

Procesos de reducción del peso del ladrillo elaborado con material Arena-Pet mediante tratamiento térmico, implementando orificios que cumplan con la normativa NTC 4205 y NTC 4076

Nicolás Daniel Chacón Pérez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

M.Sc. Luis Alberto Capacho Silva

Profesor titular, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil

Programa académico

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, Jesús y María por ser mi guía y fortaleza espiritual durante mi vida universitaria, su apoyo me permitió superar las adversidades en este proceso y poder alcanzar el éxito. Agradezco por la salud, sabiduría y vida que me han concebido, regalos invaluableles que han hecho posible disfrutar plenamente cada experiencia y momento vivido en este viaje.

A mi mamá, Ethel Adriana Pérez Quiroga, y a mi papá, Nicolás Chacón Bueno quienes han hecho posible todo esto, su apoyo incondicional ha sido mi ancla en cada momento crucial de mi vida, tanto académica como personal. Agradezco su lucha incansable por impulsar a cada uno de sus hijos hacia el éxito. Son mis pilares y mi apoyo constante, siempre motivándome a superar los obstáculos para salir adelante y poder alcanzar mis metas. Los amo infinitamente y estoy profundamente agradecido con ellos por este logro, que es por ellos y para ellos, gracias por forjarme como un buen hombre y por todo lo que han hecho.
Los amo.

A mi querida hermana, María Fernanda Calderón Pérez, por ser siempre mi guía e inspiración, por ser esa amiga incondicional y mi cómplice en innumerables aventuras. Cada consejo y motivación que me ha brindado, han permitido que soñara en grande y conociera nuevos mundos, me ha demostrado que con esfuerzo, sacrificio y dedicación, se puede triunfar en la vida. Este logro también es por ella y para ella, cada uno de mis éxitos fue con el propósito de que estuviera orgullosa de su hermano menor, quien siempre la ha mirado con ojos de amor y de admiración, aspirando un día ser tan extraordinario como ella.

Finalmente, quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis amigos y a todas las personas que me acompañaron en esta etapa. Cada uno de ustedes aportó enseñanzas, risas y momentos de felicidad que atesorare siempre. Estoy totalmente agradecido por su compañía, apoyo incondicional y amistad. De cada uno de ustedes he aprendido cosas muy importantes y espero con entusiasmo seguir compartiendo experiencias juntos. Un abrazo cálido para cada uno.

Nicolás Daniel Chacón Pérez

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron significativamente en el desarrollo de este proyecto. Agradezco especialmente a la escuela de Ingeniería Civil, así como al laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Industrial de Santander, bajo la dirección del Sr. Eduardo Alberto Castañeda y el Sr. Allex Eduardo Álvarez, por su generosidad y apoyo al permitirme utilizar sus equipos e instalaciones. Además, quisiera reconocer el invaluable apoyo brindado por los laboratoristas, Jairo, Germán y Jaime y por el Ingeniero Jonathan Jerez quienes me asistieron de manera excepcional y contribuyeron a crear un ambiente de trabajo excelente.

A mi director de proyecto de grado, jefe, y amigo, el ingeniero Luis Alberto Capacho Silva. De él he aprendido lecciones invaluable para toda mi vida. Agradezco su calidad humana, por ser una persona excepcional. Sus consejos tan valiosos perduraran en mi memoria con mucho cariño. Estoy infinitamente agradecido por la oportunidad de ser su auxiliar en la materia de caracterización de materiales, una experiencia que ha sido una de las mejores en mi vida, me llena de felicidad haber conocido y contribuido a la formación académica y personal de otros estudiantes, a quienes recuerdo con cariño. Gracias por acompañarme y ser mi guía en este proyecto de investigación y poder culminar mi vida universitaria de la mejor manera.

Nicolás Daniel Chacón Pérez

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	16
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos	18
2. Marco Teórico / Antecedentes	19
2.1 Polietileno Tereftalato (PET).....	19
2.2 Ladrillo	21
2.2.1 Unidad de mampostería de perforación vertical (PV).....	22
2.2.2 Unidad de mampostería de perforación Horizontal (PH).....	22
2.2.3 Unidad de mampostería maciza (M)	22
2.2.4 Ladrillo de arena y plástico PET reciclado.....	23
2.3 Arena	24
2.4 Norma técnica Colombiana (NTC) y norma del instituto nacional de vías de Colombia (INV-E)	24
2.4.1 Norma NTC 4205. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos.....	24
2.4.2 Norma NTC 4076. Unidades de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto.....	25
2.4.3 Norma NTC 174. Especificaciones de los agregados para concreto.....	26
2.5 Investigaciones sobre ladrillos con PET.....	26
2.6 Investigaciones sobre ladrillos con PET.....	27
3. Metodología.....	27

3.1	Caracterización de la arena fina.....	27
3.2	Caracterización del polietileno de tereftalato	29
3.3	Elaboración y ensayo de las probetas de material compuesto.....	29
3.3.1	Densidad del material	29
3.3.2	Dosificación del material y elaboración de probetas.....	30
3.3.2.1	Moldeado de probetas.....	30
3.3.2.2	Compactación y mezclado.....	30
3.3.2.3	Desencofrado y toma de mediciones.....	31
3.3.3	Limite elástico y modulo elástico.....	31
3.3.3.1	Desencofrado y toma de mediciones.....	32
3.3.4	Coefficiente de Poisson	33
3.3.4.1	Análisis estadístico del coeficiente de Poisson.	34
3.4	Modelado en SolidWorks	34
3.4.1	Modelo Base.....	35
3.4.2	Análisis estático por elementos finitos	35
3.4.2.1	Condiciones de frontera.....	35
3.4.2.2	Mallado.....	36
3.4.2.3	Factores de resultados.....	36
3.4.3	Modelos perforados	37
3.4.3.1	Análisis de Topología.	38
3.4.3.2	Configuración óptima de perforaciones.	38
3.5	Fabricación del ladrillo.....	39
3.5.1	Acondicionamiento del horno y del molde.....	39
3.5.2	Dosificación del material y elaboración de muestra.....	39

3.5.2.1	Moldeado de ladrillos.....	40
3.5.2.2	Compactación y mezclado.....	40
3.5.2.3	Desencofrado.....	40
4.	Resultados.....	41
4.1	Caracterización de las arenas finas.....	41
4.2	Caracterización del PET reciclado.....	43
4.3	Elaboración y ensayo de las probetas de material compuesto.....	43
4.3.1	Densidad del material.....	43
4.3.2	Dosificación del material y elaboración de probetas.....	44
4.3.2.1	Moldeado de probetas.....	44
4.3.2.2	Compactación y mezclado.....	44
4.3.2.3	Desencofrado y toma de mediciones.....	45
4.3.3	Limite elástico y modulo elástico.....	46
4.3.3.1	Análisis estadístico del límite y modulo elástico.....	50
4.3.4	Coefficiente de Poisson.....	53
4.3.4.1	Análisis estadístico del coeficiente de Poisson.....	54
4.4	Fabricación del ladrillo.....	56
4.4.1	Modelo Base.....	56
4.4.2	Análisis estático por elementos finitos.....	56
4.4.2.1	Condiciones de frontera.....	56
4.4.2.2	Mallado.....	56
4.4.2.3	Factores de resultados.....	57
4.4.3	Modelos perforados.....	58
4.4.3.1	Análisis de topología.....	59

4.4.2.2	Configuración optima de perforaciones.	59
4.5	Fabricación del ladrillo.....	60
4.5.1	Acondicionamiento del horno y del molde.....	60
4.5.2	Dosificación del material y elaboración de muestra.....	61
4.5.2.1	Moldeado de ladrillos.	61
4.5.2.2	Compactación y mezclado.....	61
4.5.2.3	Desencofrado y ensayo.....	61
5.	Conclusiones.....	63
6.	Recomendaciones	65
	Referencias bibliográficas	66

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tabla propiedades del PET virgen.	20
Tabla 2. Ventajas y desventajas del PET.....	20
Tabla 3. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural.....	25
Tabla 4. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural.....	25
Tabla 5. Análisis granulométrico NTC 174.	26
Tabla 6. Dosificación probetas.	30
Tabla 7. Granulometría de la arena de Chicamocha (Mach).	41
Tabla 8. Granulometría de la arena de Pavimentos Andino (Mapa).....	41
Tabla 9. Granulometría de la arena Marn.	42
Tabla 10. Coeficientes SUCS.	43
Tabla 11. Granulometría del PET reciclado.....	43
Tabla 12. Densidades del ladrillo.	43
Tabla 13. Dosificaciones de material.....	44
Tabla 14. Densidad de dosificaciones.....	45
Tabla 15. Densidad Marn.....	46
Tabla 16. Limite elástico de probetas.	46
Tabla 17. Modulo elástico de las probetas.....	47
Tabla 18. Propiedades Ladrillo Mach.....	49
Tabla 19. Propiedades Ladrillo Marn.	49
Tabla 20. Límite elástico promedio Marn.	50
Tabla 21. Análisis estadístico del límite elástico.	51

Tabla 22. Modulo elástico promedio Marn.	51
Tabla 23. Análisis estadístico del módulo elástico.	52
Tabla 24. Coeficiente de Poisson probetas.	53
Tabla 25. Coeficiente de Poisson Marn.	54
Tabla 26. Análisis estadístico del coeficiente de Poisson.	55
Tabla 27. Diámetros comerciales.	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Composición química del PET.....	20
Figura 2. Ladrillo tipo PV, PH y M.	22
Figura 3. Ladrillo de arena y plástico PET.	23
Figura 4. Curva granulométrica de la arena Mach y arena Mapa.....	42
Figura 5. Curva granulométrica de la arena Marn.....	42
Figura 6. Limite elástico y modulo elástico promedio.	47
Figura 7. Ficha técnica del PET.....	48
Figura 8. Distribución normal del límite y módulo elástico.....	52
Figura 9. Distribución normal del coeficiente de Poisson.....	55
Figura 10. Mallado Tetraédrico y Cubico.....	56
Figura 11. Diagrama de tensiones y factor de seguridad caso 0.....	58
Figura 12. Análisis de topología.....	59
Figura 13. Croquis del ladrillo perforado.	59
Figura 14. Factor de seguridad y diagrama de tensiones de Ladrillo perforado.	60
Figura 15. Horno y molde del ladrillo perforado.....	60
Figura 16. Resultado inicial y final de los ladrillos.	62
Figura 17. Curva Esfuerzo-Deformación del ladrillo perforado.	62
Figura 18. Ladrillos después del ensayo.....	62

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos

Apéndice A. Resumen de investigaciones.

Apéndice B. Elaboración y ensayo de probetas de material compuesto.

Apéndice C. Montaje realizado para el coeficiente de Poisson.

Apéndice D. Simulación en SolidWorks.

Apéndice E. Fabricación de ladrillos.

