

**PROPUESTA DE MATERIAL COMPUESTO SUELO – PET PARA LA
ELABORACIÓN DE LADRILLOS MACIZOS H5 MEDIANTE
TRATAMIENTO TERMICO**

**AMAYRA CATALINA OSPINO GÓMEZ
DIEGO ALEXANDER PINEDA OCAÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**PROPUESTA DE MATERIAL COMPUESTO SUELO – PET PARA LA
ELABORACIÓN DE LADRILLOS MACIZOS H5 MEDIANTE
TRATAMIENTO TERMICO**

**AMAYRA CATALINA OSPINO GÓMEZ
DIEGO ALEXANDER PINEDA OCAÑO**

Proyecto de grado para optar al título de ingeniero civil

**Director:
LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA
MSc. en Informática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

A mis padres por ser mi apoyo incondicional y mi ejemplo a seguir,

A mi hermano por ser mi compañero de vida y mi mentor,

A Diego y a Lufe por ser mi mejor compañía en este camino,

A toda mi familia por todo su amor,

A todos los hicieron parte de este proceso.

Amayra Catalina Ospino Gómez

*A mi padre Alexander Pineda, por el inmenso esfuerzo y sacrificio que ha hecho para que yo pueda
alcanzar este logro, por la tranquilidad que siempre me dio al saber que contaba con un apoyo
incondicional durante este proceso.*

*A mi madre Luz Helena Ocaño, por ser la persona que cree en mí más que cualquier otra, por ese gran
amor que me manifiesta y por esas palabras de aliento que siempre me hicieron perseverar.*

*A mis hermanas Yesica y Divian, por ser mi compañía y porque a pesar de las dificultades estuvieron
siempre presentes para brindarme su apoyo cuando lo necesité.*

*A Catalina Ospino por ser la mejor compañera en esta etapa, por brindarme su apoyo y por el gran
empeño que tuvo en que nuestro trabajo fuera lo mejor posible.*

Diego Alexander Pineda Ocaño

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	18
1.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
2. MARCO TEORICO	19
2.1. PLÁSTICO PET	19
2.1.1. Definición..	19
2.1.2. Propiedades del plástico PET.	20
2.1.3. Ventajas del plástico PET.	20
2.1.4. Contexto ambiental..	21
2.2. ARENA.	21
2.2.1. Componentes y características de la arena	21
2.2.2. Arena fina.....	22
2.3. MATERIAL COMPUESTO.....	22
3. FASE EXPERIMENTAL.....	23
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA FINA.....	23
3.1.1. Granulometría de la arena fina.....	23
3.1.2. Peso específico de la arena fina.	24
3.1.3. Ensayo de proctor modificado.....	25
3.2. CARACTERIZACIÓN DEL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET). ...	26
3.2.1. Granulometría del polietileno de tereftalato (PET).	26
3.2.2. Peso específico del polietileno de tereftalato (PET).....	26
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.	27

4.	ENSAYOS DE LABORATORIO AL MATERIAL COMPUESTO	28
4.1.	FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO	28
4.1.1.	Calculo del número de golpes.....	29
4.2.	ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA.....	30
5.	ELABORACIÓN DE LADRILLOS DE MATERIAL COMPUESTO	33
6.	ENSAYOS DE LABORATORIO EN LADRILLOS DE MATERIAL COMPUESTO	36
6.1.	ABSORCIÓN DE AGUA	36
6.2.	COMPRESIÓN INCONFINADA.....	37
6.3.	FLEXIÓN	38
6.4.	RESISTENCIA AL FUEGO.....	39
6.5.	ACÚSTICA.....	41
6.6.	EFLORESCENCIA	45
6.7.	COMPRESIÓN DE MURETES.....	46
7.	CONCLUSIONES	49
	BIBLIOGRAFIA.....	51
	ANEXOS.....	54

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Composición química del plástico PET.....	19
Ilustración 2 . Proceso de condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico.....	19
Ilustración 3 . Arena fina	23
Ilustración 4. Molde para fabricación de probetas.....	28
Ilustración 5. Probetas fabricadas con 30% y 40% de PET.	30
Ilustración 6. Dimensiones de ladrillo H5.	33
Ilustración 7. Montaje ensayo a flexión de ladrillos.	39
Ilustración 8. Montaje prueba contra fuego.....	40
Ilustración 9. Murete luego de ensayo contra fuego.	41
Ilustración 10. Tubo de Kunt.	42
Ilustración 11. Montaje de ensayo de eflorescencia.	45
Ilustración 12. Montaje para inspección de ladrillos en cuarto oscuro.	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría de la arena fina.	24
Tabla 2. Peso específico de la arena fina.	24
Tabla 3. Parámetros para el ensayo del proctor modificado	25
Tabla 4. Granulometría del PET.	26
Tabla 5. Peso específico del PET.	27
Tabla 6. Resultados de probetas con 30% de PET.	31
Tabla 7. Resultados con probetas de 40% de PET.	31
Tabla 8. Resultados de probetas con 30% de PET utilizando sobrecarga de 4 Kg.	32
Tabla 9. Resultados de absorción de agua del ladrillo.....	36
Tabla 10. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural. ...	36
Tabla 11. Resultados de compresión inconfiada del ladrillo.	37
Tabla 12. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural. ...	38
Tabla 13. Resultados de flexión de piezas del ladrillo	39
Tabla 14. Dimensiones de los muretes a ensayar.	46
Tabla 15. Dimensiones promedio de los muretes a ensayar.	47
Tabla 16. Resultados de compresión de muretes.....	47
Tabla 17. Factor de correlación para la resistencia a la compresión de muretes de mampostería.....	47
Tabla 18. Resultados de compresión de muretes corregidos por el factor de correlación.	48

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva de compactación.....	25
Gráfica 2. Resultados de prueba contra fuego.....	40

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Ensayos preliminares de la arena fina.	54
ANEXO B: Ensayos preliminares del polietileno de tereftalato (PET).	62
ANEXO C: Datos registrados en el ensayo de resistencia al fuego.	64
ANEXO D: Método para hallar el coeficiente de absorción de acuerdo al Ensayo de Impedancia Acústica.	66

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA DE MATERIAL COMPUESTO SUELO – PET PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS MACIZOS H5 MEDIANTE TRATAMIENTO TERMICO*

AUTORES: AMAYRA CATALINA OSPINO GÓMEZ; DIEGO ALEXANDER PINEDA OCAÑO**

PALABRAS CLAVES: Ladrillo, tratamiento térmico, PET, arena fina.

El presente documento contiene los resultados del estudio del comportamiento de un ladrillo macizo H5 elaborado con material compuesto suelo – PET mediante tratamiento térmico, proyecto que nace con la idea de reducir el impacto que tiene el PET sobre el medio ambiente al ser desechado. Con base en los resultados obtenidos en proyectos de investigación anteriores, el tipo de suelo por el cual se optó para la fabricación del ladrillo fue la arena fina y un porcentaje de PET del 30%, dichos resultados se verificaron de manera experimental tras la debida caracterización de los materiales. En el proceso de tratamiento térmico, se sometió el material compuesto a una temperatura de aproximadamente 200° C para alcanzar la fluidez del PET y que funcione posteriormente como el material cementante. Se llevaron a cabo las pruebas necesarias para evaluar el comportamiento del ladrillo en lo referente a flexión, compresión confinada, eflorescencia, y absorción, siguiendo los parámetros establecidos en la norma NTC 4017 y se determinó su coeficiente de absorción acústica acorde con la norma ASTM C384-04. Se construyeron muretes con los que se efectuaron los ensayos de resistencia al fuego y resistencia a la compresión regido por la norma NTC 3495. Se da a conocer el tratamiento de los datos recolectados en cada uno de los ensayos mencionados obteniendo un buen comportamiento del ladrillo en la mayoría de estos exceptuando el ensayo a compresión por lo cual se sugiere una verificación más rigurosa del porcentaje de PET empleado y modificaciones que mejoren el proceso de compactación.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva.

ABSTRACT

TITLE: PROPOSAL OF SOIL-PET COMPOSITE MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF H5 SOLID BRICKS BY HEAT TREATMENT*

AUTHORS: AMAYRA CATALINA OSPINO GÓMEZ; DIEGO ALEXANDER PINEDA OCAÑO**

KEYWORDS: Brick, heat treatment, PET, fine sand.

This document presents the results of the study of the behavior of a solid brick H5 made with composite soil-PET material by heat treatment, project that was born with the idea of reducing the impact that PET has on the environment when it is discarded. Based on the results obtained in previous research projects, the type of soil for which brick was chosen was fine sand and a 30% PET percentage, these results were verified experimentally after proper characterization of the materials. In the heat treatment process, the composite material was subjected to a temperature of approximately 200 ° C to achieve the fluidity of the PET and subsequently function as the cementing material. The necessary tests were carried out to evaluate the behavior of the brick in relation to bending, unconfined compression, efflorescence, and absorption, following the parameters established in NTC 4017 and its acoustic absorption coefficient was determined in accordance with ASTM C384 -04. Walls were constructed with which the fire resistance and compressive strength tests were carried out governed by the NTC 3495 standard. The treatment of the data collected in each of the mentioned tests is known, obtaining a good brick performance in the majority of these excepting the compression test, which suggests a more rigorous verification of the percentage of PET used and modifications that improve the compaction process

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva.

