> Angarita Luis, Uribe Silvia, “Mejoramiento De Una Subrasante De Un Suelo ArenoArcilloso Empleando Tereftalato De Polietileno (PET) Triturado Mediante Tratamiento Térmico”, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2019.

<sup>3</sup> Causil Jéniffer, Quintanilla Fermín, “Mejoramiento De Subrasantes De Suelo Limoso con Plástico Reciclado (PET) mediante Tratamiento Térmico”, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2019.

resistencias de cada tipo de suelo compuesto a compresión de 3.6 , 3.03 y 1.3 (KPa) respectivamente, también se experimentó con arena fina la cual ofreció una resistencia de 9.85 (MPa) [1].<sup>4</sup>

En la elaboración del ladrillo macizo H5 compuesto de arena – PET, es esencial cumplir con la resistencia mínima a compresión. Por lo tanto, este proyecto de investigación da continuidad al trabajo previo titulado "Propuesta De Material Compuesto Suelo-PET Para La Elaboración De Ladrillos Macizos H5 Mediante Tratamiento Térmico", el cual logró obtener una resistencia máxima a la compresión de 8.88 (MPa). Dado que la Norma Técnica Colombiana (NTC 4205) establece un esfuerzo mínimo a compresión de 10 (MPa) para unidades de mampostería no estructural, el proyecto de investigación actual se enfoca en lograr cumplir con este requerimiento.

Siguiendo los lineamientos del proyecto de investigación anteriormente mencionado, se realizará la elaboración del ladrillo macizo H5 compuesto de arena - PET a través de tratamiento térmico optimizando la metodología precedente en la fabricación de los ladrillos elevando la temperatura hasta el punto en el que el PET llegue a su fluidez y de esta forma actúe como material cementante, y luego mediante equipos mecánicos lograr un mayor confinamiento del material para así lograr un producto con las dimensiones deseadas y que cumpla con los requerimientos de la norma NTC 4205. Adicionalmente se pretende encontrar la dosificación óptima de arena - PET realizando ladrillos con diferentes porcentajes de PET y arena.

---

<sup>4</sup> Ospino Amayra, Pineda Diego, "Propuesta De Material Compuesto Suelo – PET Para La Elaboración De Ladrillos Macizos H5 Mediante Tratamiento Térmico", Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2019.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Optimizar el procedimiento de la elaboración de ladrillos macizos H5 compuestos de material arena - PET mediante tratamiento térmico, cumpliendo los parámetros mínimos establecidos en la Norma Técnica Colombiana, NTC 42053 en cuanto al ensayo de la compresión.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mejorar el procedimiento de elaboración del ladrillo macizo H5 arena – PET, mediante equipos mecánicos para lograr un mayor confinamiento del material, teniendo como parámetro la resistencia a compresión.

- Validar la proporción de arena – PET en los procesos de fabricación de un ladrillo macizo H5 mediante tratamiento térmico, usando los ensayos de flexión y compresión establecidos por la Norma Técnica Colombiana, NTC 4205<sup>5</sup>.

- Caracterizar las propiedades del ladrillo arena - PET con los ensayos de resistencia al fuego y compresión de muretes, según lo establecido por la Norma Técnica Colombiana, NTC 40174<sup>6</sup> y NTC 34955<sup>7</sup> respectivamente.

---

<sup>5</sup> Norma Técnica Colombiana, NTC 4205 - Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo.

<sup>6</sup> Norma Técnica Colombiana, NTC 4017 - Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla.

<sup>7</sup> Norma Técnica Colombiana, NTC 3495 - Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

El tereftalato de polietileno (PET) por sus siglas en inglés, es un polímero plástico, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección y termoformado. Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol.

Los envases hechos con PET constituyen uno de los elementos reciclables más usados en todo el mundo, cada vez son más los productos envasados en este material gracias a sus cualidades: es extremadamente duro, resistente al desgaste, resistente a los químicos, tiene buenas propiedades dieléctricas, económico, liviano, impermeable y lo más importante reciclable; además, desde el punto de vista ambiental, el PET es la resina con mejores características para el reciclado.

En Colombia cada persona consume 24 kilos de plástico al año y solo se recicla el 20% del más de 1,4 millones de toneladas de desechos que de este material se consume. Esto ubica al país como la nación que más contribuye a la contaminación del mar Caribe con plásticos, por encima de México y Estados Unidos. Se estima que en el mundo se ha logrado reciclar el 9% del plástico que se ha producido, se ha incinerado el 12% y el 79% se encuentra en los botaderos y en el ambiente.

### **2.2 LADRILLO**

El ladrillo es el material de construcción más antiguo fabricado por el hombre. Son piezas de forma de paralelepípedo rectangular resultantes de la cocción de tierras arcillosas, que permiten levantar muros y otras estructuras. Se obtienen con arcillas seleccionadas, moldeadas con máquinas o prensas, cocidos en hornos de fábrica o de cocción

artesanales durante un periodo que oscila entre 2 y 3 días a una temperatura máxima que varía entre 800 y 1300 °C, hornos que principalmente funcionan con gas natural, carbón, y leña. Tiene propiedades que le hacen tener una excelente resistencia a la compresión. Gracias a sus dimensiones, es muy versátil y fácil de manejar en la albañilería. Puede ser considerado un elemento básico para la construcción, algo que debe utilizarse para crear la base de una estructura edilicia, que luego debe cubrirse con diversos materiales para conseguir un acabado parejo que cumpla ciertos requisitos estéticos y de higiene. Actualmente suelen construirse con arcilla combinada con silicatos hidratados de alúmina, caolín y otros minerales. Gracias a la cocción a altas temperaturas la arcilla es mucho más resistente. En la elaboración de estos ladrillos son liberados humos con monóxidos de carbono, dióxidos, hidrocarburos y partículas de origen orgánico, con efectos que podrían ser cancerígenos, además de esto trae consigo consecuencias nefastas sobre el medio ambiente, los contaminantes liberados en esta actividad, envenenan el entorno de diversas maneras, los gases y partículas toxicas contaminan el agua potable, los cultivos de alimentos, así como las zonas habitadas por las personas y en general, el aire que respiramos.