Glosario

Análisis estático: método utilizado en ingeniería para estudiar el comportamiento y características de una estructura o sistema al someterse a cargas externas constantes que no cambian con el tiempo.

Análisis topológico: método empleado en ingeniería en el que se aplica restricciones a un sólido en términos de su geometría, masa, resistencia y desplazamiento, con el objetivo de optimizar su diseño. Este proceso busca maximizar la mayor rigidez del sólido mediante un enfoque iterativo, ajustando las variables de diseño para cumplir con los requisitos (Estudio de topología - Ayuda de SOLIDWORKS, 2021).

Arena: material granular compuesto predominantemente por partículas pequeñas de roca erosionada, se utiliza en la construcción principalmente en la fabricación de concreto, morteros y diseño de pavimentos, debido a su capacidad de proporcionar estabilidad, drenaje y resistencia.

Coefficiente de poisson: medida que describe la relación entre las deformaciones laterales y longitudinales de un material cuando se somete a una carga externa que lo comprime o estira (MECAPEDIA • Coeficiente de Poisson, 2022)

Factor de seguridad (FS): surge de la necesidad de brindar seguridad y optimizar los elementos de ingeniería, diseño y construcción. (González Rodríguez et al., 2021).

Ladrillo: bloque generalmente hecho de arcilla cocida, aunque también puede estar compuesto de otros materiales como concreto, arena, cal, plástico, u otros agregados, son utilizados ampliamente en la construcción por su durabilidad, resistencia y aislamiento.

Limite elástico: máximo esfuerzo que un material puede soportar sin sufrir una deformación plástica (permanente) después de ser sometido a una carga.

Método de elementos finitos: método numérico de aproximación de problemas continuos de tal forma que “el continuo se divide en un número finito de partes, elementos, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos” (Moreno, 2005).

Módulo de elasticidad: propiedad mecánica que refleja la habilidad que tiene un material para deformarse elásticamente, el cual puede ser obtenido aplicando cargas conocidas sobre un espécimen para evaluar la deformación. (Serrano, Guzmán, 2010)

Pet: también conocido como polietileno tereftalato, es un tipo de plástico comúnmente utilizado en envases, caracterizado por “su gran ligereza y resistencia mecánica a la compresión, alto grado de transparencia y brillo, conservar el sabor y aroma” (Juárez et al., 2011).

SolidWorks: software de diseño asistido por computadora (CAD) 3D que permite modelar piezas y ensamblajes en 3D, así como generar planos en 2D, ofreciendo la capacidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño.

Tratamiento térmico: en las ciencias de los materiales el tratamiento térmico se define como el procedimiento al que se someten algunos materiales para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas, básicamente la dureza, la resistencia y la tenacidad, mediante aplicación de calor y el posterior enfriamiento (Calbet, 2012).

Tensión de von mises: método comúnmente utilizado para evaluar cuando un material falla al someterse a cargas. Este criterio predice que la falla ocurre cuando el material alcanza un valor crítico.

Resumen

Título: Procesos de reducción del peso del ladrillo elaborado con material Arena-Pet mediante tratamiento térmico, implementando orificios que cumplan con la normativa NTC 4205 y NTC 4076. *

Autor: Nicolás Daniel Chacón Pérez **

Palabras Clave: ladrillos, arena-pet, modelación, medio ambiente, análisis estático, análisis topológico.

En el ámbito de la construcción, los ladrillos desempeñan un papel crucial al influir en la estabilidad, durabilidad, embellecimiento, resistencia, así como en el aislamiento térmico y acústico de las edificaciones. No obstante, la elevada demanda y producción de ladrillos convencionales, junto con sus consecuencias ambientales negativas, ha creado la necesidad de explorar materiales alternativos para su fabricación como es el caso del plástico PET. Este proyecto de investigación se enfoca en la modificación de ladrillos macizos H5 fabricados con material Arena-PET mediante tratamiento térmico a una temperatura aproximada de 300 °C, incorporando orificios con el objetivo de reducir las cargas estáticas sobre las estructuras y los costos de fabricación sin afectar negativamente las propiedades físicas y mecánicas, y cumpliendo con las normativas colombianas (NTC 4205 y NTC 4076) para la clasificación de ladrillos macizos y mampostería no estructural. La investigación, respaldada por el uso del software SolidWorks, explora las ventajas y desventajas potenciales de la implementación de estos orificios en diferentes distribuciones geométricas, destacando la significativa reducción del peso en un 9,4 % y el cumplimiento teórico de las resistencias mínimas a compresión en el modelado según la norma NTC 4205 al obtener valores de 10 MPa. No obstante, experimentalmente el ladrillo presentó una resistencia de 5,05 MPa, inferior al mínimo requerido por la normativa, 10 MPa. Los procedimientos detallados abarcan desde ensayos realizados para conocer las propiedades del material, el modelado en el software SolidWorks por análisis estático mediante elementos finitos, análisis topológico, y evaluación de factores de seguridad a partir del análisis de la tensión de máxima energía de Von Mises, y fabricación de los ladrillos siguiendo metodologías de proyectos de investigación previos. Como resultado, se obtuvo un ladrillo con tres orificios de 31,8 mm de diámetro, distribuidos horizontalmente a una altura de 20 mm de la base y separados cada 27 mm con un factor de seguridad general de 1.0, indicando que la pieza soportara una fuerza de 115000 Newtons. Finalmente la presentación detallada de los análisis, ensayos, resultados y recomendación para optimizar el desencofrado, respalda la viabilidad y eficacia de esta innovadora idea, proponiendo una solución exitosa para la fabricación de ladrillos de mampostería no estructural. Esto podría contribuir significativamente a la construcción sostenible y cuidadosa con el medio ambiente.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías Fiscomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Programa académico. Director: Luis Alberto Capacho Silva. M.Sc.

Abstract

Title: Processes to reduce the weight of bricks elaborated with Arena-Pet material through thermal treatment, implementing vertical holes that comply with the NTC 4205 and NTC 4076 standards. *

Author: Nicolás Daniel Chacón Pérez **

Keywords: bricks, sand-pet, modeling, environment, static analysis, topological analysis

In the field of construction, bricks play a crucial role by influencing the stability, durability, beautification, resistance, as well as thermal and acoustic insulation of buildings. However, the high demand and production of conventional bricks, along with their negative environmental consequences, has created the need to explore alternative materials for their manufacture, as is the case of PET plastic. This research project focuses on the modification of H5 solid bricks manufactured with Sand-PET material through thermal treatment at a temperature of approximately 300 °C, incorporating holes in order to reduce the static loads on the structures and the manufacturing costs without negatively affecting the physical and mechanical properties, and complying with the Colombian standards (NTC 4205 and NTC 4076) for the classification of solid bricks and non-structural masonry. The research, supported by the use of SolidWorks software, explores the potential advantages and disadvantages of the implementation of these holes in different geometric distributions, highlighting the significant reduction of weight by 9.4% and the theoretical compliance with the minimum compressive strengths in the modeling according to NTC 4205 standard by obtaining values of 10 MPa. However, experimentally the brick presented a strength of 5.05 MPa, lower than the minimum required by the standard, 10 MPa. The detailed procedures range from tests performed to know the material properties, modeling in the software SolidWorks with static analysis using finite elements, topological analysis and evaluation of safety factors from the Von Mises maximum energy stress analysis, and manufacture of the bricks following methodologies of previous research projects. As a result, a brick was obtained with three holes of 31,8 mm of diameter, horizontally distributed at a height of 20 mm from the base and separated every 27 mm with an overall safety factor of 1.0, indicating that the piece will withstand a force of 115000 Newtons. Finally the detailed presentation of the analysis, tests, results and recommendation to optimize the stripping, supports the feasibility and effectiveness of this innovative idea, proposing a successful solution for the manufacture of non-structural masonry bricks. This could contribute significantly to sustainable and environmentally friendly construction

*Degree work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering . School of Civil Engineering. Academic program. Director: Luis Alberto Capacho Silva. M.Sc.

Introducción

Los ladrillos son esenciales en la construcción por su papel clave en la estabilidad, durabilidad, embellecimiento, resistencia, así como en el aislamiento térmico y acústico de las construcciones. De acuerdo con Brick Industry Association “A diferencia de otros materiales de construcción, el color del ladrillo no se desvanece con el tiempo y no requiere un programa de mantenimiento para su cuidado. Es un producto sostenible obtenido y fabricado a partir de materiales naturales y abundantes de la tierra que es eficiente energéticamente y ayuda a mantener su hogar más fresco en verano y más cálido en invierno. Se ha demostrado que el ladrillo mejora la eficiencia energética hasta un 26 % mejor que el fibrocemento” (Brick Industry Association, 2023).

No obstante, la producción de ladrillos tradicionales a base de arcilla y cemento genera altas emisiones de gases debido a su elevado consumo energético. Esto ha motivado la búsqueda de materiales alternativos, como residuos industriales, orgánicos y de construcción como plásticos reciclados, que además de cuidar el medio ambiente, ofrezcan propiedades físico-mecánicas destacadas, como es el caso del plástico PET reciclado. Este ofrece, con respecto a los ladrillos convencionales en arcilla; bajo peso específico, suficiente resistencia mecánica, excelente aislación térmica, baja absorción de agua y buena adherencia con revoques tradicionales” (González Rodríguez et al., 2021).

Un estudio realizado por la Universidad Industrial de Santander acerca de alternativas en la “Elaboración de ladrillos macizos H5 compuestos de material Arena-PET mediante tratamiento térmico” (Bermúdez & Cáceres, 2023), demostró que los ladrillos de arena y PET totalmente macizos sin perforaciones verticales o horizontales, con un peso de 2511 gramos, tienen una resistencia a la compresión de 19,2 MPa, superando el valor de resistencia mínima

establecido en la norma NTC 4205¹ de 10 MPa para unidad de mampostería no estructural para ladrillos tipo M.

Además, otros estudios han explorado diferentes tipos de suelos compuestos, como se menciona en “Propuesta del material compuesto suelo-pet para la elaboración de ladrillos macizos H5 mediante tratamiento térmico” (Gómez & Ocaño, 2019), en el cual se concluye que la mezcla óptima al lograr resistencias de 9,85 MPa fue con arena fina y PET. En cuanto al análisis del comportamiento de diferentes diseños de mezcla, como se discute en “Alternativa de uso de materiales geosintéticos elaborados con arena y plástico pet reciclado para la fabricación de elementos no estructurales en la construcción” (Aponte & Salcedo, 2019), se ha observado que la mayor resistencia a compresión en los ladrillos H5, se obtiene al utilizar 22,5 % de PET reciclado y 77,5 % de arena fina, cumpliendo satisfactoriamente con las resistencias y dimensiones.