INTRODUCCIÓN

La construcción, además de ser indispensable para el desarrollo de la sociedad, es también uno de los principales responsables de la generación de residuos, contaminación, transformación del entorno y uso considerable de energía ¹. Estas razones no le permiten ser indiferente a la actual problemática ambiental y le otorga el deber de dar pasos hacia procesos y prácticas que estén alineados con el desarrollo sostenible. Se está desaprovechando una gran oportunidad de actuar en la eficiencia de las edificaciones desde la propia elección de los materiales para su construcción. Un ejemplo de ello es el ladrillo, fabricado fundamentalmente a partir de arcilla extraída de canteras. Se ha estimado que para fabricar un kilo de ladrillos se requiere consumir 3,56 megajulios equivalentes de energía primaria, gastar 1,89 litros de agua y emitir a la atmósfera 270 gramos de CO₂ ². Sin embargo, existen algunas variantes que reducen de forma considerable estos impactos. Es el caso del ladrillo de arcilla aligerada (compuesto por un 85% de arcilla y un 15% de paja) y de los ladrillos silico-calcáreos (con arena de sílice) ². Sustituir unos ladrillos por otros puede resultar mucho más efectivo y ecológico que otras medidas de diseño o de equipamiento de las que están extensamente documentadas en la literatura. Es por esto y motivados a aportar una alternativa para la construcción que el presente proyecto de investigación experimental plantea la posibilidad de emplear material plástico reciclado PET como ligante para la elaboración de un ladrillo macizo H5 compuesto con suelo.

Se tomará como referencia los mejores resultados de laboratorio obtenidos en las tesis de investigación cuyos títulos son: “Alternativa de uso de materiales geosintéticos elaborados con arena y plástico PET reciclado para la fabricación de elementos no estructurales en la construcción” ³, “Elaboración de un material

¹ ACEVEDO AGUDELO Harlem; VÁSQUEZ HERNÁNDEZ Alejandro y RAMÍREZ CARDONA Diego Alejandro. Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. [En línea]. 2012. Disponible en: <https://revistas.una.l.edu.co/index.php/gestion/article/view/30825/39307>

² ÁLVAREZ Clemente. Lo que contamina un ladrillo. [En línea]. 2010. Disponible en: <https://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/07/lo-que-contamina-un-ladrillo.html>

³ APONTE Angélica, SALCEDO Tania. “Alternativa de uso de materiales geosintéticos elaborados con arena y plástico PET reciclado para la fabricación de elementos no estructurales en la construcción”. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, 2019.

geosintético de un suelo areno arcilloso empleando material PET reciclado mediante tratamiento térmico”⁴ y “Determinación de las propiedades mecánicas de un suelo mezclado areno limoso con material PET (reciclado) mediante cilindros elaborados por medio de tratamiento térmico”⁵.

El polietilen tereftalato (PET o PETE), es un polímero plástico, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, el cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado. Es duro, resistente al desgaste, dimensionalmente estable, resistente a los químicos, tiene buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes, es ligero y totalmente reciclable⁶.

El PET es muy usado en envases de bebidas y textiles y los residuos de estos materiales plásticos, se convierten en un agente contaminante principalmente por el tiempo que tardan en degradarse (entre 500 y 700 años dependiendo del espesor⁷); por otro lado, el porcentaje reciclado de estos recipientes respecto a su producción es muy bajo: “durante 2015 en el país se recuperaron entre 3.000 y 3.500 toneladas de envases PET, lo que representa tan solo 26% del total”⁸. En este trabajo de investigación, el material que junto con el PET conformará el ladrillo será arena fina.

La elaboración del ladrillo compuesto se realizará mediante tratamiento térmico a una temperatura que lleve al PET a la fluidez, aproximadamente 200°C, para que funcione posteriormente como el material cementante.

⁴ URIBE Silvia, ANGARITA Luis. “Elaboración de un material geosintético de un suelo areno arcilloso empleando material PET reciclado mediante tratamiento térmico”. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2019.

⁵ 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.

⁶ SOLER Alexander, “Polietilen Tereftalato (PET)”. [En línea]. 2005. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.htm>

⁷ TRIANA Manuel. ¿Cuánto contamina una botella de plástico? [En línea]. 2018. Disponible en: <http://www.dicyt.com/noticias/cuanto-contamina-una-botella-de-plastico>

⁸ SUÁREZ Daniel. Solo 26% de las botellas plásticas se recicla. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/solo-26-de-las-botellas-plasticasserecicla-2357536>

Referente al tema de investigación, se han realizado algunos desarrollos en el ámbito internacional; los más relevantes están plasmados en el artículo “Soil Fused with Recycled Plastic Bottles for Various Geo-Engineering Applications” ¹⁰, 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; a nivel nacional se encuentra el “Bloqueplast” ¹¹ o madera plástica, la cual se obtiene de la mezcla de material reciclado con aditivos que finalmente es utilizada en la construcción de muros para viviendas livianas.

¹⁰ KHOURY N, KHOURY C and ABOUSLEIMAN Y. Soil Fused with Recycled Plastic Bottles for Various Geo-Engineering Applications. University of California, San Diego, 2008.

¹¹ SÁNCHEZ Juan A. Bloqueplast. [En línea] 2018. Disponible en: <http://www.casadeplastico.org/index.php/brickarp>

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer una dosificación de material plástico reciclado (PET) en la elaboración de un ladrillo macizo H5 compuesto con suelo mediante tratamiento térmico y determinar si cumple con los parámetros mínimos establecidos en la NTC 4205.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

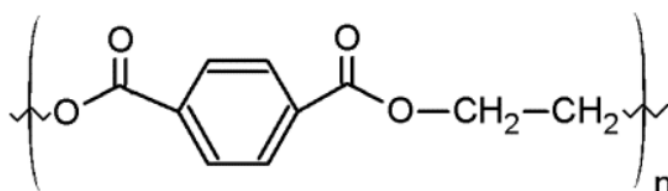
- Determinar las proporciones óptimas de material plástico reciclado como sustituyente de suelo en la composición de un ladrillo macizo compuesto H5 mediante tratamiento térmico y verificar si cumple con los parámetros establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 4205 en cuanto a compresión, flexión y absorción.
- Caracterizar mecánicamente el ladrillo geosintético mediante ensayos de eflorescencia, acústica, resistencia al fuego y resistencia a la compresión de muretes según procedimientos dados por la norma NTC 4017 y NTC 3495 respectivamente.

2. MARCO TEORICO

2.1. PLÁSTICO PET

2.1.1. Definición. El polietilen tereftalato (PET, PETE), 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, inyección-soplado y termoformado. Es extremadamente duro, resistente al desgaste, dimensionalmente estable, resistente a los químicos y tiene buenas propiedades dieléctricas.

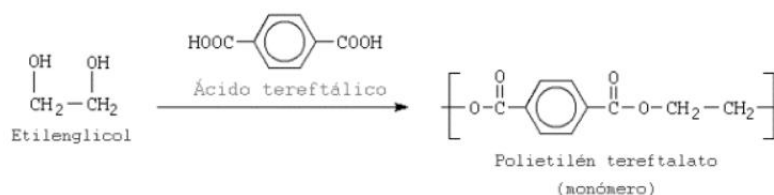
Ilustración 1. Composición química del plástico PET



El PET tiene una temperatura de transición vítrea baja (temperatura a la cual un polímero amorfo se ablanda). Esto ocasiona que los productos fabricados con dicho material no puedan calentarse por encima de dicha temperatura (por ejemplo, las botellas fabricadas con PET no pueden calentarse para su esterilización y posterior reutilización).

El PET se obtiene mediante la condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico, el cual asume el papel primario en las fibras y materiales de moldeo.

Ilustración 2 . Proceso de condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico.



2.1.2. Propiedades del plástico PET. Entre las características más importantes que presenta el PET, se encuentran:

- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes
- Cristalinidad
- Alta resistencia al desgaste
- Buena resistencia química
- Buenas propiedades térmicas
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Totalmente reciclable
- Ligero

2.1.3. Ventajas del plástico PET. Las ventajas con las que cuenta el plástico PET que son potenciales para el desarrollo de este proyecto son:

- **Baja densidad:**
Los plásticos tienen una baja densidad, lo que puede resultar óptimo para muchos de sus usos. Básicamente, porque son extremadamente ligeros.
- **Moldeable:**
Los plásticos se pueden manipular de forma sencilla. Esto permite que se usen para crear elementos muy complejos, sin gastar excesiva energía ni recursos.
- **Aislante:**
Un aspecto interesante es que los plásticos son aislantes eléctricos, la corriente no se conduce a través de ellos. A su vez, también son aislantes térmicos. No obstante, pueden dañarse si se les expone a temperaturas muy elevadas.
- **Generación de materiales compuestos:**
combina con otros materiales con el objetivo de obtener la mejor combinación de propiedades que un solo material no puede satisfacer.

2.1.4. Contexto ambiental. Su utilización masiva en todo tipo de productos y su lenta degradación. Se estima que tarda unos 180 años en descomponerse, aunque este periodo varía en función del tipo de plástico.

Perjudica el medio ambiente, ya que en su elaboración se utilizan metales pesados y sustancias irritantes que se expulsan al medio ambiente. Es por ello por lo que es necesario el reciclaje de plástico sea de PET o cualquier otro tipo.

2.2. ARENA.

La arena es un tipo de agregado fino o árido que se utiliza para fabricar hormigón, concreto y mortero; se compone de partículas de rocas trituradas que pueden ser muy pequeñas y finas o un poco más grandes dependiendo del uso para el que sea destinada.

Las partículas de arena normalmente están formadas por partículas equivalentes a los tamices N° 4 y N° 200. Una partícula individual dentro de este rango es llamada grano o clasto de arena.