En este proyecto de investigación se realiza la elaboración de ladrillos H5 compuestos únicamente por PET y arena, alternativa que no se está replicando en ninguna parte del país y según la búsqueda bibliográfica se encontró una referencia de un artículo internacional titulado “SOIL FUSED WITH RECYCLED PLASTIC BOTTLES FOR VARIOUS GEOENGINEERING APPLICATIONS”, en el cual se reportan mezclas de suelo con material reciclado PS (Poliestireno) en diferentes aplicaciones de la ingeniería como pavimentos y estabilización de suelos, artículo que impulso la utilización de este material para la realización de este proyecto de investigación.

### **2.3 MATERIAL COMPUESTO**

En ciencia de materiales reciben el nombre de materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la

combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho su costo, como la dificultad de fabricación. Al unir arena y PET se forma un material compuesto muy resistente y económico, ya que nuestro país presenta una gran cantidad de fuentes de arena y el PET es muy fácil de adquirir debido a la gran cantidad de botellas plásticas que se desechan cada día y que se pueden reutilizar en esta propuesta.

### 3 METODOLOGÍA

En este proyecto de investigación se fabricaron ladrillos con dimensiones comerciales de 23x11x5 cm, se optimizó el proceso de fabricación de estos aumentando temperatura, compactación del material y se implementaron dosificaciones desde 80% arena y 20% de PET hasta 78% de arena y 22% de PET del volumen del ladrillo, hasta obtener resultados que cumplieran con lo requerido en la Norma Técnica Colombiana (NTC 4205).

El proceso inició con la caracterización de la arena, mediante la determinación de la granulometría, gravedad específica y peso unitario, adicionalmente se realizó el ensayo de materia orgánica puesto que es un factor que puede afectar de manera negativa la resistencia de los ladrillos compuestos por arena – PET y demás propiedades.

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA FINA

Las normas y especificaciones aplicadas para el desarrollo de la caracterización de la arena son las propuestas por la Norma Técnica Colombiana (NTC 174, NTC 237 y NTC 92) y el Instituto Nacional de Vías (INV E - 212).

La arena utilizada en este proyecto proviene de una cantera del Río Chicamocha, en Santander, la caracterización realizada y resultados obtenidos se describen a continuación:

Ilustración 1. Arena fina



Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1. Granulometría de la arena fina.

Para realizar la granulometría del material se utilizaron 1000 gramos de arena, en el que se realizó el proceso de tamizado.

Los resultados obtenidos en este ensayo granulométrico se presentan a continuación:

Tabla 1. Resultados granulometría de la arena fina.

Malla No.	Peso del suelo retenido [g]	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% que pasa la malla
N.4	10,8	1,08	1,08	98,92
8	21,3	2,13	3,21	96,79
16	61,1	6,11	9,32	90,68
30	192	19,2	28,52	71,48
50	368,5	36,85	65,37	34,63
100	278,2	27,82	93,19	6,81
200	40,6	4,06	97,25	2,75
Fondo	27,5	2,75	100	0

Fuente: elaboración propia.

- Gravas = 1,08%
- Arenas = 96,17%
- Finos = 2,75%

**SUCS** = Arena pobremente graduada.

### 3.1.2. Peso específico de la arena fina

Para determinar la gravedad específica de la arena se utilizaron 500 gramos de material que pasa el tamiz No 4 (4.75 mm). Este procedimiento fue basado mediante el método B que describe la norma INV E 128-13. Los datos registrados se presentan a continuación:

Tabla 2. Peso específico de la arena fina.

Masa del frasco + agua hasta la marca en el aire	624	gramos
Masa de la muestra en condición S.S.S en el aire	500	gramos
Masa de la muestra en el frasco y agua agregada hasta la marca en el aire	931	gramos
Masa de la muestra seca al horno	490	gramos
<b>Gravedad específica aparente S.S.S.</b>	<b>2,591</b>	

Fuente: elaboración propia.

#### 4. Ensayo de peso unitario de la arena fina

Para determinar el peso unitario de la arena se realizó el procedimiento como lo describe la norma NTC 92. Los datos registrados se presentan a continuación:

Tabla 3. Peso unitario, porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos.

Peso del medidor + vidrio	2976	gramos
Peso del medidor + vidrio + agua	5795	gramos
Volumen del medidor	2819	
Peso del medidor vacío	2553	gramos
Peso del medidor + material S.S.S. compactado	6823,33	gramos
Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6347,25	gramos
<b>Peso unitario del agregado S.S.S compactado</b>	1,51	Ka/m <sup>3</sup>
<b>Peso unitario del agregado S.S.S suelto</b>	1,35	Ka/m <sup>3</sup>
<b>% de absorción</b>		
<b>% de vacíos</b>		

Fuente: elaboración propia.

## 5. Materia orgánica

Para este ensayo se realizó el procedimiento descrito en la Norma Técnica Colombiana (NTC - 127), donde un alto contenido de materia orgánica es perjudicial para la resistencia de los ladrillos compuestos de arena - PET.

Ilustración 2. Ensayo de materia orgánica.



Fuente: Elaboración propia, en base a norma NTC 127.

Como se evidencia en la ilustración 2, la arena utilizada no contiene altos niveles de materia orgánica porque el color del agua es el de la placa orgánica No. 1, por lo tanto, es apta para la elaboración de los ladrillos, según la NTC 127.