Este proyecto propone reducir el peso de los ladrillos mediante la implementación de orificios, manteniendo el volumen mínimo que establece la norma NTC 4076² para ladrillos macizos y asegurando la resistencia requerida para mampostería no estructural tipo M según la norma NTC 4205, disminuyendo cargas y costos asociados con los ladrillos sin comprometer sus propiedades físicas y mecánicas. Para lograrlo, se ajustará la metodología precedente en la fabricación, utilizando el software de diseño asistido por computador y modelado paramétrico en 3D, SolidWorks³, para optimizar la distribución geométrica, evaluar un análisis estático utilizando la metodología de elementos finitos, utilizar un análisis topológico y evaluar factores de seguridad.

¹ Norma Técnica Colombiana, NTC 4205 – Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos.

² Norma Técnica Colombiana, NTC 4076 – Unidades (Bloques y Ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto

³ Licencia de SolidWorks de uso educativo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Modificar el procedimiento de la elaboración de ladrillos macizos H5 compuestos de material Arena-PET mediante tratamiento térmico, implementando orificios que cumplan con los parámetros mínimos establecidos por la Norma NTC 4076 para clasificación de ladrillo macizo, así como con la NTC 4205, que establece la resistencia mínima para el ensayo de compresión.

1.2 Objetivos Específicos

Comparar los valores mínimos de compresión establecidos en la Norma Técnica Colombiana, NTC 4205 y obtenidos en el proyecto de investigación titulado “PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS MACIZOS H5 COMPUESTOS DE MATERIAL ARENA-PET MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO” con las propiedades del ladrillo macizo H5 modificado con perforaciones y elaborado con material Arena-PET mediante tratamiento térmico.

Establecer la relación óptima entre el volumen de las perforaciones y el volumen total del ladrillo, garantizado la resistencia a compresión en mampostería no estructural y la clasificación del ladrillo como macizo.

2. Marco Teórico / Antecedentes

En concordancia con el proyecto de investigación de la Universidad Industrial de Santander “Procesos de optimización para la elaboración de ladrillos macizos H5 compuestos de material arena-pet mediante tratamiento térmico” (Bermúdez & Cáceres, 2023) se producirá el ladrillo macizo H5 compuesto de arena - PET a través de tratamiento térmico, ajustando el procedimiento de fabricación al incluir perforaciones en los ladrillos.

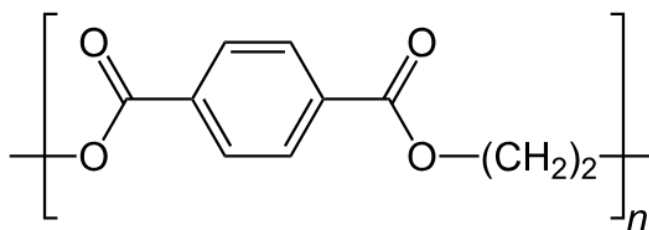
2.1 Polietileno Tereftalato (PET)

El polietileno tereftalato (PET) es un polímero plástico obtenido mediante la polimerización de ácido tereftálico y monoetilenglicol, conocido por su alto grado de cristalinidad y termoplasticidad, lo que lo hace apto para ser transformado mediante proceso de extrusión, inyección y termoformado (Acoplasticos, 2023). Fue sintetizado por primera vez en 1940 por Dupont y Calico Printers. Sin embargo, fue patentado en 1941 por John Whinfield y James Dickson para la creación de fibras textiles y en 1950 se comenzó a utilizar en envases. Actualmente es ampliamente utilizado en fabricación de botellas, bandejas, fibras textiles y otros productos (Cascante, s. f.).

Por otra parte, la contaminación por plásticos es un problema ambiental urgente que se debe afrontar, la producción, incineración y desperdicio de los residuos contribuyen en gran medida al cambio climático y la muerte de fauna y flora. Según datos obtenidos por el periódico “El Tiempo” y la ONG ambientalista “Greenspace”, Colombia consume 1.250.000 toneladas de plástico por año y aproximadamente el 74% de los envases plásticos terminan en rellenos sanitario. (Sanjuan, 2023).

Figura 1.

Composición química del PET.



A continuación, se detallan las principales propiedades del PET virgen del artículo de Nava, Jiménez y Vera (2011), “Estudio de factibilidad para la manufactura de empuñaduras de Pet reciclado”. Dichas características lo han acreditado como uno de los materiales más importantes para la industria de la construcción.

Tabla 1.

Tabla propiedades del PET virgen.

Propiedades	Unidad	Valor Típico
Viscosidad Intrínseca	dl/g	0.783
Densidad	g/cm ³	1.33-1.34
Color	-	Cristal
Forma Física	N/A	Hojuela (flakes)
Tamaño	cm	1.25
Origen	N/A	Botellas
Temperatura de transición vítrea	°C	69-115
Resistencia a la tracción	kgf/cm ²	55.89
Módulo de elasticidad	kgf/cm ²	599.96
Resistencia al impacto		No rompe
Valor límite de viscosidad medido en Ácido dicloroacético a 25°C		1.07
Punto de fusión °C	Aprox.	252/260
Acetaldehído		ppm<1
Contenido en grupos carboxílicos		mval/kg 20
Densidad aparente g/cm ³		0.85

Asimismo, es ideal para empaques de alimentos, bebidas, y aplicaciones en diseño y fabricación, ya que no transmite olores ni sabores. Estas ventajas, detalladas en la siguiente tabla, se exponen en el artículo de Nava, Jiménez y Vera (2011).

Tabla 2.

Ventajas y desventajas del PET.

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Bueno como barrera para los gases como el CO², humedad y el O² 2. Es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes. 3. Irrompible 4. Liviana 5. Impermeable 6. Inerte (al contenido) 7. Resistencia esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza. 8. Alta resistencia química y buenas propiedades térmicas. 9. Totalmente reciclable. 10. Superficie barnizable. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tiene un número finito de reciclado. 2. No se destruye de forma natural. 3. Tiene desprendimiento de sustancias tóxicas cuando es sometido a temperaturas por arriba de los 230°C.

2.2 Ladrillo

Elemento fundamental en la construcción de mampostería y otras estructuras por su estabilidad, embellecimiento, aislamiento y resistencia. Es uno de los materiales de construcción más antiguos y esenciales, tradicionalmente hecho en arcilla cocida, adobe y hormigón. Sin embargo, también se fabrican de silicato de calcio y plásticos reciclados, y se fabrican mediante procesos de extracción, preparación de pasta, trituración, moldeado, secado y cocción (Ladrillos Matmap, 2021).

En la fabricación de un ladrillo se involucran diversas etapas: extracción y maduración de la arcilla, trituración, homogeneización y exposición a los elementos para garantizar consistencia y uniformidad, reducción de las dimensiones de los terrones, humedecimiento y posteriormente moldeado a 130°C con vapor saturado, secado y cocción en hornos de túnel a temperaturas entre 900°C y 1000°C. Finalmente almacenamiento y distribución para ser utilizado más adelante.

Cada región cuenta con distintos tipos de ladrillos adaptados a sus condiciones y normativas locales de construcción. No obstante, aunque existan diferentes tipos de clasificación, este proyecto se centrará en el estudio de los tres tipos básicos de unidades de mampostería según la norma NTC-4205 (2000).

2.2.1 Unidad de mampostería de perforación vertical (PV)

Perforaciones perpendiculares a la cara o superficie en que se asienta el muro. El área neta de las perforaciones, medida en cualquier sección perpendicular a sus ejes, no puede ser superior al 65%. Este tipo de ladrillo puede observarse en la Figura 2.

2.2.2 Unidad de mampostería de perforación Horizontal (PH)

Perforaciones paralelas a la superficie en que se asienta el muro, que reducen el peso y las hacen ideales para la construcción de paredes divisorias en edificios residenciales y comerciales, facilitando la instalación de sistemas eléctricos y tuberías además de la circulación adecuada de aire, como se muestra en la Figura 2.

2.2.3 Unidad de mampostería maciza (M)

Ladrillos aligerados con perforaciones menores al 25% de su volumen o sin perforaciones que cumplen con los requisitos para unidades de mampostería establecidos en la norma NTC-4076 (1997), como se ilustra en la Figura 2.

Figura 2.

Ladrillo tipo PV, PH y M.



Además de garantizar estabilidad y durabilidad, por su solidez y resistencia, son ideales para estructuras que deban soportar cargas considerables. Sin embargo, son más pesados que los ladrillos perforados, lo que implica una mayor carga y requiere un manejo más laborioso.

2.2.4 Ladrillo de arena y plástico PET reciclado.

Ladrillos que ofrecen excelentes propiedades de aislamiento acústico y térmico, facilidad para ser clavados y aserrados, notable resistencia mecánica, y alta capacidad para resistir al fuego y condiciones climáticas adversas. Además, son más económicos y livianos, facilitando su manipulación y agilizando el proceso de construcción.

De acuerdo con lo expuesto por Bermúdez y Cáceres (2023), los ladrillos de material compuesto ilustrados en la Figura 3, superan a los tradicionales en varios aspectos: resistencia a compresión de 19,2 MPa, resistencia a la flexión 2,7 kN frente a 1,27 kN de los ladrillos de arcilla, resistencia a compresión de muretes mayor, y un buen comportamiento en incendios, soportando temperaturas superiores a 700°C por más de 20 minutos.

Figura 3.

Ladrillo de arena y plástico PET.



Bermúdez y Cáceres (2023), describen que la fabricación de un ladrillo macizo implica diferentes etapas: caracterización de la arena determinando la granulometría, gravedad específica y peso unitario, trituración del PET a un tamaño aproximado de 2 mm, mezcla y disposición del material en el molde previamente preparado y engrasado e introducción de él, en el horno a una temperatura de 260°C. Se mezcla el material cada 5 minutos hasta lograr una consistencia homogénea para finalmente aplicar presión en una prensa mecánica y una vez alcanzada las dimensiones deseadas del ladrillo, dejarlo enfriar por 50 minutos para desmoldarlo.

En este proyecto se elaborarán ladrillos H5 (longitud:23 cm, alto; 11 cm, ancho; 5 cm) tipo M con perforaciones que ocupan menos del 25% de su volumen para reducir el peso, y fabricados con arena-pet a través de tratamiento térmico, opción que hasta el momento no está explorada en el país, únicamente en la Universidad Industrial de Santander, con base en los datos recopilados.

2.3 Arena

La arena fina es un material constituido por pequeños granos de minerales, utilizada en la construcción y la industria, especialmente en la fabricación de concretos, vidrios, moldes de fundición, fabricación de ladrillos y construcción de carreteras debido a sus propiedades de relleno y adhesión entre partículas. Es fundamental mantener la limpieza de esta sin importar la forma en que se obtenga, ya que altas cantidades de arcilla, álcalis y otros materiales orgánicos perjudican su comportamiento (Torices, 2024)

2.4 Norma técnica Colombiana (NTC) y norma del instituto nacional de vías de Colombia (INV-E)

Normas presentadas por el instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, las cuales están sujetas a ser actualizadas permanentemente con el objeto de que respondan en todo momento a las necesidades y exigencias actuales.