2.2.1. Componentes y características de la arena. El principal componente más común de la arena es la sílice, generalmente en forma de cuarzo. Sin embargo, la composición varía de acuerdo con las características locales de las rocas del área de procedencia. En algunos lugares hay arena que contiene hierro, feldespato o incluso yeso.

Según el tipo de roca de la que procede, la arena puede variar mucho en apariencia. Por ejemplo, la arena volcánica es de color negro mientras que la arena de las playas con arrecifes de coral suele ser blanca.

Generalmente la arena tiene un origen natural: se le extrae de canteras aluviales, ríos, lagos o depósitos volcánicos, pero también se puede obtener en forma artificial mediante la trituración de rocas por medios mecánicos. Ambos métodos de

extracción de arena dan como resultado un producto limpio, compacto, durable y resistente.

2.2.2. Arena fina. La arena fina usualmente se emplea para mezclas y dan, por lo general, morteros sensibles, no requieren de mucha pasta conglomerante para rellenar huecos o mejorar su adhesión.

Los áridos naturales, de forma más o menos redondeada, dan hormigones más dóciles y de más fácil colocación que los obtenidos con piedra machacada.

En distintas mezclas se exige distintas condiciones, según el tipo de obra. Por lo regular se emplea arena fina para obtener concretos manejables, fácil de transportar y colocar, que no pierdan su homogeneidad, en sí, un concreto dócil.

La arena es fina tiene su uso más común en trabajos generales de construcción o albañilería y de mampostería.

En general, la propiedad fundamental de la Arena proviene de su capacidad para reducir las fisuras que aparecen en la mezcla al endurecerse.

2.3. MATERIAL COMPUESTO.

Este material compuesto a base de plástico PET reciclado y arena que se obtiene mediante un proceso térmico se desarrolló en la universidad de Oklahoma donde se dan a conocer las propiedades de resistencia a la compresión no confinada, dando como una nueva alternativa un material geo-sintético para la construcción.

Este material geo-sintético nos proporciona beneficios ecológicos y económicos a la sociedad, las propiedades del compuesto dependen de la presión, tipo de plástico reciclado y granulados, como revelan numerosos estudios (Schmidt. 1993).

3. FASE EXPERIMENTAL

El proceso inició con la caracterización de los materiales a utilizar, mediante la determinación de la granulometría, proctor modificado y la gravedad específica. Se caracterizaron la arena fina y el plástico PET.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA FINA.

Las normas y especificaciones aplicadas para el desarrollo de la caracterización de los materiales son las propuestas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), tales como granulometría, peso específico y ensayo de Proctor modificado.

La arena utilizada proviene de la empresa TRANSMATERIALES S.A. actualmente se abastece de la fuente minera de Cúcuta, Norte de Santander para la sustracción de los materiales tales como arena fina de río, arena gruesa y triturada.

Ilustración 3 . Arena fina



3.1.1. Granulometría de la arena fina. Para el análisis granulométrico se utilizaron 1500 gramos de material. Los resultados obtenidos en el estudio se presentan a continuación.

Tabla 1. Granulometría de la arena fina.

Malla No	Peso del suelo retenido [g]	%retenido parcial	%retenido acumulado	% que pasa la malla
N. 4	3.89	0.26	0.26	99.74
8	19.57	1.30	1.56	98.44
16	77.6	5.17	6.74	93.26
30	524.6	34.97	41.71	58.29
50	476	31.73	73.44	26.56
100	310.5	20.70	94.14	5.86
200	52.6	3.51	97.65	2.35
Fondo	35.24	2.35	100.00	0.00

- GRAVAS = 0.26%
- ARENAS = 97.39%
- FINOS = 2.35%

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). El procedimiento que se siguió 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	653.1	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	945.6	Gramos
Masa de la muestra secada al horno	469.2	Gramos
Gravedad específica de los solidos	2.410	

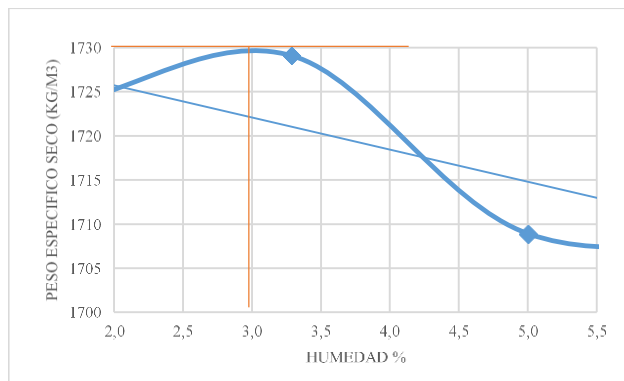
3.1.3. Ensayo de proctor modificado. El método utilizado para el ensayo fue el A, propuesto por el Instituto Nacional de Vías (INV E 142-13) para ensayos modificados de compactación. Esto debido a las especificaciones que el método indica y al ensayo de laboratorio anteriormente realizado como granulometría. El ensayo describe las dimensiones del molde, el número de capas y golpes, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3. Parámetros para el ensayo del proctor modificado

Número de Capas	5
Número de Golpes por Capa	25
Diámetro del Molde (cm)	10.16
Altura del Molde (cm)	11.5
Volumen del Molde (cm ³)	932.34

Se halló la energía de compactación la cual es aproximadamente de 2700 kN-m/m³, y teniendo en cuenta los parámetros anteriormente descritos (**Tabla 3**) se utilizó un martillo de 44.48 N (10 lbf), el cual tiene una caída libre sobre el material de 457.2 mm (18")

Gráfica 1. Curva de compactación



Densidad Seca Máxima = 1729.1 Kg/m³

Humedad Óptima = 3%

Se presentan los respectivos cálculos de los ensayos preliminares de la arena fina en el **ANEXO A**.

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL POLIETILENO DE TEREF TALATO (PET).

El material PET reciclado se obtuvo de la empresa Replasander Ltda la cual se encarga de distribuirlo triturado, luego de esto se realizó un proceso de triturado para obtener el material de un tamaño menor y de allí se obtuvieron las respectivas muestras para los ensayos de laboratorio.

3.2.1. Granulometría del polietileno de tereftalato (PET). Para el análisis granulométrico se utilizaron 500 gramos de material. Los resultados obtenidos en el estudio se presentan a continuación.

Tabla 4. Granulometría del PET.

Tamiz No	Peso del pet retenido [g]	%retenido parcial	%retenido acumulado	% que pasa la malla
4	49.9	10.0	10.0	90.0
10	382.2	76.4	86.4	13.6
20	52.7	10.5	97.0	3.0
40	9.1	1.8	98.8	1.2
fondo	6.1	1.2	100.0	0.0

De acuerdo con estos porcentajes las partículas de plástico PET poseen un tamaño que oscila entre el tamiz No. 40 (0.42 mm) y el tamiz No. 4 (4.75 mm). Se puede observar que el mayor porcentaje de plástico PET posee un tamaño de tamiz No 10 (2.00 mm).

3.2.2. Peso específico del polietileno de tereftalato (PET). Para determinar la gravedad específica del polietileno de tereftalato se utilizaron 100 gramos de material que pasa el tamiz No 4 (4.75 mm). A continuación, se presentan los datos registrados:

Tabla 5. Peso específico del PET.

Masa del frasco + agua hasta la marca en el aire	653.1	Gramos
Masa de la muestra en condición S.S.S en el aire	100	Gramos
Masa de la muestra en el frasco y agua agregada hasta la marca en el aire	677.3	Gramos
Masa de la muestra secada al horno	91.5	Gramos
Gravedad específica de los sólidos	1.316	

Se presentan los respectivos cálculos de los ensayos preliminares del plástico del polietileno de tereftalato (PET) en el **ANEXO B**

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.

El agua utilizada en el desarrollo de este proyecto proviene del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, el cual es de alta calidad por lo que no fue necesario la realización de ensayos químicos debido a que las impurezas presentes no afectarían de forma significativa los resultados.

4. ENSAYOS DE LABORATORIO AL MATERIAL COMPUESTO

Para esta fase se inició con los datos obtenidos por el proyecto de investigación “ALTERNATIVA DE USO DE MATERIALES GEOSINTETICOS ELABORADOS CON ARENA Y PLÁSTICO PET RECICLADO PARA LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES EN LA CONSTRUCCIÓN.” De las autoras Angélica Aponte y Tania Salcedo, en el cual se estableció que el material compuesto más adecuado es el elaborado con arena fina y plástico PET, con dosis optima de 30% y el restante de arena; se tomó la decisión de corroborar el dato del porcentaje de PET optimo, por lo tanto, se fabricaron probetas con 30% y 40% de PET para posteriormente ensayarlas a compresión inconfiada.

4.1. FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO

Las dimensiones de las probetas fabricadas son diámetro 5.08 (cm) y altura 10.16 (cm), se utilizaron materiales con las mismas características que en el proyecto de Angélica Aponte y Tania Salcedo, las probetas se compactaron con 5 capas cada una con 8 golpes, a continuación, se muestra el molde de fabricación y el cálculo de la cantidad de golpes.

Ilustración 4. Molde para fabricación de probetas.



4.1.1. Calculo del número de golpes. El molde utilizado para la elaboración de las probetas que se sometieron a compresión dimensionalmente es diferente al de referencia de Proctor modificado por lo que los parámetros para calcular la energía de compactación varían. Por esto se recalcularon el número de golpes requeridos para cada una de las 5 capas de cada probeta.