### 3.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET)

Del proyecto de grado “PROPUESTA DE MATERIAL COMPUESTO SUELO – PET PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS MACIZOS H5 MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO”[1] se evidencio que si se trituraba a un menor tamaño el PET se lograba una mezcla más homogénea y con mejores resultados en los ensayos pero con la peculiaridad de que las partículas de PET no llegaban a su fluidez en su totalidad, sin embargo en este caso se usó el PET triturado una única vez, porque en el transcurso de este proyecto de investigación se determinó que el tamaño era indiferente puesto que por

el equipo y la temperatura que se utilizó finalmente el PET llega a la fluidez por completo, mejorando aún más el aspecto de la mezcla y con el distintivo de que las partículas de PET ya no son visibles en el resultado final del ladrillo, es decir el PET llegó a ser el material cementante en su totalidad.

El material PET reciclado se obtuvo de la empresa Replasander Ltda, la cual lo entrega triturado con un tamaño de aproximadamente 2 milímetros por partícula como se muestra en la siguiente ilustración:

Ilustración 3. PET triturado.



Fuente: Elaboración propia.

#### **4 ELABORACIÓN DE LADRILLOS DE MATERIAL COMPUESTO**

Para esta etapa del proyecto de investigación la elaboración de los ladrillos inició con la dosificación del material compuesto utilizada en el proyecto de grado inmediatamente anterior a este [1], donde se elaboraron tres ladrillos con las siguientes cantidades de material: 393.16 g de PET y 1680 g de arena fina, con la finalidad de verificar las propiedades de los ladrillos resultantes como sus dimensiones y resistencia a la compresión. Con base a los resultados obtenidos se establecería el paso a seguir en cuanto a cantidades de material a usar, temperatura y proceso de fabricación. Esta primera prueba se denominó FASE 1.

Una vez se tienen todas las herramientas, equipos y materiales necesarios como: el horno, la prensa mecánica, el molde de los ladrillos, la grasa, los guantes, las espátulas, las placas metálicas y las dosificaciones de arena y PET, se procede a seguir la siguiente metodología mejorada en la elaboración del ladrillo compuesto Arena – PET, procesos que debido a la limitante de recursos en su mayoría son netamente manuales. Metodología optimizada a la realizada en el proyecto de investigación precedente [1], como se describe a continuación:

1. Se mezclan las cantidades correspondientes de arena – PET y se llena el molde, hasta una altura la cual permita mezclar sin desperdiciar el material, el molde ha sido previamente armado y engrasado para evitar que el material se adhiera a las paredes del mismo, este proceso se realiza a temperatura ambiente.
2. Se ingresa el molde con el material compuesto al horno (MUFLA), en este punto el horno se encuentra a una temperatura la cual es suficiente para que el PET llegue a su punto de fusión rápidamente y por completo.
3. Aproximadamente cada 2 o 3 minutos se retira el molde del horno para mezclar el material, este proceso se repite hasta que se ha dispuesto la totalidad del material en el molde y la mezcla tiene un aspecto homogéneo, visualmente en la mezcla no se evidencien las partículas de PET ni tampoco zonas en las que la arena se encuentre seca o sin recubrimiento de PET, este proceso tarda aproximadamente 50 minutos en su totalidad, proceso que no se realizaba en el proyecto de grado previo y con esto se asegura la calidad del producto final.
4. Se retira el molde del horno, se distribuye el material lo mejor posible con una espátula y se le coloca la tapa al molde para confinar el material.

5. Se lleva el molde a una prensa y se aplica presión hasta que la tapa llegue a su tope (la tapa del molde tiene una contratapa que hace que este cierre hasta llegar a los 5 cm de espesor, sin importar la presión que se ejerza en ella) en el cual el ladrillo tendrá las dimensiones deseadas.
6. Se da un tiempo prudente de entre 40-60 minutos para el enfriamiento del molde y se procede finalmente a retirar el ladrillo.

Ilustración 4. Material en el molde al horno.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 5. Mufla



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 6. Mezcla de material compuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 7. Montaje de ladrillo en la prensa.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 8. Resultado final del ladrillo.



Fuente: Elaboración propia.

## 5 FASE EXPERIMENTAL

### 5.1 FASE 1

Esta fase se realizó siguiendo la metodología y dosificación de arena y PET indicada anteriormente, después de un tiempo de enfriamiento de un día se realizó el ensayo a compresión para los primeros 3 ladrillos en posición estampa, esto para corroborar la resistencia para unidades de mampostería no estructural, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 4. Resultados del ensayo a compresión posición estampa fase 1.

No.	Dimensiones (cm)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)
1	23x11x4,3	70,3	7,10
2	23x11x4,1	74	7,84
3	23x11x4,2	108,7	11,25

Fuente: Elaboración propia.

Los esfuerzos se calcularon con la fuerza obtenida en la máquina de compresión de elementos estructurales, que se encontraba a una velocidad de 0,011 mm/s sobre el área en de aplicación de la fuerza a compresión que era de 23x5 cm, así:

$$\sigma_{prom} = \frac{(84,33 * 10^3) N}{(230 * 42) mm^2} = 8,73 (MPa)$$

Teniendo en cuenta los resultados se puede evidenciar que la resistencia a la compresión promedio es de 8,73 (MPa), la cual se encuentra por debajo de la resistencia mínima requerida en la Norma Técnica Colombiana NTC-4205 que es de 10 (MPa).