2.4.1 Norma NTC 4205. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos.

La norma NTC-4205 (2000), establece los requisitos que deben cumplir los ladrillos utilizados en mampostería y fija los parámetros para geométricos determinar los distintos tipos de unidades (PV, PH y Macizo). Además, las unidades de mampostería deben cumplir con la resistencia mínima a la compresión, especificadas en las siguientes tablas de propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural y no estructural.

Tabla 3.

Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural.

Tipo	Resistencia mínima a la compresión Pa (kgf/cm ²)		Absorción de agua máxima en %			
	Prom 5 U	Unidad	Interior		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	5.0	3.5	13	16	13.5	14
PV	18.0	15.0	13	16	13.5	14
M	20.0	15.0	13	16	13.5	14

Tabla 4.

Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural.

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

En los ensayos de laboratorio realizados en el proyecto de investigación de Bermúdez y Cáceres (2023), se confirmó que los ladrillos H5 elaborados con arena-pet mediante tratamiento térmico cumplen con la resistencia mínima a la compresión para unidades de mampostería no estructurales (Tabla 4) con un valor promedio de 19,2 MPa, mientras que, para unidades de mampostería estructural (Tabla 3) con un valor promedio de 15,92 MPa no cumplen; este proyecto considerara exclusivamente las propiedades físicas de la tabla 4 al ser un ladrillo H5 con perforaciones para uso de mampostería no estructural.

2.4.2 Norma NTC 4076. Unidades de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto.

Esta norma establece los requisitos para unidades perforadas o macizas (bloques o ladrillos), aptas para mampostería no estructural, interior o exterior, y para las chapas de concreto. Las unidades deben cumplir con requisitos dimensionales específicos establecidos

en el artículo 4.1 de la norma técnica, donde se especifica que para unidades perforadas tipo PV, los espesores de pared y tabique deben ser de 20 mm, mientras que para unidades solidas tipo M, el área neta transversal en cada sección no debe ser inferior al 75% del área bruta transversal medida en el mismo plano. Se verificará que los ladrillos con diferentes volúmenes de perforación ensayados en este proyecto cumplan con este criterio del 75% (para ser clasificados como tipo M) y con la resistencia mínima a compresión para mampostería no estructural (NTC-4076, 1997).

2.4.3 Norma NTC 174. Especificaciones de los agregados para concreto.

La norma NTC 174 (2000) establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos, aclarando que, para agregado fino, este debe estar compuesto de arena natural, arena triturada o una combinación de estas que cumplan con el siguiente análisis granulométrico.

Tabla 5.

Análisis granulométrico NTC 174.

Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	Porcentaje que pasa
9.75 mm	100
4,75 mm	95-100
2,36 mm	80-100
1,18 mm	50-85
600 µm	25-60
300 µm	10-30
150 µm	2-10

2.5 Investigaciones sobre ladrillos con PET

La recopilación de información se tomó de las bases de datos de Google Académico y el repositorio virtual de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander. Los artículos presentan diferentes metodologías y avances en esta investigación. Apéndice A.

2.6 Investigaciones sobre ladrillos con PET

En el método de elementos finitos (FEM), la geometría de un medio continuo se aproxima mediante un proceso de discretización. Para el método de elementos finitos, se aproxima la geometría de un medio continuo mediante su discretización física, dividiendo el modelo en un número finito de elementos, cuyos comportamientos se definen por parámetros asociados a los nodos (puntos de unión entre elementos). La solución del sistema se aproxima en función de las matrices de desplazamiento y rigidez de cada nodo independiente, la unión de nodos y elementos se conoce como malla, en cuanto menor sea el tamaño de la malla y mayor sea el número de elementos, más preciso serán los resultados del análisis (Moreno, 2005)

3. Metodología

Este proyecto de investigación se ejecutará en cinco etapas que garantizarán el cumplimiento de los objetivos específicos y facilitará la replicación de los procedimientos por otros investigadores en el futuro.

En el proyecto se fabricarán ladrillos con dimensiones estándar de 23x11x5 cm, optimizando su proceso de fabricación mediante el aumento de la temperatura y la incorporación de orificios que ocupen máximo el 25% del volumen total del ladrillo (316,25 cm³), y que cumplen con las normas técnicas colombianas NTC-4205 (2000), NTC 174 (2000), y NTC-4076 (1997).

3.1 Caracterización de la arena fina

El proceso inició con la caracterización de tres tipos diferentes de arena, mediante la determinación de su granulometría. Estas arenas provienen de la cantera del Río Chicamocha (Mach), Pavimentos Andino (Mapa) y de la cantera de Rionegro (Marn), aclarando que se

utilizó la misma muestra de arena de Chicamocha del proyecto de investigación de Bermúdez y Cáceres (2023), La caracterización se basó en la NTC 174 (2000) para una muestra de 1000 gramos, en la que se realizó el proceso de tamizado y se utilizó la metodología del sistema unificado de clasificación de suelos SUCS (CIVIL ENGINEERING TUTORIALES, 2017). Para ello, se calcularon el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura utilizando las siguientes ecuaciones.

Ecuación 1.

Coeficiente de uniformidad.

$$\text{Coeficiente de uniformidad} = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 2.

Coeficiente de curvatura.

$$\text{Coeficiente de curvatura} = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

Donde:

D10: Diámetro de las partículas para el cual el 10% del material pasa.

D30: Diámetro de las partículas para el cual el 30% del material pasa.

D60: Diámetro de las partículas para el cual el 60% del material pasa.

Además, se determinó el módulo de finura con la siguiente ecuación, con el objetivo de medir la distribución de tamaños de las partículas de cada una de las muestras, teniendo en cuenta una serie de tamices estandarizados en la norma NTC 174 (2000). Este valor no debe ser menor de 2,3 ni mayor de 3,1 para asegurar que el material tenga buena cohesión, resistencia y durabilidad.

Ecuación 3.

Módulo de finura.

$$MF = \frac{\sum \%ret \text{ acumulado (Tamices)}}{100}$$

Donde:

Tamices: 3/8"+N4+N8+N16+N30+N50+N100.

3.2 Caracterización del polietileno de tereftalato

El material PET reciclado y triturado proviene de la empresa Replasander Ltda, la cual lo entrega con un tamaño aproximado de entre 2 milímetros por partícula, sin embargo para confirmar el tamaño de las partículas, se realizó un análisis granulométrico utilizando 1000 gramos de material.

3.3 Elaboración y ensayo de las probetas de material compuesto

Para modelar con precisión en el software SolidWorks y determinar la distribución geométrica óptima de las perforaciones, fue crucial tener propiedades del material como lo son el coeficiente de Poisson, el límite elástico, el módulo elástico y la densidad.

3.3.1 Densidad del material

En esta etapa, fue esencial determinar la densidad de los ladrillos fabricados en el proyecto de grado de Bermúdez y Cáceres (2023), asegurando que la dosificación empleada en las probetas a ensayar reflejara un comportamiento similar al del material. La densidad se calculó utilizando la siguiente ecuación.

Ecuación 4.

Densidad del material.

$$\delta = \frac{\text{Masa del ladrillo}}{\text{Volumen del ladrillo}}$$

Se realizó un promedio de cinco datos obtenidos y, una vez conocida la densidad del material, se inició la fabricación de las probetas.

3.3.2 Dosificación del material y elaboración de probetas

Para determinar la dosificación óptima de plástico PET y arena, se fabricó tres especímenes por cada dosificación, para un total de cuatro dosificaciones diferentes que cumplen con la relación 22,5 % PET, 77,5 % Arena.

Tabla 6.

Dosificación probetas.

Dosificación	Arena [g]	PET [g]
D1	384	112
D2	364	104
D3	344	100
D4	304	88

3.3.2.1 Moldeado de probetas. El pesaje de los materiales correspondientes se dividió en cuatro muestras iguales para asegurar una altura adecuada que permita su moldeado y mezclado sin desperdiciar material. Por otra parte el molde cilíndrico, previamente armado y engrasado para evitar que el material se adhiriera a sus paredes, se colocó en el horno, el cual mantuvo una temperatura de 260°C, apta para que al momento de depositar la primera capa de material, el PET alcanzara rápidamente su punto de fusión por completo.

3.3.2.2 Compactación y mezclado. Aproximadamente cada 5 minutos, se retiró el molde del horno para mezclar el material. Debido a las cualidades de fraguado del material, este proceso debe realizarse de forma muy rápida, antes de que se endurezca y pierda trabajabilidad. Transcurrido 15 minutos se depositó la siguiente muestra y se repitió con las dosificaciones restantes hasta disponer de la totalidad del material en el molde, y que presentara un aspecto homogéneo, sin evidencias de partículas de PET ni de arena sin mezclar. Posteriormente se colocó un dispositivo tipo pistón en la parte superior del molde, y con un gato hidráulico se compacto la muestra caliente hasta la altura deseada. Apéndice B.

3.3.2.3 Desencofrado y toma de mediciones. Una vez completada la compactación, se espera 20 minutos mientras el material se enfría y se retira el anillo superior y el pistón de la probeta, y utilizando el gato hidráulico se procede a desmoldarlas. Luego se realiza la toma de peso y se miden las alturas y diámetros, siguiendo el protocolo de medición descrito en el apéndice B. Todo esto para calcular la densidad real de cada probeta y determinar cuál de las dosificaciones de material se aproxima más a la densidad del material de los ladrillos, obtenida con la ecuación 4.

Ecuación 5.

Volumen de la probeta.

$$\text{Volumen de la probeta} = \frac{\pi * (D_{prom})^2}{4} * h_{prom}$$

Ecuación 6.

Densidad del material.

$$\text{Densidad del material} = \frac{\text{Masa de la probeta}}{\text{Volumen de la probeta}}$$

Para la densidad, se permiten variaciones del 1% respecto al valor teórico de la muestra, Aquellas muestras que no cumplan con esta especificación serán descartadas y no se utilizarán para realizar los ensayos posteriores.

3.3.3 Limite elástico y modulo elástico

Se realizó un ensayo de compresión simple en la maquina universal electromecánica MTS-Exceed, en la que se utilizaron probetas fabricadas de cada espécimen de arena con la dosificación óptima determinada anteriormente, para evaluar las propiedades mecánicas del material compuesto bajo cargas de compresión. El límite elástico se refiere al punto a partir del cual el material deja de comportarse de manera elástica, donde se producen deformaciones plásticas permanentes. Por otro lado, el módulo elástico mide la rigidez del material, describiendo la relación entre el esfuerzo y la deformación en el rango elástico.