La energía de compactación que se obtuvo del ensayo de Proctor Modificado, utilizando el método A. es de 61.3 lbf cm/cm³, resultado para 5 capas cada una con 25 golpes, con una caída y peso de martillo respectivamente de 457.2 mm (18") y 44.48 N (10 lbf).

$$\text{Energía de Compactación} = \frac{(A)(B)(C)(D)}{(E)}$$

A: Peso del Martillo

B: Caída del martillo

C: Número de capas

D: Número de Golpes

E: Volumen del Molde de Proctor Modificado

Tomando como referencia la misma energía de compactación de Proctor Modificado, el mismo número de capas, cambiando el martillo por uno de 5.84 lbf con una caída libre de 56 cm y modificando el volumen del molde de acuerdo con las dimensiones de este, el número de golpes que se necesita por capa se calcula de la siguiente forma:

Diámetro del Molde = 5.08 cm

Altura del Molde = 10.5 cm

Número de Capas = 5

Peso del Martillo = 5.84 lbf

Caída del Martillo = 56 cm

Energía de Compactación = 61.30 lbf cm/cm³

$$V.molde = \pi * r^2 * H = \pi * 2.54^2 [cm^2] * 10.5 [cm]$$

$$V.molde = 206.17 \text{ cm}^3$$

$$61.30 \frac{\text{lbfcm}}{\text{cm}^3} = \frac{(5.84 \text{ lbf})(56 \text{ cm})(5)(D)}{(206.17 \text{ cm}^3)}$$

NÚMERO DE GOLPES POR CAPA
8

4.2. ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA

Ilustración 5. Probetas fabricadas con 30% y 40% de PET.



Se ensayaron las probetas fabricadas con 30% y 40% de PET y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 6. Resultados de probetas con 30% de PET.

30% de PET		
Probeta	Carga [KN]	Esfuerzo [MPa]
1	12.9	6.4
2	8.3	4.1
3	8	4
4	16.3	8

Tabla 7. Resultados con probetas de 40% de PET.

40% de PET		
Probeta	Carga [KN]	Esfuerzo [MPa]
1	9.2	4.5
2	7.9	4
3	5.3	2.6
4	11.6	5.7
5	6.2	3
6	12	5.9

El cálculo del esfuerzo o resistencia a la compresión inconfiada se realizó dividiendo la fuerza de falla en el área de aplicación de la probeta como se muestra a continuación:

$$Esfuerzo = \frac{12.9 * 10^3}{\frac{1}{4} * \pi * (50.8)^2} = 6.4 [MPa]$$

De acuerdo con los resultados obtenidos se pudo corroborar que los datos proporcionados por el proyecto anterior son correctos. Dado que la cantidad más adecuada de PET es 30%, puesto que se obtienen mayores resistencias a la compresión, sin embargo durante el proceso térmico se pudo observar que el material aumentaba su volumen y luego se comprimía, llenando el material de aire y posteriormente haciéndolo poroso, por lo tanto se decidió colocar una sobre carga de 4 (Kg) sobre las probetas durante el procedimiento térmico con el fin de asegurar una mayor compactación, a continuación se muestran los resultados obtenidos con este procedimiento:

Tabla 8. Resultados de probetas con 30% de PET utilizando sobrecarga de 4 Kg.

Probeta	30% de PET	
	Carga [KN]	Esfuerzo [Mpa]
1	16	7.89
2	15.8	7.8
3	23.1	11.4
4	23.4	11.5
5	21.6	10.66

De los resultados anteriores se puede evidenciar que al comprimir la muestra durante el tratamiento térmico se obtiene una mayor resistencia a la compresión, este factor se aumenta en promedio un 43% en comparación a la muestra sin comprimir.

Con base en lo anterior se decidió que para la elaboración del ladrillo se utilizaría el mismo procedimiento de utilizar una sobrecarga durante el tratamiento térmico.

5. ELABORACIÓN DE LADRILLOS DE MATERIAL COMPUESTO

Tras tomar la decisión de los materiales a emplear para la elaboración del ladrillo junto con el porcentaje de PET, el paso a seguir es el cálculo de las cantidades necesarias para fabricar un ladrillo H5 cuyas dimensiones en centímetros son 23x11x5 y volumen de 1265 cm³ de la arena.

Ilustración 6. Dimensiones de ladrillo H5.



El cálculo de las cantidades se realiza por volúmenes al tener en consideración el derretimiento del PET y lo observado durante la etapa experimental en cuanto al incremento y posterior reducción del volumen; en ese orden de ideas se midió el volumen de arena requerido para llenar el molde hasta una altura de 7 cm que acorde con las observaciones experimentales al finalizar el tratamiento térmico sería de 5 cm, esto se corroboró tras la elaboración de los ladrillos. La masa necesaria para llenar el molde hasta la altura de 7 cm medida en el laboratorio es de 2400 gramos, pero dada la proporción 30% de PET, se toma el 70% de la arena:

$$m_{arena} = 0,7 * 2400 = 1680 \text{ g}$$

Se calcula el volumen de PET necesario y la masa del mismo teniendo en cuenta que corresponde al 30% del volumen de la arena, el cual se obtiene a partir de su densidad (ver tabla 2):

$$V_{PET} = 0,3 * \frac{2400 \text{ g}}{2,41 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 298,76 \text{ cm}^3$$

Conociendo el volumen de PET se calcula la masa del mismo haciendo uso de su densidad (ver tabla 5):

$$m_{PET} = 298,76 \text{ cm}^3 * 1,316 \frac{g}{\text{cm}^3} = 393,16 \text{ g}$$

El PET se adquirió por bultos que vienen de tamaño nominal 1 pulgada y este se somete a un proceso de trituración realizado en una máquina y posterior tamizado usando el tamiz N° 4 que permite una granulometría similar a la de la arena, de esta manera se consigue una mayor uniformidad entre estos dos materiales.

La arena fina presenta un mejor comportamiento cuando se encuentra en su estado de humedad óptima, la cual a partir del ensayo de proctor modificado (ver sección 2.1.3.), es del 3% de la masa de la arena, por lo tanto:

$$m_{agua} = 0,03 * 1680 \text{ g} = 50,4 \text{ g}$$

Con las cantidades de cada uno de los materiales se hace una mezcla homogénea iniciando por mezclar el agua y la arena para llevar a esta última a su humedad óptima y luego con el PET, esta mezcla se lleva al molde del ladrillo previamente engrasado con grasa de alta resistencia a la temperatura distribuyéndose en 3 capas que son compactadas con 57 golpes con el martillo del ensayo de Proctor modificado, a continuación, se muestra el cálculo para el numero de golpes:

$$\text{Energía de compactación} = 61,3 \frac{\text{lbf} * \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

$$61,3 = \frac{45,72 * 10 * 3 * d}{1265} \rightarrow d = 57 \text{ golpes}$$

Para el tratamiento térmico el molde es llevado al horno en el cuál permanece durante un lapso entre 3 horas y 3 horas y media hasta alcanzar una temperatura promedio de 210° C junto con las placas que aplican una sobrecarga de 4 kg que, como se mencionó anteriormente tiene la finalidad de evitar el incremento en el volumen durante el tratamiento térmico y en consecuencia lograr una menor

porosidad y mayor resistencia a la compresión en el producto final. Al finalizar este tiempo se extrae el molde del horno para enfriarse a temperatura ambiente.

Durante el desarrollo del proyecto se fabricaron 62 ladrillos en total, de los cuales se emplearon 52 para la realización de los ensayos de absorción, compresión, flexión, eflorescencia, contra fuego, compresión de muretes y acústica; En el capítulo 5, se describe el procedimiento que se llevó a cabo en cada uno de estos ensayos, así como los datos medidos en el laboratorio y los resultados obtenidos mediante los cálculos pertinentes.

6. ENSAYOS DE LABORATORIO EN LADRILLOS DE MATERIAL COMPUESTO

6.1. ABSORCIÓN DE AGUA

Para el ensayo de absorción de agua se siguió la metodología planteada en la norma NTC 4017, numeral 8, donde se plantea pesar los ladrillos, posteriormente sumergirlos totalmente en agua durante 24 horas y pesarlos luego de este procedimiento, para así calcular el porcentaje de absorción de agua con los dos pesos registrados. Se evaluaron 5 especímenes completo y los resultados se muestran en la tabla 9

Tabla 9. Resultados de absorción de agua del ladrillo.

Muestra N°	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Absorción
1	2000	2121	6.05%
2	1992	2157	8.28%
3	1979	2136	7.93%
4	1952	2068	5.94%
5	2019	2151	6.54%

De los resultados anteriores se obtiene una absorción de agua promedio de 6.95%.

Estos resultados se comparan con los presentados en la tabla 10 propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural de la norma NTC 4205.

Tabla 10. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural.

Tipo	Resistencia mínima ¹⁾ a la compresión		Absorción de agua máxima en %			
	Pa (Kgf/cm ²)		Interior		Exterior	
	Prom. 5 U	Unidad	Prom. 5 U	Unidad	Prom. 5 U	Unidad
PH	3.0 (50)	2.0 (20)	17	20	13.5	14
PV	14.0 (140)	10.0 (100)	17	20	13.5	14
M	14.0 (140)	10.0 (100)	17	20	13.5	14

PH: unidad de mampostería de perforación horizontal (ladrillo y bloque)

PV: unidad de mampostería de perforación vertical (ladrillo y bloque)

M: unidad de mampostería maciza (ladrillo)

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se puede concluir que se **cumple** con el porcentaje de absorción de agua, dado que el promedio de absorción del ladrillo de material compuesto es de 6.95%, el cual es inferior al máximo permitido para mampostería interior que es de 13% y el de mampostería exterior es de 13.5%.