Los datos obtenidos muestran que la resistencia es prácticamente la misma a la conseguida en el proyecto de grado mencionado anteriormente [1] pero las dimensiones del ladrillo compuesto disminuyeron, su espesor en promedio fue de 4.2 cm, esto se debe

a la diferencia en el proceso de elaboración, en este proyecto se utilizó un horno (mufla) que alcanza una temperatura constante y mayor, adicionalmente se mezcló en repetidas ocasiones el material, con ello se evidenció que la cantidad de PET usada no era suficiente para lograr una mezcla homogénea ya que no se lograba un recubrimiento total en la arena, finalmente también faltó agregar una mayor cantidad de arena para lograr las dimensiones requeridas por la norma de 23x11x5 cm.

## 5.2 FASE 2

En esta fase se pasó de 393,16 g a 550 g de PET debido a que, en la práctica, luego de utilizar diferentes dosificaciones se evidenció que con esta cantidad de PET se lograba un recubrimiento total y uniforme de la arena, adicionalmente se usaron 1800 g de arena para verificar si con esta cantidad de material se lograban los 5 cm de espesor,

Tabla 5. Resultados del ensayo a compresión posición estampa fase 2.

No.	Dimensiones (cm)	Carga [kN]	Esfuerzo [MPa]
1	23x11x4,7	164,3	15,19
2	23x11x4,8	127,1	11,51
3	23x11x4,6	190,9	18,04

Fuente: Elaboración propia.

$$\sigma_{prom} = \frac{(160,76 * 10^3) N}{(230 * 47) mm^2} = 14,9 (MPa)$$

Teniendo en cuenta estos resultados de la fase 2 del proyecto, se obtuvo una resistencia promedio de 14,9 (MPa), cumpliendo con la resistencia para unidades de mampostería no estructural requerida en la norma NTC 4205, se evidencia que con esta cantidad de PET se obtiene una mezcla más homogénea, sin embargo, las dimensiones no son las

de un ladrillo convencional, haciendo falta 3 milímetros en una de las secciones para cumplir con las dimensiones comerciales de los ladrillos macizos.

### 5.3 FASE 3

Para este último método, teniendo en cuenta el volumen faltante en la fase 2, se realizó el siguiente cálculo:

$$V_{Faltante} = 0,3 \text{ cm} * 11 \text{ cm} * 23 \text{ cm}$$

$$V_{Faltante} = 75,9 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{arena} = 1,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m_{arena} = 75,9 \text{ cm}^3 * 1,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m_{arena} = 121,44 \text{ g}$$

Se aumentará el peso de la arena en 122 g, es decir, se usaron 1922 g de arena y el peso del PET se mantendrá constante en 550 gr, resultando:

Tabla 6. Resultados del ensayo a compresión método 3 en posición estampa.

No.	Dimensiones (cm)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)
1	23x11x5	226,1	19,66
2	23x11x5	233,1	20,27
3	23x11x5	231,9	20,17

Fuente: Elaboración propia.

$$\sigma_{prom} = \frac{(230.36 * 10^3) \text{ N}}{(230 * 50) \text{ mm}^2} = 20,02 \text{ (MPa)}$$

Ilustración 9. Ensayo a compresión posición estampa.



Fuente: Elaboración propia.

De los resultados anteriores se obtiene una resistencia a la compresión promedio de 20,02 [MPa] en los ladrillos ensayados en posición estampa.

Con estas cantidades de material se obtienen las dimensiones deseadas de 23x11x5 cm del ladrillo convencional, por esta razón se realizaron otros 3 ladrillos para probar la Resistencia a compresión en posición (SOGA), esto para corroborar si los ladrillos también cumplen con la resistencia mínima para construir muros estructurales o cargueros.

Tabla 7. Resultados del ensayo a compresión en posición sogá.

No.	Dimensiones (cm)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)
1	23x11x5	396,5	15,67
2	23x11x5	444,8	17,58
3	23x11x5	363,6	14,37

Fuente: Elaboración propia.

$$\sigma_{prom} = \frac{(401.63 * 10^3) N}{(230 * 110) mm^2} = 15,87 (MPa)$$

Ilustración 10. Ensayo a compresión en posición sogá.



Fuente: Elaboración propia.

De los resultados anteriores de los ladrillos ensayados en posición sogá se obtiene una resistencia a la compresión promedio de 15,87 (MPa).

Resultados que comparamos con los presentados en la tabla 8. Propiedades de las unidades de mampostería no estructural de la norma NTC 4205 y la tabla 9. Propiedades de las unidades de mampostería estructural de la norma NTC 4205.

Tabla 8. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural (NTC 4205).

Tipo	Resistencia mínima <sup>1)</sup> a la compresión MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Prom 5 U	Unidad
PH	3,0 (30)	2,0 (20)
PV	14,0 (140)	10,0 (100)
M	14,0 (140)	10,0 (100)

Fuente: Norma Técnica Colombiana, NTC 4205.

Tabla 9. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural (NTC 4205).

Tipo	Resistencia mínima <sup>1)</sup> a la compresión MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Prom 5 U	Unidad
PH	5,0 (50)	3,5 (35)
PV	18,0 (180)	15,0 (150)
M	20,0 (200)	15,0 (150)

Fuente: Norma Técnica Colombiana, NTC 4205.

Teniendo en cuenta las tablas anteriores, y que M = unidad de mampostería maciza, se puede concluir que se cumple con la resistencia mínima a la compresión del ladrillo, ya que el promedio de resistencia del ladrillo elaborado con el material compuesto es de 20,02 (MPa) para pruebas en posición estampa y 15,87 (MPa) en sogá, el cual es superior al mínimo para unidades de mampostería no estructural que es de 10(MPa) y unidades de mampostería estructural 15(MPa) respectivamente.