Durante el ensayo, se procesaron en un archivo de Excel los datos adquiridos de la máquina MTS de carga y desplazamiento axial en tiempo real. A partir de estos datos, se calculó los esfuerzos y deformaciones de cada instante de tiempo y se construyeron las curvas esfuerzo-deformación. Se identificó el punto donde la curva dejó de ser lineal y redujo su carga significativamente y por medio de una regresión lineal se calculó la pendiente de la curva esfuerzo-deformación. Se analizaron los resultados obtenidos y se compararon los valores de las tres muestras con valores reportados en la literatura y valores de ladrillos macizos con el fin de validar la precisión del experimento.

Ecuación 7.

Esfuerzo.

$$\sigma = \frac{\text{Fuerza axial}}{\text{Area}}$$

Ecuación 8.

Deformación.

$$\varepsilon = \frac{\text{Desplazamiento}}{\text{Dimensión original}}$$

3.3.3.1 Desencofrado y toma de mediciones. Una vez identificada la muestra de arena con mejor desempeño, se realizaron múltiples repeticiones del ensayo (17 ensayos) para garantizar la reproducibilidad de los resultados y reducir la incertidumbre de las mediciones. Posteriormente, ya con una muestra de 24 datos, se llevó a cabo un análisis estadístico para evaluar la dispersión de los datos de la muestra en relación con la media. Se calcularon la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación; para visualizar la distribución de los valores obtenidos, se generó una curva de distribución normal o campana de Gauss.

Ecuación 9.

Varianza.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2$$

Ecuación 10.*Desviación estándar.*

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (Xi - \bar{x})^2}$$

Ecuación 11.*Coefficiente de variación.*

$$CV = \left(\frac{S}{\bar{x}}\right) * 100$$

Donde:

S²: Varianza muestral.**S**: Desviación muestral.**n**: Número de datos en la muestra.**CV**: Coeficiente de variación.**Xi**: Limite elástico y modulo elástico.**X**: Limite elástico y modulo elástico promedio.**3.3.4 Coeficiente de Poisson**

Para determinar el coeficiente de Poisson, el cual describe la relación entre la deformación transversal y la deformación longitudinal cuando el material es sometido a una carga axial de compresión, fue necesario realizar modificaciones al ensayo original en la maquina universal electromecánica de sistema MTS-Exceed. Esta máquina está diseñada principalmente para registrar desplazamientos longitudinales a lo largo del eje donde se aplica la carga, por lo que se implementó un montaje adicional en un lado posterior. Apéndice C.

Se colocó un deformímetro en uno de los lados de la probeta para medir los desplazamientos transversales en tiempo real, además, se grabó un video del ensayo para registrar de forma precisa los desplazamientos transversales en cada instante de tiempo (intervalos de 1 segundo). Al mismo tiempo, los desplazamientos longitudinales fueron registrados automáticamente por la maquina MTS en el mismo intervalo de tiempo. Para

asegura la correcta alineación y estabilidad del deformímetro, se fijó firmemente con silicona, evitando que la vibración de la maquina afectara las mediciones.

A partir de los datos obtenidos, tanto del deformímetro como de la maquina universal, se procesaron en un archivo Excel las deformaciones transversales y longitudinales a intervalos de 1 segundo utilizando las dimensiones originales de la probeta como referencia, a su vez se interpolo los puntos medio de los segundos que en la maquina entregaba. Cabe aclarar que hay ensayos más eficientes para determinar este valor como el expuesto en la norma NTC 4025 (2019). Sin embargo en el laboratorio no se cuenta con estos equipos.

Ecuación 12.

Coefficiente de Poisson.

$$v = \frac{\varepsilon \text{ transversal}}{\varepsilon \text{ longitudinal}}$$

Donde:

V: Coeficiente de Poisson.

ε transversal: Deformación perpendicular a la dirección de la carga.

ε longitudinal: Deformación paralela a la dirección de la carga.

3.3.4.1 Análisis estadístico del coeficiente de Poisson. Se llevó a cabo un análisis estadístico de las 24 muestras para evaluar la dispersión de los datos de la muestra en relación con la media. Se calcularon la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación; para visualizar la distribución de los valores obtenidos, se generó una curva de distribución normal o campana de Gauss aplicando las ecuaciones 9,10 y 11.

3.4 Modelado en SolidWorks

Para simular el comportamiento del material compuesto en condiciones específicas, se utilizó el software SolidWorks versión estudiantil para realizar un análisis estático por medio de elementos finitos.

3.4.1 Modelo Base

Inicialmente se creó un bloque sólido cuyas dimensiones eran iguales a los ladrillos realizados (23x11x5), se definió un nuevo material, basándose en los resultados experimentales obtenidos previamente, tales como el límite elástico, el módulo elástico, coeficiente de Poisson y densidad, características importantes al momento de modelar el comportamiento del ladrillo al someterse a una carga a compresión. El material fue asignado al ladrillo, asumiendo un comportamiento isotrópico, lo que implica que sus propiedades mecánicas son uniformes en todas las direcciones. Las propiedades adicionales no se especificaron sin embargo se recomienda para proyectos futuros que se realice una caracterización completa del material compuesto. Dado que el software de simulación realiza los cálculos de forma matemática, fue necesario redondear levemente las aristas del ladrillo. Las uniones rectas entre las aristas generan puntos de concentración de esfuerzos o concentradores infinitos, ya que, al considerar un punto como una superficie extremadamente pequeña, cercana a cero, la fuerza aplicada se divide en un área tan diminuta que provoca valores de esfuerzo irrealmente altos por lo que redondear permite obtener resultados más precisos y representativos de la distribución de esfuerzos en la estructura. Apéndice D.

3.4.2 Análisis estático por elementos finitos

3.4.2.1 Condiciones de frontera. En el desarrollo del análisis estático se simuló al inicio el caso 0 teniendo en cuenta el comportamiento experimental del ladrillo, para eso se empezó con las condiciones de carga aplicando una fuerza distribuida sobre la cara superior del bloque que fuera equivalente a la utilizada en los ensayos experimentales para simular una fuerza de compresión (17,23 MPa). Posteriormente se aplicó una sujeción fija en la base para simular que no se moviera en ninguna dirección, simulando que la base del ladrillo está apoyada sobre una superficie rígida.

3.4.2.2 Mallado. En el proceso de mallado, se dividió el sólido en elementos más pequeños pequeños capaces de representar adecuadamente su comportamiento. El software utiliza elementos de forma tetraédrica o cúbica, los cuales se conectan entre sí a través de nodos. Los elementos tetraédricos son utilizados para geometrías más complejas e irregulares, mientras que los elementos cúbicos son utilizados principalmente para geometrías más simples y regulares como el caso del ladrillo permitiendo una mayor precisión por nodo y menor cantidad de elementos necesarios para logra un buen detalle.

Para garantizar la precisión del análisis, se realizó el refinamiento del mallado, buscando la convergencia de los resultados. Esto significa que se verificó que los resultados obtenidos con diferentes densidades de malla no presentaran variaciones significativas, asegurando precisión en el análisis. Para obtener un mallado aún más preciso, es recomendable utilizar software especializado en análisis por elementos finitos, Ansys, que permite realizar un refinamiento detallado de la malla en áreas críticas, como las perforaciones o irregularidades específicas en la geometría (NSIV OpenFOAM & Ansys, 2022).

3.4.2.3 Factores de resultados. Una vez ejecutado el análisis, el software genera los resultados clave, como el trazado del factor de seguridad, tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias, y fatiga, entre otros. Para verificar el correcto funcionamiento del modelo en el caso base (caso 0), se revisan las tensiones, desplazamientos y el factor de seguridad utilizando el criterio de Von Mises; método comúnmente utilizado para evaluar cuándo un material falla al someterse a cargas. Este criterio predice que la falla ocurre cuando el material alcanza un valor crítico, el cual corresponde al límite elástico al comprobarse que es un material rígido con poca zona plástico. En el contexto de esta investigación, se enfatiza que, una vez que el ladrillo supere la zona elástica, se considera que ha fallado. Finalmente se comparan estos resultados con el comportamiento observado en la realidad, y se toma

como criterio principal para verificar el correcto funcionamiento del modelo, el desarrollo de la falla, el patrón de fractura del ladrillo tras el ensayo experimental y que en su generalidad mantenga una seguridad estructural al mantener un factor de seguridad de 1. Finalmente se ajustan las unidades para que las gráficas expresen los resultados en MPa. Apéndice D.

Ecuación 13.

Factor de seguridad.

$$\text{Factor de seguridad Von Mises} = \frac{\sigma \text{ VonMises}}{\sigma \text{ Limite Elastico.}}$$

3.4.3 Modelos perforados

Dada las condiciones especificadas por la norma NTC-4205 (2000) y NTC-4076 (1997), que establecen un espesor mínimo de pared y tabique de 2 cm, se comenzó a considerar diferentes distribuciones de perforaciones de manera manual, asegurando que cada configuración geométrica cumpliera con esta restricción. Para ello se modelaron varias distribuciones de diferente cantidad de perforaciones (dos, tres, cuatro) utilizando dimensiones de barras o perfiles comerciales que facilitaran su fabricación. Cada diseño se enfocó en maximizar el volumen de perforación, respetando el límite máximo de 25% del volumen total del ladrillo.

En cada modelo de perforaciones se ajustaron las distancias entre perforaciones, incrementando o disminuyendo el espesor de pared y tabique, pero siempre asegurando que el espesor mínimo de 2 cm no se viera comprometido. Se modeló en el software con las mismas condiciones del modelo base pero con las perforaciones incluidas y se analizó la mayoría de estas configuraciones. Sin embargo se observó que no se lograba cumplir de manera efectiva con los requisitos de resistencia mínimos establecidos por la Tabla 4 al observarse factores de seguridad muy bajos, y desgarramiento del sólido que afectan su

seguridad estructural, lo que llevó a la conclusión de que este método manual no era una solución práctica.

3.4.3.1 Análisis de Topología. Por lo tanto se investigó una alternativa más eficiente y se encontró que SolidWorks ofrece un análisis de topología, herramienta que permite asignar restricciones en su geometría, masa, resistencia y desplazamientos, y visualizar cuales son las fibras estructurales que soportan los esfuerzos en el sólido al someterse a diferentes cargas. Con un estudio de topología, puede establecerse un objetivo de diseño para encontrar la mayor rigidez al cociente de peso, minimizar la masa o reducir el desplazamiento máximo de un componente a partir de iteraciones que realiza el mismo Software (Estudio de topología - Ayuda de SOLIDWORKS, 2021). A través de este análisis topológico, se puede determinar qué cantidad de masa se puede eliminar del ladrillo sin comprometer su resistencia, optimizando así el diseño de las perforaciones.

3.4.3.2 Configuración óptima de perforaciones. En el análisis de la configuración óptima de perforaciones del ladrillo, se evaluaron diversas configuraciones a través del modelado, analizando cada una en función del criterio del factor de seguridad, garantizando que el factor de seguridad general se mantuviera en 1, lo que garantiza la seguridad estructural del elemento.