6.2. COMPRESIÓN INCONFINADA

Para el ensayo de compresión confinada se siguió la metodología planteada en la norma NTC 4017, numeral 7, donde se plantea aplicar una carga de compresión al ladrillo con el fin de hacerlo fallar, para posteriormente calcular la resistencia del ladrillo a la compresión. Se evaluaron 5 especímenes completos, a continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 11. Resultados de compresión confinada del ladrillo.

Muestra	Fuerza [kN]	Esfuerzo [Mpa]
1	221.2	8.74
2	229.1	9.06
3	223.4	8.83
4	222.6	8.80
5	227.3	8.98

El cálculo del esfuerzo o resistencia a la compresión confinada se realizó dividiendo la fuerza de falla en el área de aplicación del ladrillo como se muestra a continuación:

$$Esfuerzo = \frac{221.2 * 10^3}{230 * 110} = 8.74 [MPa]$$

De los resultados anteriores se obtiene una resistencia a la compresión confinada promedio de 8.88 (MPa).

Estos resultados se comparan con los presentados en la tabla 12 propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural de la norma NTC 4205.

Tabla 12. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural.

Tipo	Resistencia mínima ¹⁾ a la compresión		Absorción de agua máxima en %			
	Pa (Kgf/cm ²)		Interior		Exterior	
	Prom. 5 U	Unidad	Prom. 5 U	Unidad	Prom. 5 U	Unidad
PH	3.0 (50)	2.0 (20)	17	20	13.5	14
PV	14.0 (140)	10.0 (100)	17	20	13.5	14
M	14.0 (140)	10.0 (100)	17	20	13.5	14

Teniendo en cuenta lo establecido en la tabla anterior se puede concluir que **no se cumple** con la resistencia mínima a la compresión del ladrillo, dado que el promedio de resistencia a la compresión del ladrillo de material compuesto es de 8.88 (MPa), el cual es inferior que el mínimo para unidades de mampostería que es 10 (MPa).

Durante el proceso de compactación se observó una falta de confinamiento en el material a causa de que el área a compactar era mucho más grande que el área de compactación, además la forma del molde del ladrillo es rectangular y la del martillo de compactación es redonda, por lo tanto se hacía difícil la compactación en las esquinas, por ende se recomienda optimizar el proceso de compactación del ladrillo y la realización de más ensayos con diferentes porcentajes de plástico pet para evaluar si la compresión inconfiada cumple en algún caso.

6.3. FLEXIÓN

Para el ensayo de flexión se siguió la metodología planteada en la norma NTC 4017, numeral 6, donde se plantea aplicar una carga a flexión en el ladrillo para hacerlo fallar. Se evaluaron 5 especímenes completos, a continuación, se muestra el montaje del ensayo y los resultados obtenidos:

Ilustración 7. Montaje ensayo a flexión de ladrillos.

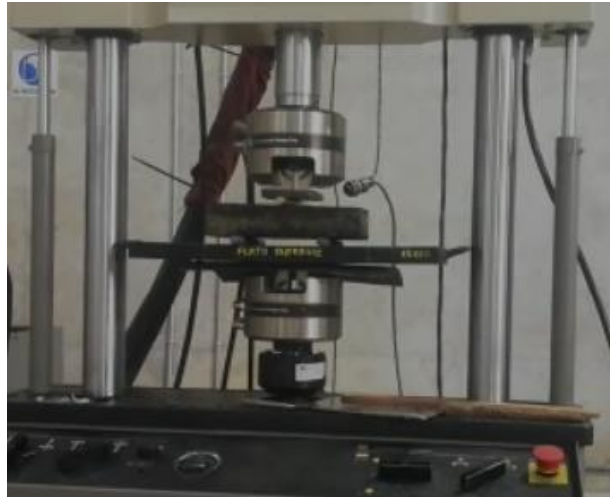


Tabla 13. Resultados de flexión de piezas del ladrillo

Muestra	Fuerza [kN]
1	1.154
2	0.48
3	1.073
4	0.486
5	0.537

De los resultados anteriores se obtiene una carga promedio de falla de 0.746 (KN).

El resultado anterior se compara con el resultado de un ladrillo macizo de arcilla cocida (convencional) ensayado en el laboratorio bajo las mismas condiciones que los ladrillos de material compuesto, el ladrillo convencional soporta una carga de falla de 1.483 (KN). Con esto se puede concluir que los ladrillos de material compuesto resisten menos carga a flexión que los ladrillos convencionales.

6.4. RESISTENCIA AL FUEGO

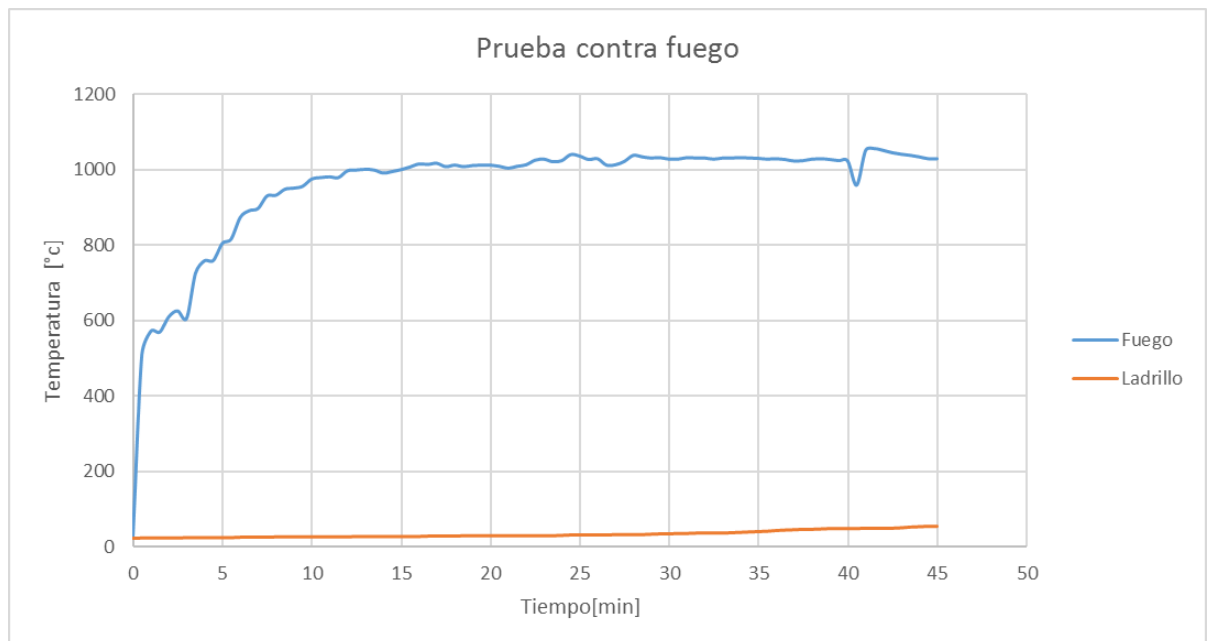
Para el ensayo contra fuego se realizó un montaje utilizando un lanzallamas, un murete de ladrillo de material compuesto y dos termocuplas para registrar la temperatura del fuego y del ladrillo en la cara posterior al fuego, a continuación, se muestra el montaje realizado:

Ilustración 8. Montaje prueba contra fuego.



El ensayo se realizó durante 45 min y se registraron datos cada 30 seg y se generó la siguiente grafica de resultados:

Gráfica 2. Resultados de prueba contra fuego.



Según la gráfica anterior se puede decir que el ladrillo posee un alto índice de aislamiento al fuego, puesto que a los 45 min la temperatura del fuego estaba en

1030°C y en la cara posterior del ladrillo se encontraba a 56°C, se debe destacar que durante 30 min de ensayo la temperatura del fuego fue superior a los 1000°C, a continuación, se muestra como quedo el murete luego de la realización del ensayo:

Ilustración 9. Murete luego de ensayo contra fuego.



En el **ANEXO C** se presentan los datos registrados durante los 45 min del ensayo.

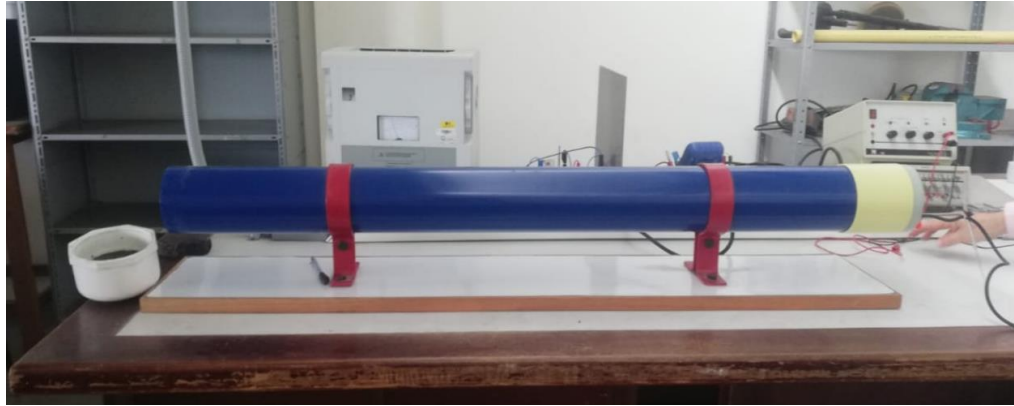
6.5. ACÚSTICA

Para el ensayo de acústica se realizó el montaje adecuado en el laboratorio haciendo uso del tubo de impedancia de Kunt como se muestra en la ilustración 10, esto con el objetivo de determinar el coeficiente de absorción acústica.

El sistema consta de un parlante ubicado en un extremo que se conecta a un generador de frecuencias y a su vez a un osciloscopio en el que se observan gráficamente las ondas producidas al interior y captadas por un micrófono móvil como se muestra la ilustración.