## 6 RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

### 6.1 ENSAYO A COMPRESIÓN

Una vez determinada las cantidades necesarias para la correcta elaboración del ladrillo compuesto de Arena - PET y logrando la resistencia requerida en la Norma Técnica Colombiana (NTC - 4205), se procede a validar los resultados realizando 10 nuevos ensayos, los resultados se muestran a continuación:

Tabla 10. Resultados del ensayo a compresión.

No.	Posición	Carga [kN]	Esfuerzo [MPa]
1	Estampa	209,2	18,19
2	Estampa	167,1	14,53
3	Estampa	258,7	22,50
4	Estampa	206,2	17,93
5	Estampa	231,4	20,12
6	Estampa	252	21,91
7	Soga	388,7	15,36
8	Soga	379,2	14,99
9	Soga	430,5	17,02
10	Soga	412,8	16,32

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 10, los resultados cumplen satisfactoriamente con la (NTC - 4205), obteniendo una resistencia promedio de 19,2 (MPa) para unidades de mampostería no estructurales, pero para las unidades en posición soga, es decir, de mampostería estructural se obtuvo un promedio de 15,92 (MPa) y comparándolos con la tabla 9. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural, no se cumple con la resistencia mínima para un promedio de 5 unidades.

## 6.2 ENSAYO A FLEXIÓN

El ensayo a flexión se realiza para determinar las propiedades mecánicas de los ladrillos, como por ejemplo su resistencia a la tracción, para el ensayo de flexión se siguió la metodología planteada en la norma NTC 4017, numeral 6 [14], donde se debe aplicar una carga a flexión en el ladrillo hasta lograr que falle. Se ensayaron 6 unidades, 3 ladrillos compuestos de arena - PET y 3 ladrillos convencionales de arcilla, a continuación, se muestra el montaje del ensayo y los resultados obtenidos:

Ilustración 11. Montaje ensayo a flexión de ladrillos de arcilla.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 12. Montaje ensayo a flexión de ladrillos arena - PET.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Resultados de flexión para ladrillo de arcilla convencional y ladrillo compuesto arena-PET.

No.	Arcilla Carga (kN)	Arena-PET Carga (kN)
1	1.55	2.25
2	1.02	3.25
3	1.25	2.60

Fuente: Elaboración propia.

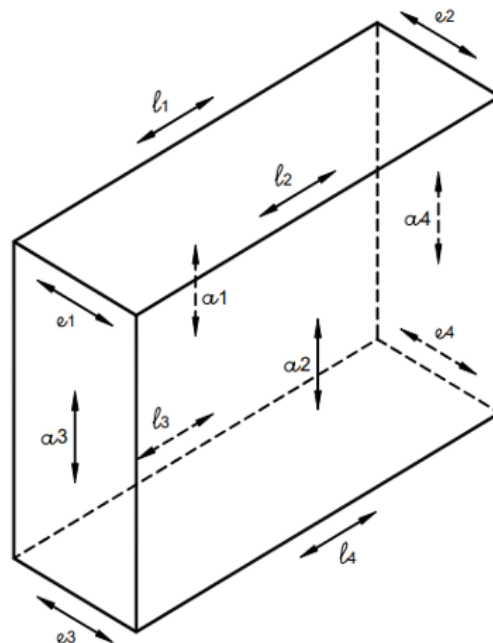
Se realizó una comparación con el resultado de los ladrillos macizos de arcilla cocida ensayados en el laboratorio bajo las mismas condiciones que los ladrillos de material compuesto, el ladrillo convencional soporta una carga de falla promedio de 1.7 (kN) y los ladrillos compuestos una carga de falla promedio de 2.7 (kN), la fractura de las unidades de arcilla y material compuesto fue por tracción esta evidenciada en los ensayos realizados.

Con los resultados obtenidos se puede observar que los ladrillos de material compuesto resisten una mayor carga a flexión que los ladrillos convencionales.

### 6.3 COMPRESIÓN DE MURETES

Este ensayo se basó en los lineamientos de la (NTC - 3495), numeral 8 [15], donde se describe la correcta preparación para el ensayo, en el cual para calcular las dimensiones de cada murete se tomaron las medidas como se indica en la siguiente imagen.

Ilustración 13. Dimensiones del murete.



Fuente: Norma técnica Colombiana NTC 3495.

Tabla 12. Dimensiones de ancho, espesor y altura de los muretes a ensayar.

<b>Murete</b>	<b>1(AP)</b>	<b>2 (AP)</b>	<b>3 (AR)</b>
<b>medición [cm]</b>			
L1	48,9	48,5	49,6
L2	48,8	48,4	48,9
L3	48,0	48,0	49,9
L4	48,0	48,0	51,1
e1	11,3	11,1	11,0
e2	11,2	11,1	11,0
e3	11,2	11,0	10,9
e4	11,1	11,2	11,0
a1	45,5	45,3	50,2
a2	45,4	45,5	50,4
a3	45,3	45,0	50,4
a4	45,6	45,3	50,3

AR= Murete de arcilla.

AP = Murete Arena -PET

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Dimensiones promedio de los muretes a ensayar.

<b>Murete</b>	<b>1(AP)</b>	<b>2 (AP)</b>	<b>3(AR)</b>
<b>medición [cm]</b>			
L promedio	48,4	48,2	49,9
e promedio	11,2	11,1	11,0
a promedio	45,5	45,3	50,3

AR= Murete de arcilla.

AP = Murete Arena -PET

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un diseño de mezcla de 21 (MPa) del mortero de pega a utilizar en el montaje del murete para que al realizar el ensayo de compresión de muretes este fallara por los ladrillos y no correr el riesgo que fallara el mortero y no tener resultados claros, la falla obtenida se puede evidenciar en la siguiente imagen:

Ilustración 14. Falla del murete en el ensayo de compresión de muretes.