Además se estableció un valor permisible de 0,9 en los puntos de concentración de esfuerzos de los ladrillos. Este enfoque permite tolerar ciertas variaciones en la resistencia debido al análisis matemático del modelo, asegurando que las configuraciones soporten la carga sin comprometer la integridad del ladrillo al someterse al esfuerzo mínimo planteado por la norma de 10 MPa. Apéndice D.

3.5 Fabricación del ladrillo

3.5.1 Acondicionamiento del horno y del molde

El horno utilizado para fundir los ladrillos se fabricó a partir un armazón proporcionado por el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, modificado para operar con resistencias eléctricas. Se instalaron resistencias en la parte superior e inferior para alcanzar una temperatura de 300 °C en la cámara, con una capacidad máxima de 400 °C, pensando en proyectos futuros. Además, se repararon áreas dañadas con material refractario, mejorando la eficiencia energética y reduciendo costos operativos. Se integró un controlador de temperatura que monitorea las condiciones internas. Una vez definido el diseño óptimo de perforaciones, se modificó el molde para ladrillos macizos, incorporando barras de acero de 31,8 mm de diámetro y 5 centímetros de altura soldadas externamente en la base del molde para evitar que el cordón de soldadura alterara la geometría del ladrillo, asegurando que las perforaciones cumplieran con las dimensiones y requisitos establecidos en la Figura 13.

3.5.2 Dosificación del material y elaboración de muestra

De acuerdo la dosificación de material compuesto utilizada en el proyecto de grado de Bermúdez y Cáceres (2023), se determinó las cantidades de masa de arena y PET a utilizar, considerando la reducción del volumen provocado por las perforaciones, lo que implica que se requiera menos material debido a los espacios vacíos generados por estas.

Ecuación 14.

Masa de arena.

$$\text{Masa de arena} = \frac{\text{Volumen ladrillo perforado} * \text{Masa arena } M}{\text{Volumen ladrillo macizo.}}$$

Ecuación 15.

Masa de PET.

$$\text{Masa de PET} = \frac{\text{Volumen ladrillo perforado} * \text{Masa PET } M}{\text{Volumen ladrillo macizo.}}$$

Donde:

Masa arena M: Masa de arena utilizada en la dosificación para ladrillo macizo

Masa PET M: Masa de plástico PET utilizada en la dosificación para ladrillo macizo.

3.5.2.1 Moldeado de ladrillos. El pesaje de los materiales correspondientes se dividió en tres muestras iguales para asegurar una altura adecuada que permita su moldeado y mezclado sin desperdiciar material. Por otra parte el molde perforado, previamente armado y engrasado para evitar que el material se adhiriera a sus paredes, se colocó en el horno, el cual mantuvo una temperatura de 300 °C, apta para que al momento de depositar la primera capa de material, el PET alcanzara rápidamente su punto de fusión por completo.

3.5.2.2 Compactación y mezclado. Cada 5 minutos, se retiró el molde del horno para mezclar el material, asegurando que no se endureciera por sus cualidades de fraguado. Transcurrido 15 minutos se añadió la siguiente muestra y se repitió el proceso hasta depositar todo el material en el molde, y que presentara un aspecto homogéneo, sin evidencias de partículas de PET ni de arena sin mezclar. Posteriormente se colocó la tapa del molde y con una prensa se compactó la muestra hasta la altura de las barras (5 cm). Se da un tiempo prudente de 50 minutos para el enfriamiento del molde y se procede finalmente a retirar el ladrillo. Todo este procedimiento se encuentra con registro fotográfico en el apéndice E.

3.5.2.3 Desencofrado. Después de 50 minutos, se retira el molde de la prensa y se procede al desmolde. Inicialmente el ladrillo se desencofra fácilmente de las paredes laterales del molde, pero queda completamente adherido a la base, ya que el plástico, al llega a su punto de fusión durante el proceso de compactación, se adhiere a la superficie de las barras y la base. Para solucionar este inconveniente, se aplicó una capa gruesa de aluminio sobre el molde y las barras, lo que facilitó el proceso de desencofrado.

4. Resultados

4.1 Caracterización de las arenas finas

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), las muestras de Chicamocha (Mach) y Rionegro (Marn) se clasifican como arenas pobremente graduadas (SP), ya que su porcentaje de finos es inferior al 5%, su coeficiente de uniformidad es menor a 6 (3.76 y 3.65) y el coeficiente de curvatura es inferior a 1 (0.94 y 0.85). Por otro lado, la muestra de Pavimentos Andino (Mapa) se clasifica como arena bien graduada (SW) porque, aunque también tiene un porcentaje de finos inferior al 5%, su coeficiente de uniformidad es superior a 6 (6.2) y su coeficiente de curvatura se encuentra entre 1 y 3 (1,04).

Tabla 7.

Granulometría de la arena de Chicamocha (Mach).

Tamiz NTC 32	Peso de suelo retenido [g]	%Retenido parcial	%Pasa	%Pasa Normativa
3/8 [9,5 mm]	0	0	100	100
N4 [4,75 mm]	13.0	1.3	98.7	95-100
N8 [2,36 mm]	28.0	2.8	95.9	80-100
N16 [1,18 mm]	152.0	15.2	80.7	50-85
N30 [0,6 mm]	245.0	24.5	56.2	25-60
N50 [0,3 mm]	305.0	30.5	25.7	10-30
N100 [0,15 mm]	207.0	20.7	5.0	2-10
N200 [0,074 mm]	31.0	3.1	1.9	
Fondo	19.0	1.9	0	

Gravas=1.27%

Arenas=96.24%

Finos=2.49%

Tabla 8.

Granulometría de la arena de Pavimentos Andino (Mapa).

Tamiz NTC 32	Peso de suelo retenido [g]	%Retenido parcial	%Pasa	%Pasa Normativa
3/8 [9,5 mm]	0.0	0.0	100	100
N4 [4,75 mm]	0.0	0.0	100	95-100
N8 [2,36 mm]	99.0	9.9	90.1	80-100
N16 [1,18 mm]	213.0	21.3	68.8	50-85
N30 [0,6 mm]	243.0	24.3	44.5	25-60
N50 [0,3 mm]	211.0	21.1	23.4	10-30
N100 [0,15 mm]	133.0	13.3	10.1	2-10
N200 [0,074 mm]	87.0	8.7	1.4	
Fondo	14.0	1.4	0	

Gravas=0.0%

Arenas=98.6%

Finos=1.4%

Tabla 9.

Granulometría de la arena Marn.

Tamiz NTC 32	Peso de suelo retenido [g]	%Retenido parcial	%Pasa	%Pasa Normativa
3/8 [9,5 mm]	0.0	0.0	100	100
N4 [4,75 mm]	6.0	0.6	99.4	95-100
N8 [2,36 mm]	30.0	3.0	96.4	80-100
N16 [1,18 mm]	134.0	13.4	83.0	50-85
N30 [0,6 mm]	255.0	25.5	57.5	25-60
N50 [0,3 mm]	281.0	28.1	29.4	10-30
N100 [0,15 mm]	238.0	23.8	5.6	2-10
N200 [0,074 mm]	45.0	4.5	1.1	
Fondo	11.0	1.1	0	

Gravas=0.6%

Arenas=98.3%

Finos=1.1%

Figura 4.

Curva granulométrica de la arena Mach y arena Mapa.

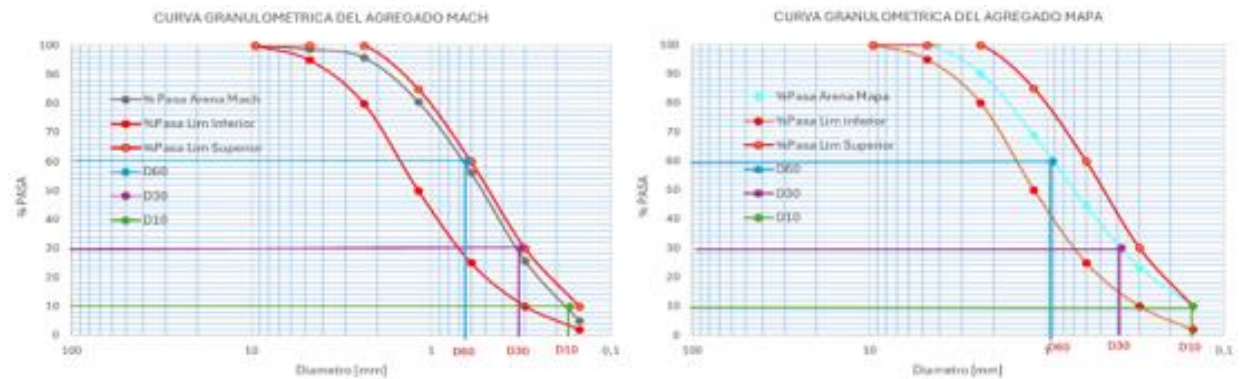


Figura 5.

Curva granulométrica de la arena Marn.

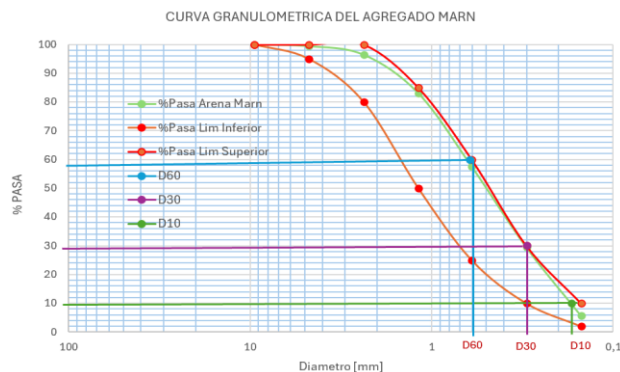


Tabla 10.*Coefficientes SUCS.*

Arena	Coefficiente de uniformidad	Coefficiente de curvatura
Mach	3.76	0.94
Mapa	6.20	1.04
Marn	3.65	0.85

4.2 Caracterización del PET reciclado

Tabla 11.*Granulometría del PET reciclado.*

Tamiz	Peso de suelo retenido [g]	%Retenido parcial	%Pasa
N4	13.8	1.38	98.62
N8	81.7	8.17	90.45
N10	776.6	77.66	12.79
N16	97.6	9.76	3.03
N40	25.4	2.54	0.49
Fondo	4.9	0.49	0.00

4.3 Elaboración y ensayo de las probetas de material compuesto

Se elaboraron un total de 48 probetas, con diferentes propiedades.

4.3.1 Densidad del material

Se registraron los datos de masa y volumen de 5 ladrillos completamente macizos, fabricados siguiendo la metodología del proyecto de grado utilizando la muestra Mach. A partir de estas muestras se calculó la densidad.

Tabla 12.*Densidades del ladrillo.*

Ladrillo	Masa [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]
L1	2486	1265	1.965
L2	2497	1265	1.974
L3	2486	1265	1.965
L4	2490	1265	1.968
L5	2495	1265	1.972
Promedio	2491	1265	1.969

4.3.2 Dosificación del material y elaboración de probetas

De las cuatro dosificaciones ensayadas, D2 es aquella que presenta valores de densidad más cercanos a la densidad del ladrillo.