Se ensayaron probetas cilíndricas de 4 pulgadas de diámetro (diámetro del tubo) elaboradas con el material compuesto.

Ilustración 10. Tubo de Kunt.



Del espectro evidenciado por medio del osciloscopio se determinaron las amplitudes producidas en la onda estacionaria generada para cada posición del micrófono variando su distancia hasta la cara de la muestra haciendo uso de un flexómetro. Las frecuencias utilizadas en el ensayo fueron de 250, 500, 750 y 1000 Hz y la distancia se mudó entre 0 y 110 cm.

Se determinó la frecuencia máxima que se podría utilizar por medio de la siguiente Ecuación y la viabilidad del experimento considerando la longitud del tubo (1.2m) según lo especificado en la ASTM C384.

$$f < 0.586 * \frac{c}{d}$$

Donde:

F: frecuencia máxima

C: velocidad del sonido considerada como 343 m/s

d: diámetro del tubo.

$$f < 0,586 * \frac{343 \text{ m/s}}{0,1016 \text{ m}}$$

Se obtuvo que la frecuencia máxima que se puede utilizar es de 1978,33 Hz para la arena fina, las frecuencias mencionadas son inferiores a este valor, por lo tanto, se realizó la prueba bajo condiciones adecuadas.

La longitud mínima del tubo viene dada por la ecuación.

$$f > \frac{0.75c}{L - d}$$

Donde:

L: Longitud del tubo

$$1978,33 > \frac{0,75 * 343}{L - 0,1016}$$

Se obtuvo una longitud mínima para el tubo de 23 cm, verificando que la longitud del tubo empleado (1,2 m) es superior al mínimo.

A partir de los valores de amplitudes obtenidos en el osciloscopio se procede a calcular el coeficiente de absorción acústica a partir de la ecuación.

$$\alpha_n = \left(\frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right)^2$$

$$SWR = \frac{P_{max}}{P_{min}}$$

Donde:

SWR: Relación entre máximos y mínimos en una onda estacionaria.

α_n : Coeficiente de absorción.

Podemos definir el coeficiente de absorción de un material como la relación entre la energía absorbida y la energía incidente por unidad de superficie. Es por este motivo que, teóricamente, el coeficiente de absorción acústica de un material siempre estará entre 0 y 1 (no es posible que haya más energía absorbida que energía

incidente); un valor cercano a 1 indicará que ese material es muy absorbente y un valor cercano a 0 será muy poco absorbente.

Los cálculos correspondientes al coeficiente de absorción acústica se encuentran en el **ANEXO D** obteniendo valores muy cercanos a cero por lo cual se concluye que el material presenta una baja absorción del sonido.

6.6. EFLORESCENCIA

Para el ensayo de eflorescencia se siguió la metodología planteada en la norma NTC 4017, numeral 11, donde se plantea sumergir parcialmente un ladrillo en agua destilada durante 7 días y compararlo con uno similar sin sumergir en agua, en un cuarto oscuro con una iluminancia superior a $538.2 \text{ (lm/m}^2\text{)}$ se inspeccionan los especímenes buscando diferencias perceptibles al ojo humano. Se evaluaron 2 especímenes completos, a continuación, se muestra el montaje del ensayo:

Ilustración 11. Montaje de ensayo de eflorescencia.



Ilustración 12. Montaje para inspección de ladrillos en cuarto oscuro.



En el ensayo realizado mediante método visual se determinó que ninguno de los especímenes inspeccionados presentó indicios de eflorescencia, por lo tanto, se puede concluir que los ladrillos de material compuesto son **no eflorescentes**.

6.7. COMPRESIÓN DE MURETES

Para el ensayo de eflorescencia se siguió la metodología planteada en la norma NTC 3495, numerales 8 y 9.

En primer lugar, se tomaron las medidas de ancho, alto y espesor de cada murete de material compuesto a ensayar.

Tabla 14. Dimensiones de los muretes a ensayar.

Muestra	h1 [cm]	h2 [cm]	h3 [cm]	h4 [cm]	e1 [cm]	e2 [cm]	a1 [cm]	a2 [cm]
1	31.8	32	32	32	11.5	11	34.5	34.5
2	32	32	32	32	11	11	35	35
3	33	33	33	33	11	11.2	35	35.3

Posterior a esto se calcularon las dimensiones de ancho, alto y profundidad promedio para cada murete.

Tabla 15. Dimensiones promedio de los muretes a ensayar.

Muestra	h [cm]	e [cm]	a [cm]
1	31.95	11.125	34.5
2	32	11.05	35
3	33	11.1	35.15

En segundo lugar, se ensayó cada murete aplicándole una carga a compresión que lo hiciera fallar, a continuación, se presentan los resultados:

Tabla 16. Resultados de compresión de muretes.

Muestra	Fuerza [kN]	Esfuerzo [MPa]
1	77.7	2.15
2	83.5	2.29
3	71.1	1.93

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

$$Esfuerzo = \frac{77.7 * 10^3}{325 * 111.25} = 2.15 [MPa]$$

Se calculó el factor de correlación, el cual depende de la relación a_m/e_m de cada murete, este factor afecta la resistencia a la compresión de los muretes, a continuación se muestra un cálculo ejemplo y los resultados obtenidos:

$$\frac{a_m}{e_m} = \frac{34.5}{11.125} = 3.101$$

Con esta relación se interpola el factor de correlación en la tabla 17 presentada en la norma NTC 3495.

Tabla 17. Factor de correlación 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

$$factor\ de\ correlación = 1.078$$

$$Esfuerzo = 1.078 * 2.15 = 2.32 [Mpa]$$

Tabla 18. Resultados de compresión de muretes corregidos por el factor de correlación.

Muestra	a_m/e_m	factor	Esfuerzo [MPa]
1	3.101	1.078	2.32
2	3.167	1.083	2.48
3	3.167	1.083	2.09

Promediando los resultados anteriores podemos determinar la resistencia a la compresión de la mampostería $f'_m = 2.30$ [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 de obtuvo $f'_m = 2.01$ [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.

7. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en proyectos de investigación anteriores, se eligió la arena fina como el material más viable para la fabricación del ladrillo y se corroboró de manera experimental que la dosificación propuesta para el PET de 30% y restante de arena fina es la adecuada para obtener los mejores resultados de resistencia a compresión inconfiada.

Siguiendo los parámetros establecidos en la NTC 4017, se realizaron los ensayos de absorción, compresión inconfiada, flexión y eflorescencia. Se obtuvo un porcentaje de absorción del 6.95%, el cual es inferior al máximo permitido en la norma NTC 4205; partiendo de las características que presentó el ladrillo luego del ensayo de eflorescencia se llegó a la conclusión de que no es eflorescente. En cuanto al ensayo de resistencia a la compresión inconfiada se obtuvo un resultado promedio de 8.88 Mpa el cual es inferior a la resistencia mínima planteada por la norma NTC 4205; En el ensayo a flexión los ladrillos soportaron una carga promedio de 0.746 kN este valor se comparó con un ladrillo convencional el cual se ensayó en el laboratorio y bajo las mismas condiciones y se estableció que el ladrillo de material compuesto resiste menos fuerza que el ladrillo convencional.

En base a la norma NTC 3495 se realizó el ensayo de compresión de muretes donde se obtuvo un f_m de 2.30 Mpa, el cual es mayor que el del murete fabricado con ladrillo convencional, por lo tanto, se concluye que los ladrillos al trabajar como muro tienen un mejor comportamiento.

Guiados por la norma ASTM C384 – 04 se calcularon los coeficientes de absorción del material para 4 frecuencias diferentes dentro del rango de audición obteniendo los siguientes resultados: para frecuencia de 250 Hz el coeficiente es 0.046, para 500 Hz coeficiente 0.229, para 750 Hz coeficiente 0.139 y para 1000 Hz coeficiente de 0.025

Se realizó un ensayo contra fuego con el fin de evaluar el comportamiento del ladrillo en el caso de incendio, donde se encontraron resultados favorables puesto que se sometió durante 45 min al fuego, estando 30 min con temperaturas por encima de 1000 °C y en la cara posterior se registró una temperatura máxima de 56 °C después de 45 min, por lo tanto, el ladrillo presenta un buen comportamiento en el caso de incendio.

Durante el proceso experimental de la realización del ladrillo se observó que el procedimiento de compactación no era muy efectivo dado que el área a compactar era muy grande en comparación al área del martillo de compactación utilizado (falta de confinamiento de material), también se determinó que durante el tratamiento térmico el material se comporta de manera diferente aumentando su volumen, por lo tanto, se recomienda buscar otra alternativa para la realización de este.

Para la realización de los ensayos de laboratorio se utilizaron 52 ladrillos de un total de 62 ladrillos fabricados a lo largo de la investigación.

Para la fabricación de un ladrillo se utilizan 393.2 gramos de plástico PET, lo cual equivale a un aproximado de 20 botellas de agua de tamaño personal.

Durante el proceso de fabricación del ladrillo se observó baja eficiencia en la etapa de compactación de las capas de material puesto que el área del martillo con el que se cuenta para llevar a cabo el procedimiento no cubre un área del molde suficiente para obtener un buen confinamiento del material, es por esto que se recomienda la adquisición de un martillo cuyas dimensiones se adapten mejor a las del molde y mejorar su resistencia a la compresión.