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un ensayo a cortante para determinar la resistencia a la compresión de los ladrillos y, por ende, la calidad y seguridad del muro en cuestión. Este ensayo permite determinar la cantidad de carga que un muro de ladrillo puede soportar antes de colapsar, lo que es importante para garantizar la seguridad de las estructuras en las que se utilizarán.

El cálculo del esfuerzo o resistencia a la compresión se realizó dividiendo la fuerza de falla en el área de aplicación del murete como lo indica la norma NTC 3495 como se muestra a continuación:

$$\sigma = \frac{(92 * 10^3) N}{(484 * 111,20) mm^2} = 1,71 [MPa]$$

Teniendo en cuenta esto, a continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 14. Resultados de compresión de muretes.

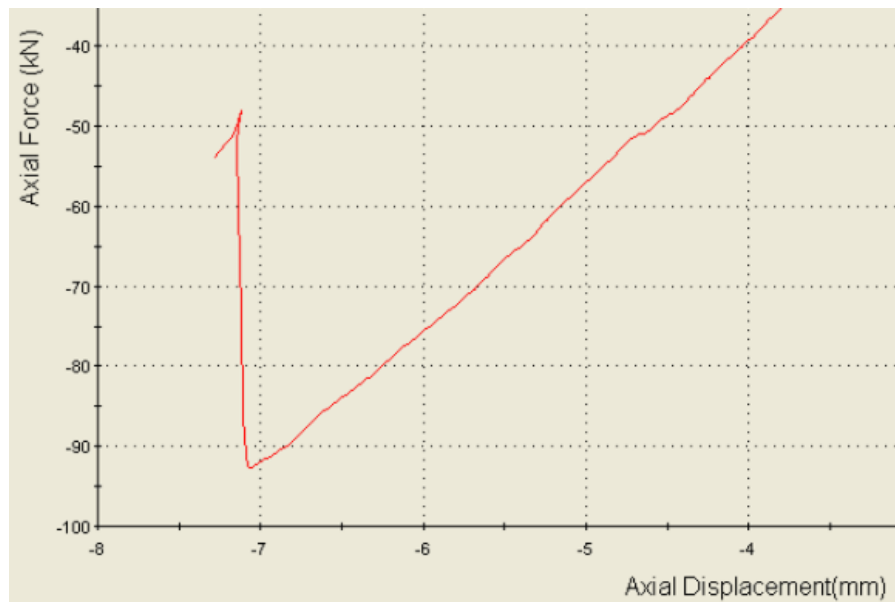
Muestra	Fuerza [kN]	Esfuerzo [MPa]
1	92	1,71
2	89	1,66
3 (AR)	23	0,42

AR= Murete de arcilla.

AP = Murete Arena -PET.

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 15. Fuerza axial vs deformación ensayo de compresión de muretes de ladrillo arena – PET.



Fuente: Máquina de prueba universal (MTS) UIS.

Se calculó el factor de corrección, el cual depende de la relación  $a_m / e_m$  de cada murete usando la altura y la dimensión transversal menor (espesor) del murete, este factor afecta la resistencia a la compresión de los muretes, a continuación, se muestra un cálculo ejemplo y los resultados obtenidos:

$$\frac{a_m}{e_m} = \frac{45.5 \text{ cm}}{11.2 \text{ cm}} = 4.06$$

Con esta relación se interpola el factor de corrección en la tabla 16 presentada en la norma NTC 3495.

Tabla 15. Factor de corrección altura contra espesor para la resistencia a la compresión de muretes de mampostería.

$a_m/e_m^A$	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Factor de corrección	0,75	0,86	1,00	1,04	1,07	1,15	1,22

Fuente: Norma Técnica Colombiana. NTC 3495.

$$\text{Factor de corrección} = 1,1542$$

$$\text{Esfuerzo} = 1,71 * 1,1542$$

$$\text{Esfuerzo} = 1,97 \text{ [MPa]}$$

Tabla 16. Resultados de compresión de muretes corregidos por el factor de corrección.

Muestra	$a_m/e_m$	Factor	Esfuerzo [MPa]
1	4,06	1,154	1,97
2	4,08	1,155	1,92
3 (AR)	4,57	1,189	0,498

Fuente: Elaboración propia.

Promediando los resultados anteriores podemos determinar la resistencia a la compresión de la mampostería  $f'_m = 1,945$  (MPa). El valor de  $f'_m$  determinado para los ladrillos de material compuesto se comparó con el obtenido para un murete de ladrillo convencional (arcilla cocida) que se fabricó y se ensayó en el laboratorio bajo las mismas condiciones que los muretes de material compuesto, para el murete de ladrillo convencional se obtuvo  $f'_m = 0,498$  (MPa).

De lo anterior se puede concluir que el ladrillo de material compuesto tiene un  $f'_m$  mayor que el de arcilla cocida (convencional), por lo tanto, los ladrillos de material compuesto al trabajar como muro resisten más que los de arcilla cocida.

#### 6.4 RESISTENCIA A LA INTEMPERIE

Para el ensayo a la resistencia a la intemperie la cual evalúa cómo el ladrillo se descompone o se degrada después de un período de tiempo determinado, se dejó el ladrillo expuesto en un periodo de 3 meses, la prueba se realizó desde el 22 de agosto hasta el 13 de diciembre de 2022, se registró el peso inicial de este, el cual fue de 2511 gramos, a continuación, se muestra el montaje realizado:

Ilustración 16. Montaje de prueba de resistencia a la intemperie.



Fuente: Elaboración propia.