Tabla 13.

Dosificaciones de material.

Ladrillo	Densidad [g/cm ³]	Densidad promedio [g/cm ³]
D1	2.114	2.131
	2.123	
	2.156	
D2	1.966	1.965
	1.964	
	1.965	
D3	2.106	2.116
	2.126	
	2.114	
D4	1.941	1.946
	1.946	
	1.954	

4.3.2.1 Moldeado de probetas. El material se dividió en muestras iguales de 91 gramos de arena y 26 gramos de plástico PET, lo que garantizó un proceso de moldeado y mezclado sin desperdicios significativos, salvo el material adherido a la barra de mezclado en la última capa. Además, el molde se calentó durante 15 minutos, lo que permitió que la primera capa alcanzara una temperatura adecuada para una reacción eficiente sin derretir la grasa presente.

4.3.2.2 Compactación y mezclado. Se aseguró un mezclado adecuado para evitar que el material se adhiriera a la base y se mantuviera nivelado. Tras tres ciclos de calentamiento de 15 minutos, el material adquirió una consistencia fraguada, facilitando el mezclado, se utilizó un taladro para vibrar la muestra y eliminar el aire atrapado. Se marcó el pistón para indicar la altura de compactación, pero al borrarse la marca por la temperatura, se hizo un corte como referencia visual. Se garantizó que el pistón entrara verticalmente en el material y se colocó un bloque entre la probeta y el gato hidráulico para proteger el aceite del calor.

4.3.2.3 Desencofrado y toma de mediciones. La cantidad de grasa utilizada al inicio del proceso fue fundamental para facilitar el desencofrado. Con la ayuda de una reja disponible en el laboratorio, se utilizó el gato hidráulico para aplicar una fuerza considerable que permitió retirar el molde. Sin embargo, en futuros proyectos este proceso se puede mejorar aplicando un material deslizante que no se mezcle con el material compuesto.

Tabla 14.

Densidad de dosificaciones.

Arena	Probeta	Densidad [g/cm ³]	Densidad promedio [g/cm ³]
Mach	M4	1.966	1.967
	M5	1.964	
	M6	1.965	
	M13	1.968	
	M14	1.967	
	M15	1.968	
	<u>M16</u>	1.967	
	M17	1.968	
	M18	1.965	
	M19	1.963	
Mapa	M20	1.967	1.977
	M21	1.963	
	M22	1.965	
	M23	1.971	
	<u>M24</u>	1.968	
	M25	1.971	
	M26	1.971	
	M27	1.969	
Marn	M28	1.972	1.970
	M29	1.971	
	M30	1.969	
	M31	1.968	

Las densidades obtenidas fueron muy similares, siendo la más cercana al valor esperado la de la dosificación de la muestra Marn. Por esta razón, y con base en los resultados del límite elástico y de Poisson, se añadieron 17 probetas adicionales y se calculó el promedio de sus densidades.

Tabla 15.*Densidad Marn.*

Arena	Probeta	Densidad [g/cm ³]	Densidad promedio [g/cm ³]
Marn	M25	1.971	1.970
	M26	1.971	
	M27	1.969	
	M28	1.972	
	M29	1.971	
	M30	1.969	
	<u>M31</u>	1.968	
	M32	1.969	
	M33	1.968	
	M34	1.970	
	M35	1.970	
	M36	1.970	
	M37	1.972	
	M38	1.970	
	<u>M39</u>	1.971	
	M40	1.969	
	M41	1.970	
	M42	1.970	
	M43	1.968	
	M44	1.973	
	M45	1.972	
	M46	1.970	
	M47	1.972	
	M48	1.969	

4.3.3 Limite elástico y modulo elástico

El límite y el módulo elásticos se calcularon a partir de la fuerza y los desplazamientos registrados por la máquina de compresión MTS. La carga fue aplicada a una velocidad de 3mm por minuto sobre el área de aplicación (23 cm x 5 cm).

Tabla 16.*Limite elástico de probetas.*

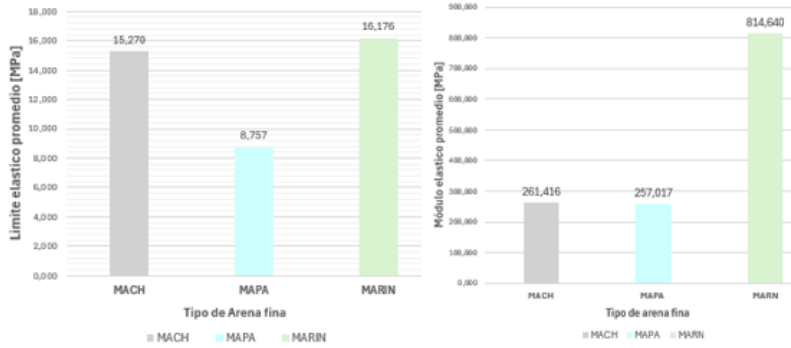
Arena	Probeta	Limite elástico [MPa]	Limite elástico promedio [MPa]
Mach	M4	14.62	15.27
	M5	14.92	
	M6	15.45	
	M13	14.68	
	M14	15.17	
	M15	15.72	
	<u>M16</u>	16.33	

	M17	8.01	
	M18	8.91	
	M19	NR	
	M20	8.04	
Mapa	M21	9.24	8.76
	M22	9.80	
	M23	7.97	
	M24	9.32	
	M25	16.60	
	M26	16.10	
Marn	M27	16.08	
	M28	15.62	16.18
	M29	15.61	
	M30	17.02	
	M31	16.25	

Tabla 17.*Modulo elástico de las probetas.*

Arena	Probeta	Modulo elástico [MPa]	Modulo elástico promedio [MPa]
	M4	246.64	
	M5	274.67	
	M6	257.55	
Mach	M13	255.66	261.42
	M14	257.10	
	M15	257.85	
	M16	280.44	
	M17	304.87	
	M18	206.95	
	M19	NR	
	M20	290.48	
Mapa	M21	238.15	257.02
	M22	242.66	
	M23	239.66	
	M24	276.35	
	M25	811.18	
	M26	843.98	
	M27	862.70	
Marn	M28	764.80	814.64
	M29	814.01	
	M30	867.56	
	M31	738.25	

Figura 6.*Limite elástico y modulo elástico promedio.*



La diferencia significativa entre los módulos elásticos puede deberse principalmente a dos factores: La presencia de partículas blandas o impurezas, posiblemente asociadas con las propiedades geotécnicas de las arenas Mach o Marn. Esto sugiere la necesidad de realizar en futuros estudios, el ensayo de Materia orgánica descrito en la NTC-127; y la metodología de mezclado utilizada. En las muestras de Chicamocha (Mach) y de Pavimentos Andino (Mapa) se empleó una varilla y se mezcló manualmente mientras que en la muestra con arena de Rionegro (Marn) se utilizó un taladro con una broca, lo cual permitió asegurar una mejor homogeneidad de la muestra y la eliminación de vacíos al asegurar una velocidad y movimiento más constante, favoreciendo una mayor compactación de la probeta.

Figura 7.

Ficha técnica del PET.

*Propiedades	
• Propiedades generales	
Densidad	1,29e3 - 1,39e3 kg/m ³
Precio	3,99e3 - 5,41e3 COP/kg
• Propiedades mecánicas	
Módulo de Young	2,8 - 3 GPa
Módulo de cortante	0,994 - 1,49 GPa
Módulo en volumen	4,94 - 5,19 GPa
Coefficiente de Poisson	0,381 - 0,396
Limite elástico	50 - 55 MPa
Resistencia a tracción	55 - 60 MPa
Resistencia a compresión	50 - 60 MPa
Elongación	280 - 320 % strain
Dureza-Vickers	2 - 5 HV
Resistencia a fatiga para 10 ⁷ ciclos	19,3 - 29 MPa
Tenacidad a fractura	4,75 - 5,25 MPa.m ^{0.5}

Al comparar los resultados obtenidos con la ficha técnica (Arbeláez, 2022), se observó que el valor más cercano corresponde a la muestra de Rionegro (Marn). Sin embargo, este hecho

no garantiza o niega la veracidad del ensayo, ya que la información disponible en la literatura está basada en el comportamiento del plástico virgen, que tiende a presentar valores altos en sus propiedades mecánicas. Al ser mezclado con arena fina, las propiedades del PET virgen se ven considerablemente reducidas debido a la interacción entre el plástico y las partículas de arena, lo que genera una disminución en la rigidez y resistencia de la mezcla. Al tratarse de un material compuesto, se procederá a utilizar la información obtenida de los ensayos.

Un aspecto relevante es que, en el proyecto de grado de Lisset Muñoz y Julián Serrano, se lograron resistencias promedio de 19,2 MPa con una mezcla de arena de Chicamocha (Mach) y plástico PET. En contraste, las muestras del presente proyecto alcanzaron una resistencia máxima promedio de 16,2 MPa. Debido a la falta de información detallada de los ensayos previos, se optó por fabricar y ensayar ladrillos macizos con arena de Chicamocha (Mach) y arena de Rionegro (Marn), siguiendo la metodología de Muñoz y Serrano, para corroborar los resultados obtenidos y comprender mejor la diferencia en las resistencias obtenidas entre ambos estudios.

Tabla 18.

Propiedades Ladrillo Mach.

Ladrillo Mach	Limite Elástico [MPa]	Modulo elástico promedio [g/cm ³]
L1	15.50	295.84
L2	16.10	279.63
L3	15.04	269.36
L4	14.61	262.08
L5	16.15	279.39
Promedio	15.48	277.28

Tabla 19.

Propiedades Ladrillo Marn.

Ladrillo Mach	Limite Elástico [MPa]	Modulo elástico promedio [g/cm ³]
L6	16.45	799.05
L7	17.01	810.79
L8	18.37	869.90
L9	16.70	797.50
L10	17.78	825.19
L11	17.05	815.06
Promedio	17.23	819.58

Las tablas 16, 17,18 y 19, muestran que los valores obtenidos de las probetas y los ladrillos son bastante similares , lo que indica un margen de error mínimo. Este se atribuye a variaciones en el mezclado y desencofrado. Las probetas, debido a su menor volumen y espacio limitado, dificultan la obtención de una mezcla homogénea al usar una varilla en un espacio reducida. En cambio, los moldes de los ladrillos permiten una mejor mezcla gracia a su mayor espacio y uso de la espátula. Además, el desencofrado de las probetas requiere mayor fuerza y golpes para extraerla del molde, lo que afecta su resistencia final.

4.3.3.1 Análisis estadístico del límite y modulo elástico. El límite y módulo elástico de la muestra Marn fueron los mejores, por lo que se añadieron 17 probetas adiciones, alcanzando un total de 24 probetas y obteniendo una muestra representativa.