BIBLIOGRAFIA

ACEVEDO AGUDELO Harlem; VÁSQUEZ HERNÁNDEZ Alejandro y RAMÍREZ CARDONA Diego Alejandro. Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. [En línea]. 2012. Disponible en: <https://revistas.una,l.edu.co/index.php/gestion/article/view/30825/39307>

ÁLVAREZ Clemente. Lo que contamina un ladrillo. [En línea]. 2010. Disponible en: <https://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/07/lo-que-contamina-un-ladrillo.html>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C384-04 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method1. 2016.

APONTE Angélica, SALCEDO Tania. “Alternativa de uso de materiales geosintéticos elaborados con arena y plástico PET reciclado para la fabricación de elementos no estructurales en la construcción”. 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.

KHOURY N, KHOURY C and ABOUSLEIMAN Y. Soil Fused with Recycled Plastic Bottles for Various Geo-Engineering Applications. University of California, San Diego, 2008.

NORMA SISMO RESITENTE COLOMBIANA, NRS10 Título D. Mampostería estructural. Santafé de Bogotá D.C. Asociación colombiana de ingeniería sísmica, 2010.

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 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 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.

SÁNCHEZ Juan A. Bloqueplast. [En línea] 2018. Disponible en: <http://www.casadeplastico.org/index.php/brickarp>

SOLER Alexander, "Polietilén Tereftalato (PET)". [En línea]. 2005. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.htm>

STUPENENGO Franco. Materiales y materias primas. [En línea]. 2011. Disponible en: <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>

SUÁREZ Daniel. Solo 26% de las botellas plásticas se recicla. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/solo-26-de-las-botellas-plasticasserecicla-2357536>

TRIANA Manuel. ¿Cuánto contamina una botella de plástico? [En línea]. 2018. Disponible en: <http://www.dicyt.com/noticias/cuanto-contamina-una-botella-de-plastico>

URIBE Silvia, ANGARITA Luis. “Elaboración de un material geosintético de un suelo areno arcilloso empleando material PET reciclado mediante tratamiento térmico”. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2019.

ANEXOS

ANEXO A: Ensayos preliminares de la arena fina.

NTC 237 - MÉTODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECÍFICO DE LA ARENA.

Procedimiento:

- Se midió el peso del balón aforado con agua hasta la marca.
- Se secó una muestra de material en el horno. a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. hasta alcanzar una masa constante. Seguido de ello se pesó 500 gramos de este material para la determinación de la gravedad específica.
- Por medio de un embudo se introdujeron los sólidos de arena en el balón aforado sin ningún líquido adentro.
- Se agregó agua y se agitó tratando de formar una lechada; se terminó de añadir agua hasta la marca. lavando las partículas de material que quedaron adheridas en el cuello del balón aforado.
- Se procedió a medir la masa del frasco con arena y agua hasta la marca. empleando siempre la misma balanza.
- Se extrajo la totalidad de la arena del balón aforado. y se secó en el horno a una temperatura $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante; luego se midió la masa seca de los sólidos.

DATOS OBTENIDOS:

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (A) = 653.1 gr

Peso de la Muestra (B) = 500 gr

Muestra + Frasco + Agua hasta la marca (C) = 945.6 gr

Peso de la Muestra Seca al Horno (D) = 469.2 gr

CÁLCULO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS (ARENA)

$$GER = \frac{B}{A + B - C} = \frac{500 \text{ gr}}{653.1 \text{ gr} + 500 \text{ gr} - 945.6 \text{ gr}}$$

$$GER = 2.409$$

INVIAS 142- MÉTODO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD ÓPTIMA Y LA DENSIDAD SECA MÁXIMA DE LA ARENA.

Procedimiento:

- Definido el método A para la realización de este ensayo. se procede a seleccionar el material a utilizar. que es el que pasó el tamiz de abertura de 4.75 mm (No. 4). La arena manipulada no fue anteriormente compactada. esto con el fin de no alterar nuestros resultados.
- Se prepararon cuatro muestras. con diferentes humedades. con el fin de encontrar la óptima.
- A la primera muestra se le adicionó agua en pocas cantidades hasta conseguir una humedad visualmente determinada. Esto se consiguió apretando la arena con el fin de que se formara un terrón que al liberarse la presión de la mano no se separara. La cantidad de agua necesaria para conseguir esa humedad para 2500 gramos de arena fueron 30 ml.
- Se tomó la lectura de la masa del molde más la base.
- Se preparó el molde con la base y el collar de extensión. ajustándolo con las respectivas roscas.

- Luego se realizó la compactación. lo mejor distribuido posible en 5 capas. cada una con 25 golpes.
- La quinta capa sobrepasó el molde. con el fin de que se enrasará la superficie lo más horizontal posible incluyendo el anillo de extensión debido a la pérdida de volumen del material
- Se determinó y anoto la masa del molde más la base y la arena compactado.
- Se extrajo la probeta y se tomó una parte de ella para determinar la humedad con la que fue compactada. registrando la masa de arena húmedo y buscando su masa constante por medio del horno.
- De igual forma. pero modificando la humedad. es decir. se aumentó la cantidad de agua a adicionar al material. 50 ml con respecto a la probeta anterior. se realizaron 3 probetas más.
- Al realizarse la última probeta se aseguró que los pesos unitarios húmedos formaran una curva. es decir, se presentará un pico en la gráfica.
- De acuerdo con esto se deben tener en cuenta los siguientes parámetros de acuerdo con el molde con el que se llevó a cabo este ensayo.

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NUMERO DE CAPAS	5
NUMEROS DE GOLPE POR CARA	25
MOLDE No	24
DIAMETRO MOLDE (cm)	10.16
ALTURA DEL MOLDE (cm)	11.5
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	932.343942
PESO DEL MARTILLO	10
CAIDA DEL MARTILLO	45.72
E	61.30

DATOS OBTENIDOS:

PROBETA	1	2	3	4
PESO MOLDE [gr]	4279.1	4279.4	4280	4280
PESO MOLDE + ARENA HUMEDO [gr]	5912.6	5944.5	5953	5984.6
PESO DEL ARENA HUMEDO [gr]	1633.5	1665.1	1673	1704.6
DENSIDAD HUMEDO [gr/cm ³]	1.7520	1.7859	1.7944	1.8283
DENSIDAD SECA [gr/cm ³]	1.5195	1.7859	1.7376	1.7430

CÁLCULO DE LA DENSIDAD HÚMEDA

$$Densidad Humeda = \frac{Peso\ del\ Suelo\ Humedo}{Volumen\ del\ molde}$$

- Probeta 1

$$Densidad Humeda = \frac{1633.5\ gr}{932.34\ cm^3}$$
$$Densidad Humeda = 1.752\ \frac{gr}{cm^3}$$

- Probeta 2

$$Densidad Humeda = \frac{1665.1\ gr}{932.34\ cm^3}$$
$$Densidad Humeda = 1.786\ \frac{gr}{cm^3}$$

- Probeta 3

$$Densidad Humeda = \frac{1673\ gr}{932.34\ cm^3}$$
$$Densidad Humeda = 1.738\ \frac{gr}{cm^3}$$

- Probeta 4

$$Densidad Humeda = \frac{1704.6 \text{ gr}}{932.34 \text{ cm}^3}$$

$$Densidad Humeda = 1.743 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

DATOS DE HUMEDAD OBTENIDOS EN CADA PROBETA:

# DE TARA	1	2	3	4	5	6	7	8
PESO TARA [gr]	5.9	4.3	8.3	5.6	8.4	5.2	5.5	5.4
PESO TARA + ARENA HUMEDO	20.5	20.3	20.8	21.4	22.8	20.2	21	22
PESO TARA + ARENA SECO	20.3	20	20.4	20.9	22.1	19.5	20	20.9
PESO AGUA	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.7	1	1.1
PESO SOLIDO	14.4	15.7	12.1	15.3	13.7	14.3	14.5	15.5
HUMEDAD	1.389	1.911	3.306	3.268	5.109	4.895	6.897	7.097
PROMEDIO HUMEDAD %	1.650		3.287		5.002		6.997	

CÁLCULO DE LA HUMEDAD

$$\% Humedad = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso del Solido}} * 100\%$$

- Probeta 1

Para Tara 1

$$\% Humedad T1 = \frac{0.2}{14.4} * 100\% = 1.389 \%$$

Para Tara 2

$$\% \text{ Humedad } T2 = \frac{0.3}{15.7} * 100\% = 1.911 \%$$

Humedad para la Probeta 1

$$\% \text{ Humedad} = \frac{1.389 + 1.911}{2} = 1.650 \%$$

- Probeta 2

Para Tara 1

$$\% \text{ Humedad } T1 = \frac{0.4}{12.1} * 100\% = 3.306 \%$$

Para Tara 2

$$\% \text{ Humedad } T2 = \frac{0.5}{15.3} * 100\% = 3.268 \%$$

Humedad para la Probeta 2

$$\% \text{ Humedad} = \frac{3.306 + 3.268}{2} = 3.287 \%$$

- Probeta 3

Para Tara 1

$$\% \text{ Humedad } T1 = \frac{0.7}{13.7} * 100\% = 5.109\%$$

Para Tara 2

$$\% \text{ Humedad } T2 = \frac{0.7}{14.3} * 100\% = 4.895 \%$$

Humedad para la Probeta 3

$$\% Humedad = \frac{5.109 + 4.895}{2} = 5.002 \%$$

- Probeta 4

Para Tara 1

$$\% Humedad T1 = \frac{1}{14.5} * 100\% = 6.897 \%$$

Para Tara 2

$$\% Humedad T2 = \frac{1.1}{15.5} * 100\% = 7.097\%$$

Humedad para la Probeta 4

$$\% Humedad = \frac{6.897 + 7.097}{2} = 6.997 \%$$

CÁLCULO DE LA DENSIDAD SECA

$$Densidad Seca = \frac{Densidad Humedad}{1 + \frac{Humedad de la probeta}{100}}$$

- Probeta 1

$$Densidad Seca = \frac{1.752}{1 + \frac{1.650}{100}} = 1.724 \text{ gr/cm}^3$$

- Probeta 2

$$Densidad\ Seca = \frac{1.786}{1 + \frac{3.287}{100}} = 1.729\ gr/cm^3$$

- Probeta 3

$$Densidad\ Seca = \frac{1.794}{1 + \frac{5.002}{100}} = 1.708\ gr/cm^3$$

- Probeta 4

$$Densidad\ Seca = \frac{1.828}{1 + \frac{6.997}{100}} = 1.709\ gr/cm^3$$

ANEXO B: Ensayos preliminares del polietileno de tereftalato (PET).

MÉTODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECÍFICO DEL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET) Y ARENA FINA.

Procedimiento:

- Se midió el peso del balón aforado con agua hasta la marca.
- Se pesó 100 gramos de este material para la determinación de la gravedad específica (Ver Imagen No 4).
- Por medio de un embudo se introdujeron los sólidos de PET en el balón aforado sin ningún líquido adentro.
- Luego se agregó agua y se agito; seguido de ello se terminó de añadir agua hasta la marca, lavando las partículas de material que quedaron adheridas en el cuello del balón aforado (Ver Imagen No 5).
- Se procedió a medir la masa del frasco con PET y agua hasta la marca, empleando siempre la misma balanza.
- Se extrajo la totalidad del arena del balón aforado, y se secó dejándolo varios días al aire libre; luego se midió la masa seca de los sólidos.

DATOS OBTENIDOS:

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (A) = 653.3 gr

Peso de la Muestra (B) = 100 gr

Muestra + Frasco + Agua hasta la marca (C) = 677.3 gr

Peso de la Muestra Seca (D) = 91.5 gr

**CÁLCULO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL POLIETILENO DE
TEREFTALATO (PET)**

$$\text{GER} = \frac{B}{A + B - C} = \frac{100 \text{ gr}}{653.3 \text{ gr} - 677.3 \text{ gr} + 100 \text{ gr}}$$

$$\text{GER} = 1.316$$

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

Tiempo [min]	Temperatura (°c)	
	Fuego	Ladrillo
0	25	24
0:30	510	25
1:00	572	25
1:30	570	25
2:00	610	25
2:30	626	25
3:00	606	26
3:30	726	26
4:00	759	26
4:30	760	26
5:00	805	26
5:30	817	26
6:00	874	27
6:30	892	27
7:00	898	27
7:30	931	27
8:00	933	28
8:30	949	28
9:00	952	28
9:30	957	28
10:00	976	28
10:30	980	28
11:00	982	28
11:30	980	28
12:00	998	28
12:30	1000	29
13:00	1002	29
13:30	1000	29
14:00	992	29
14:30	996	29
15:00	1001	29
15:30	1008	29
16:00	1016	29
16:30	1015	30
17:00	1018	30
17:30	1009	30
18:00	1013	30
18:30	1009	31
19:00	1012	31
19:30	1013	31
20:00	1013	31
20:30	1010	31
21:00	1005	31
21:30	1010	31
22:00	1014	31

22:30	1026	31
23:00	1029	31
23:30	1022	31
24:00	1025	32
24:30	1041	33
25:00	1037	33
25:30	1028	33
26:00	1030	33
26:30	1013	33
27:00	1014	34
27:30	1023	34
28:00	1039	34
28:30	1035	34
29:00	1032	35
29:30	1033	36
30:00	1029	36
30:30	1029	37
31:00	1033	37
31:30	1032	38
32:00	1032	38
32:30	1029	38
33:00	1032	38
33:30	1032	39
34:00	1033	40
34:30	1032	41
35:00	1031	42
35:30	1029	43
36:00	1030	45
36:30	1028	46
37:00	1024	47
37:30	1025	48
38:00	1029	48
38:30	1030	49
39:00	1028	50
39:30	1025	50
40:00	1024	50
40:30	960	50
41:00	1052	51
41:30	1057	51
42:00	1052	51
42:30	1046	51
43:00	1042	52
43:30	1039	54
44:00	1035	55
44:30	1030	56
45:00	1030	56

Los datos anteriores corresponden a los registrados durante la prueba de incendio, en la cual se colocó fuego proporcionado con una lanza llamas y gas natural de la empresa gasan en una cara del muro; se registraron las temperaturas del fuego y de la cara posterior del ladrillo, mediante una termocupla respectivamente, el ensayo tuvo una duración de 45 min y se logró mantener durante 30 min una temperatura mayor a los 1000 °C

ANEXO D: Método para hallar el coeficiente de absorción de acuerdo al Ensayo de Impedancia Acústica.

Muestra 1							
Frecuencia	250 Hz	Frecuencia	500 Hz	Frecuencia	750 Hz	Frecuencia	1000 Hz
Distancia [cm]	Amplitud [vol]	Distancia [cm]	Amplitud [vol]	Distancia [cm]	Amplitud [vol]	Distancia [cm]	Amplitud [vol]
0	1,06	0	0,68	0	0,98	0	0,4
10	0,96	10	0,42	10	0,94	10	0,4
20	0,96	20	0,5	20	0,8	20	0,38
30	0,96	30	0,36	30	0,96	30	0,38
40	0,84	40	0,52	34,5	1,14	40	0,44
50	0,72	50	0,4	40	0,88	50	0,32
60	0,8	60	0,46	50	0,88	60	0,4
70	0,84	70	0,44	60	0,9	70	0,4
80	0,84	80	0,46	70	0,8	80	0,4
83,5	0,68	90	0,3	80	0,96	90	0,4
90	0,78	100	0,46	90	0,8	100	0,34
100	0,84	105,5	1,14	100	0,94	110	0,42
110	0,84	110	0,46	110	0,76		

Muestra 2							
Frecuencia	250 Hz	Frecuencia	500 Hz	Frecuencia	750 Hz	Frecuencia	1000 Hz
Distancia [cm]	Amplitud [vol]	Distancia [cm]	Amplitud [vol]	Distancia [cm]	Amplitud [vol]	Distancia [cm]	Amplitud [vol]
0	0,92	0	0,66	0	0,64	0	0,38
10	0,84	10	0,46	10	0,34	10	0,38
20	0,78	20	0,62	20	0,32	20	0,36
30	0,76	30	0,44	30	0,34	30	0,36
40	0,7	40	0,66	40	0,28	40	0,44
50	0,86	50	0,46	50	0,28	50	0,34
53	0,6	60	0,7	60	0,28	60	0,4
60	0,7	70	0,62	70	0,3	70	0,4
70	0,68	80	0,62	80	0,36	74	0,32
80	0,68	90	0,5	90	0,32	80	0,38
90	0,66	100	0,58	100	0,34	90	0,38
100	0,68	114,5	0,9	110	0,22	100	0,36
110	0,68	110	0,54			102	0,46
						110	0,42

A continuación, se muestran los valores máximos y mínimos de amplitudes de ondas correspondientes a las distintas frecuencias para cada una de las muestras.

Muestra 1		
Frecuencia	Máximo	Mínimo
250 Hz	1.06	0.68
500 Hz	1.14	0.3
750 Hz	1.14	0.76
1000 Hz	0.44	0.32

Muestra 2		
Frecuencia	Máximo	Mínimo
250 Hz	0.92	0.6
500 Hz	0.9	0.44
750 Hz	0.64	0.22
1000 Hz	0.44	0.32

Muestra 1:

- **250 Hz**

$$SWR = \frac{1,06}{0,68} = 1,56$$

- **500 Hz**

$$SWR = \frac{1,14}{0,3} = 3,80$$

- **750 Hz**

$$SWR = \frac{1,14}{0,76} = 1,50$$

- **1000 Hz**

$$SWR = \frac{0,44}{0,32} = 1,38$$

Muestra 2:

- **250 Hz**

$$SWR = \frac{0,92}{0,6} = 1,53$$

- **500 Hz**

$$SWR = \frac{0,9}{0,44} = 2,05$$

- **750 Hz**

$$SWR = \frac{0,64}{0,22} = 2,90$$

- **1000 Hz**

$$SWR = \frac{0,44}{0,32} = 1,38$$

Obteniendo la relación entre máximos y mínimos en una onda estacionaria hallamos el coeficiente de absorción de cada frecuencia.

$$\alpha n = \left(\frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right)^2$$

Muestra 1:

- 250 Hz

$$\alpha n = \left(\frac{1,56 - 1}{1,56 + 1} \right)^2 = 0,048$$

- 500 Hz

$$\alpha n = \left(\frac{3,80 - 1}{3,80 + 1} \right)^2 = 0,34$$

- 750 Hz

$$\alpha n = \left(\frac{1,50 - 1}{1,50 + 1} \right)^2 = 0,04$$

- 1000 Hz

$$\alpha n = \left(\frac{1,38 - 1}{1,38 + 1} \right)^2 = 0,025$$

Muestra 2:

- 250 Hz

$$\alpha n = \left(\frac{1,53 - 1}{1,53 + 1} \right)^2 = 0,044$$

- 500 Hz

$$\alpha n = \left(\frac{2,05 - 1}{2,05 + 1} \right)^2 = 0,119$$

- 750 Hz

$$\alpha n = \left(\frac{2,90 - 1}{2,90 + 1} \right)^2 = 0,237$$

- **1000 Hz**

$$\propto n = \left(\frac{1,38 - 1}{1,38 + 1} \right)^2 = 0,025$$