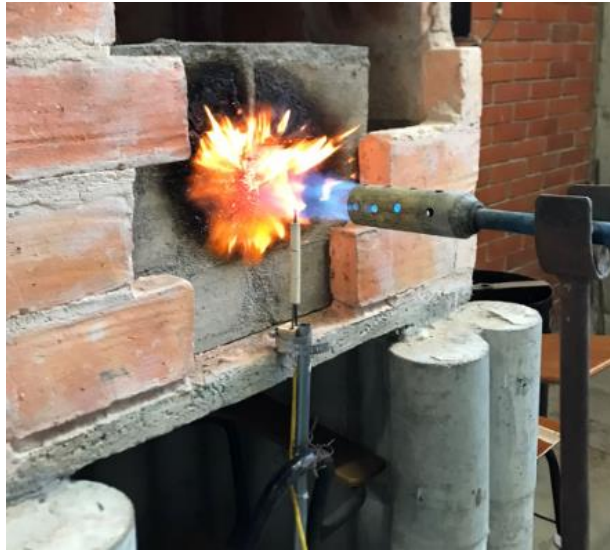
Luego de los 3 meses de dejar el ladrillo expuesto en el último piso del edificio Álvaro Beltrán, se volvió a realizar el pesaje del ladrillo, el cual dio un peso de **2524 gr**, esta prueba a la resistencia a la intemperie se realiza para evaluar la capacidad para resistir los efectos adversos del clima y el medio ambiente, como la lluvia, el viento y la exposición al sol, en nuestro caso se observó que el ladrillo no sufrió ningún daño o desgaste durante el tiempo que estuvo expuesto.

Se realizó la prueba a compresión en este ladrillo en posición soga (para unidades de mampostería estructurales) obteniendo una resistencia de 401,3 [KN] es decir de 15,86 [MPa] cumpliendo con la resistencia mínima solicitada en la norma NTC 4205 para unidades estructurales, los resultados de esta prueba son importantes ya que permite demostrar la calidad y la durabilidad de nuestros ladrillos; después de una larga exposición a la intemperie.

## **6.5 RESISTENCIA AL FUEGO**

Para determinar la resistencia al fuego de los elementos estructurales se realiza la prueba normalizada de incendio el cual se encuentra estipulado en la norma NTC 1480 [16], en la cual la temperatura se eleva de forma controlada, en función del tiempo y el fuego (fuego con variación de temperatura controlada con el tiempo). Para el ensayo de resistencia contra fuego se realizó un montaje utilizando un lanzallamas, un murete de ladrillo de material compuesto y dos termocuplas capaces de registrar temperaturas superiores a los 1000 °C, estas para registrar la temperatura del fuego y del ladrillo en la cara posterior al fuego, a continuación, se muestra el montaje realizado:

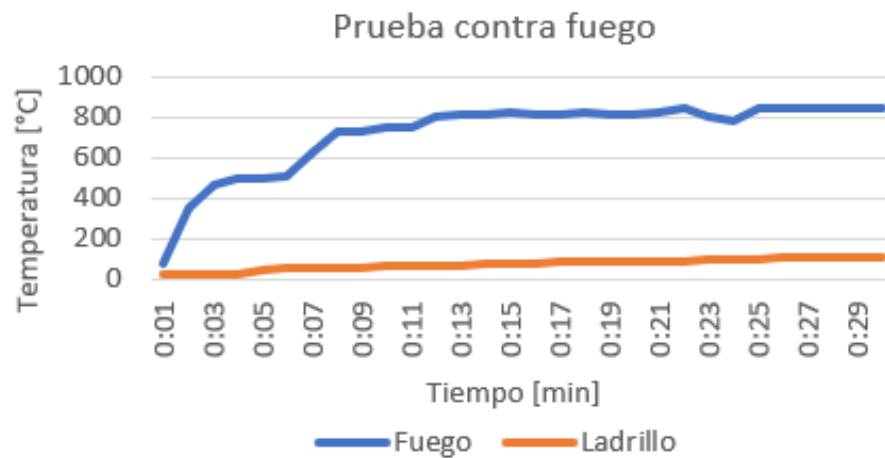
Ilustración 17. Montaje de prueba de resistencia al fuego.



Fuente: Elaboración propia.

El ensayo se realizó durante 30 minutos y se registraron datos cada minuto y se generó la siguiente gráfica de resultados:

Ilustración 18. Resultados de prueba contra fuego.



Fuente: Elaboración propia.

Según la gráfica anterior se puede decir que el ladrillo posee un alto índice de aislamiento al fuego, puesto que a los 30 min la temperatura del fuego estaba en 800°C y en la cara

posterior del ladrillo se encontraba a 114°C, se debe destacar que durante 20 min de ensayo la temperatura del fuego fue superior a los 700°C, a continuación, se muestra como quedó el murete luego de la realización del ensayo:

Ilustración 19. Murete luego de un ensayo contra fuego.



Fuente: Elaboración propia.

## **7 OBSERVACIONES**

Para la realización de los ensayos de laboratorio se utilizaron 62 ladrillos de un total de 65 ladrillos fabricados a lo largo del proyecto de investigación, 9 ladrillos en las tres primeras fases experimentales, 10 ladrillos más para corroborar la resistencia en la tercera fase del proyecto de investigación y 43 restantes para la fabricación de los muretes a ensayar en las pruebas de resistencia de muretes y resistencia al fuego respectivamente.

## **8 CONCLUSIONES**

Tal y como se comprobó en los resultados obtenidos en proyectos de investigación anteriores se validó a la arena fina como un material ideal para la fabricación de ladrillos compuestos y se halló de manera experimental que la dosificación óptima para este proceso de elaboración de ladrillos H5 compuestos de arena-PET fabricados mediante

tratamiento térmico es de 77,75% de arena y 22,25% de PET, cumpliendo con estas cantidades con la resistencia mínima a compresión requerida por la norma NTC 4205.

Como se ilustró anteriormente, los ladrillos fueron ensayados a compresión y flexión siguiendo los parámetros de la NTC 4017, el resultado promedio en el ensayo de compresión inconfiada fue de 19,2 (MPa) para unidades de mampostería divisorias o no estructurales superando ampliamente la resistencia mínima requerida por la norma NTC 4205 y una resistencia de 15,92 (MPa) para unidades de mampostería cargueros o estructurales la cual se encuentra muy cerca al mínimo requerido en la norma y no cumple para el promedio de 5 unidades. Además, el ensayo a flexión demostró que los ladrillos compuestos soportaron una carga promedio de 2,7 (kN), lo que los hace más resistentes a la flexión que los ladrillos convencionales ya que resistieron una carga a flexión de 1,27 (kN).

En base a la norma NTC 3495 se llevó a cabo el ensayo de compresión de muretes donde se obtuvo un  $f'm$  de 1,945 [MPa], el cual es superior al de los muretes fabricados con ladrillos convencionales. Por lo tanto, se puede afirmar que los ladrillos compuestos tienen un mejor comportamiento en su uso como muro.

Se llevó a cabo el ensayo contra fuego para evaluar la resistencia al fuego de los ladrillos. Los resultados fueron positivos ya que el ladrillo soportó 30 minutos de exposición al fuego, con temperaturas por encima de 700 °C durante 20 minutos. La temperatura máxima registrada en la cara posterior después de 30 minutos fue de 114 °C. Por lo tanto, se puede concluir que el ladrillo demostró un buen comportamiento ante situaciones de incendio.

La fabricación de un ladrillo con material reciclado como el plástico PET, es una forma efectiva de ayudar al medio ambiente en sobremanera ya que con el PET usado para fabricar un ladrillo equivale aproximadamente a 28 botellas de plástico de tamaño personal. Al reutilizar estas botellas en lugar de desecharlas, se reduce la cantidad de

residuos plásticos en el medio ambiente y se aprovechan los recursos al utilizarlos en la fabricación de un producto útil. De esta manera, se promueve un uso sostenible de los recursos y se ayuda a proteger el medio ambiente.

## **9 RECOMENDACIONES**

El proceso de fabricación de los ladrillos reveló que la fase de mezclado es tediosa y potencialmente peligrosa ya que se requiere la manipulación de altas temperaturas tanto en el horno como en el molde, lo que plantea riesgos para la seguridad y eficiencia del proceso. Por esta razón, se recomienda mejorar este procedimiento mediante el uso de equipos especialmente diseñados para el mezclado de este tipo de materiales, con el objetivo de aumentar la seguridad del proceso de fabricación del ladrillo.

## **10 BIBLIOGRAFÍA**

Ospino Amayra, Pineda Diego, “Propuesta De Material Compuesto Suelo – PET Para La Elaboración De Ladrillos Macizos H5 Mediante Tratamiento Térmico”, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2019.

García Giselle, Herrera Angie, “Determinación de las propiedades mecánicas de un suelo mezclado areno limoso con material PET (reciclado) mediante cilindros elaborados por medio de tratamiento térmico”, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2018.

Angarita Luis, Uribe Silvia, “Mejoramiento De Una Subrasante De Un Suelo Arenoso Arcilloso Empleando Tereftalato De Polietileno (PET) Triturado Mediante Tratamiento Térmico”, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2019.

Causil Jéniffer, Quintanilla Fermín, “Mejoramiento De Subrasantes De Suelo Limoso con Plástico Reciclado (PET) mediante Tratamiento Térmico”, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2019.

Descripción, características y propiedades del PET, disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/todo-loque-queria-saber-del-pet-2806.htm>.

El reciclaje de envases PET, disponible en: <https://sostenibilidad.semana.com/negociosverdes/articulo/plastico-pet-un-amigable-perono-inofensivo/36282>.

Artículo Nacional: “Colombia produce 1,4 millones de toneladas de plástico al año”: <https://www.portafolio.co/economia/colombiaproduce-1-4-millones-de-toneladas-de-plasticoal-ano-566367>.

Artículo internacional: “Soil Fused with Recycled Plastic Bottles for Various GeoEngineering Applications”. KHOURY N, KHOURY C and ABOUSLEIMAN Y. Universidad de California, San Diego, 2008.

Materiales compuestos: Askeland Donald R, 1984, “Ciencia e ingeniería de materiales”, CENGAGE Learning, México.

SUÁREZ Daniel. Solo 26% de las botellas plásticas se recicla. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.larepublica.co/responsabilidadsocial/solo-26-de-lasbotellas-plasticasserecicla2357536>

NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS, NTC 4205. Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2004.

NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS, NTC 127. Concretos. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2005.

NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS, NTC 4017. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2005.

NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS, NTC 3495. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2003.

NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS, NTC 1480. Elementos de construcción. Ensayo de resistencia al fuego. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 1979.

## 11 ANEXOS

### ANEXO A: Datos registrados en el ensayo de resistencia al fuego.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	
	Fuego	Ladrillo
0:01	80	25
0:02	348	26
0:03	467	26
0:04	495	27
0:05	495	50
0:06	504	52
0:07	628	55
0:08	726	58
0:09	726	60
0:10	746	65
0:11	750	66
0:12	800	70
0:13	810	68
0:14	817	75
0:15	820	80
0:16	810	81
0:17	817	83
0:18	820	85
0:19	810	86
0:20	817	88
0:21	820	90
0:22	846	92
0:23	800	95
0:24	780	99
0:25	840	102
0:26	846	105
0:27	846	109
0:28	846	110
0:29	846	112
0:30	846	114