Tabla 20.

Límite elástico promedio Marn.

Arena	Probeta	Límite elástico [MPa]	Límite elástico promedio [MPa]
Marn	M25	16.60	16.21
	M26	16.10	
	M27	16.08	
	M28	15.62	
	M29	15.61	
	M30	17.02	
	M31	16.25	
	M32	15.90	
	M33	15.86	
	M34	16.22	
	M35	16.04	
	M36	15.35	
	M37	16.88	
	M38	16.53	
	M39	16.81	
	M40	15.80	
	M41	15.65	
	M42	15.34	
	M43	15.60	
	M44	16.78	
	M45	17.23	
	M46	16.47	
	M47	17.02	
	M48	16.35	

Tabla 21.*Análisis estadístico del límite elástico.*

Limite elástico [MPa]	$[\sum (X_i - \bar{x})^2]$	S^2	S
16.60	0.186		
16.10	0.005		
16.08	0.008		
15.62	0.307		
15.61	0.312		
17.02	0.712		
16.25	0.006		
15.90	0.072		
15.86	0.095		
16.22	0.002		
16.04	0.016	0.25	0.50
15.35	0.670		
16.88	0.501		
16.53	0.128		
16.81	0.404		
15.80	0.141		
15.65	0.273		
15.34	0.699		
15.60	0.331		
16.78	0.013		
17.23	0.335		
16.47	0.087		
17.02	0.713		
16.35	0.031		

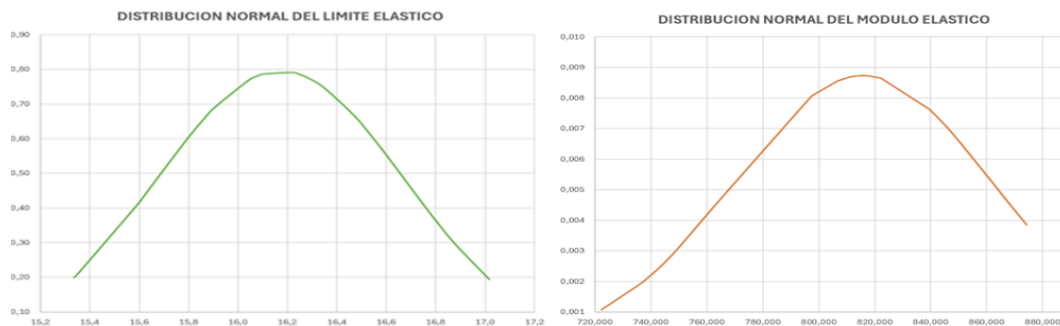
Tabla 22.*Modulo elástico promedio Marn.*

Arena	Probeta	Modulo elástico [MPa]	Modulo elástico promedio [MPa]
	M25	811.18	
	M26	843.98	
	M27	862.70	
	M28	764.80	
	M29	814.01	
	M30	867.56	
	M31	738.25	
	M32	839.63	
	M33	722.47	
	M34	867.14	
Marn	M35	736.85	815.88
	M36	806.94	
	M37	840.22	
	M38	807.00	
	M39	817.46	
	M40	874.27	
	M41	747.35	

M42	798.33
M43	822.38
M44	848.79
M45	861.53
M46	869.02
M47	797.22
M48	822.05

Tabla 23.*Análisis estadístico del módulo elástico.*

Modulo elástico [MPa]	$[\chi_i - \bar{x}]^2$	S^2	S
811.18	22.09		
843.98	789.59		
862.70	2192.07		
764.80	2609.21		
814.01	3.5		
867.56	2670.78		
738.25	6026.48		
839.63	564.04		
722.47	8725.51		
867.14	2627.51		
736.85	6245.81	2089.71	45.71
806.94	79.93		
840.22	592.42		
807.00	78.86		
817.46	2.50		
874.27	3409.34		
747.35	4696.42		
798.33	308.02		
822.38	42.24		
848.79	1083.04		
861.53	2083.88		
869.02	2823.82		
797.22	348.21		
822.05	38.06		

Figura 8.*Distribución normal del límite y módulo elástico.*

CV Limite Elástico= 3.1 %

CV Modulo Elástico= 5.6 %

El coeficiente de variación del límite elástico, indica que hay una menor dispersión entre los valores respecto a su media en comparación a los datos de modulo elástico, ambas curvas tienen un comportamiento simétrico, mostrando poca dispersión, sin embargo el módulo elástico es más sensible a variaciones en las condiciones de prueba, esto podría deberse a diferencias en la compactación, o la misma composición del agregado.

4.3.4 Coeficiente de Poisson

Para medir las deformaciones transversales, se utilizó un deformímetro con una precisión de lectura de hasta 0,001 mm. Se realizó el ensayo de compresión en la maquina universal MTS a una velocidad de 3 mm por minuto sobre el área de aplicación. El montaje del deformímetro se ubicó a una altura especifica, de manera que la punta de contacto tocara el centro de la probeta, garantizando así mediciones precisas. Para asegura la correcta alineación y estabilidad del dispositivo, se fijó firmemente con silicona, evitando que la vibración de la maquina afectara las mediciones. Aunque la probeta M25 se vio afectado por estas condiciones, se corrigió de inmediato.

Tabla 24.

Coeficiente de Poisson probetas.

Arena	Probeta	Coeficiente de Poisson	Coeficiente de Poisson promedio
Mach	M4	NR	NO REGISTRA
	M5	NR	
	M6	NR	
	M13	NR	
	M14	NR	
	M15	NR	
	<u>M16</u>	NR	
	M17	0.38	
	M18	0.46	
	M19	NR	
Mapa	M20	0.69	0.42
	M21	0.95	
	M22	0.30	
	M23	0.34	
	<u>M24</u>	0.22	
	M25	NR	

	M26	0.20	
	M27	0.24	
Marn	M28	0.39	0.37
	M29	0.73	
	M30	0.33	
	M31	0.34	

Con base en la ficha técnica (Arbeláez, 2022), se establece que los materiales granulares como la arena fina, suelen presentar módulos de Poisson bajos. Esto resulta en una disminución del módulo del material compuesto en comparación del PET virgen registrado en la ficha técnica.

4.3.4.1 Análisis estadístico del coeficiente de Poisson. Al igual que con el límite y módulo elástico, la muestra de Rionegro (Marn) obtuvo los mejores resultados, por lo que se hizo un análisis estadístico para evaluar la dispersión de los datos de una muestra representativa en relación con la media.

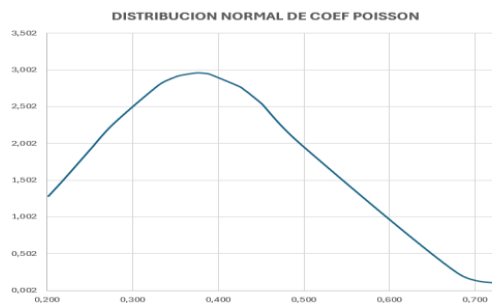
Tabla 25.

Coeficiente de Poisson Marn.

Arena	Probeta	Coeficiente de Poisson	Coeficiente de Poisson promedio
	M25	NR	
	M26	0.20	
	M27	0.24	
	M28	0.39	
	M29	0.73	
	M30	0.33	
	M31	0.34	
	M32	0.36	
	M33	0.42	
	M34	0.25	
Marn	M35	0.45	0.38
	M36	0.22	
	M37	0.39	
	M38	0.38	
	M39	0.22	
	M40	0.68	
	M41	0.50	
	M42	0.28	
	M43	0.35	
	M44	0.45	
	M45	0.43	
	M46	0.37	
	M47	0.23	
	M48	0.43	

Tabla 26.*Análisis estadístico del coeficiente de Poisson.*

Coefficiente de Poisson	$[\sum (X_i - \bar{x})^2]$	S^2	S
NR	NR		
0.20	0.03		
0.24	0.02		
0.39	0.00		
0.73	0.13		
0.33	0.00		
0.34	0.00		
0.36	0.00		
0.42	0.00		
0.25	0.02		
0.45	0.01		
0.22	0.03	0.02	0.14
0.39	0.00		
0.38	0.00		
0.22	0.02		
0.68	0.09		
0.50	0.01		
0.28	0.01		
0.35	0.00		
0.45	0.01		
0.43	0.00		
0.37	0.00		
0.23	0.02		
0.43	0.00		

Figura 9.*Distribución normal del coeficiente de Poisson.*

CV= 5.6 %

Aunque se obtuvo un valor promedio coherente, algunas muestras, mostraron coeficientes cercanos a 1, indicando que, al someterse a una carga, el material experimenta una deformación lateral casi igual a la deformación longitudinal. Sin embargo, en la práctica,

el material no se comporta de esta manera. Además el ensayo se vio limitado por la cámara utilizada, lo que afectó, la visibilidad de los datos debido a la definición y desenfoque de esta. Por lo tanto se recomienda emplear ensayos más eficientes para determinar este valor como el indicado en la NTC 4025 (2019).

4.4 Fabricación del ladrillo

4.4.1 Modelo Base

Se creó un nuevo material y se asignó al modelo asumiendo un comportamiento isotrópico, lo que implica que sus propiedades son uniformes en todas las direcciones. Apéndice D.

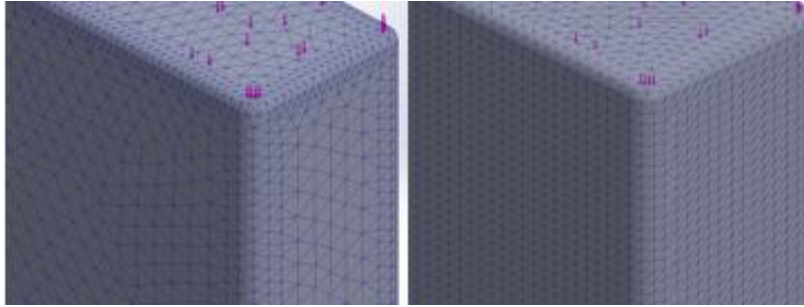
4.4.2 Análisis estático por elementos finitos

4.4.2.1 Condiciones de frontera. En la construcción, los ladrillos se fijan de manera permanente mediante mortero, lo que impide su movimiento una vez instalados. La carga vertical aplicada en la capa superior representa la fuerza externa a compresión que recibe. La combinación de esta carga y la sujeción fija en la base limite los desplazamientos, generando tensiones máximas en las zonas cercanas a las restricciones y deformaciones máximas concentradas en la región de la cara superior. Los resultados del modelo reflejan este comportamiento, replicando adecuadamente las condiciones observadas en la realidad.

4.4.2.2 Mallado. En los resultados del mallado, se observa que el uso de una malla con elementos cúbicos proporciona una mayor precisión, ya que estos elementos se adaptan mejor a la geometría del modelo permitiendo obtener con mayor detalle las características de la forma, tal como se muestra en la figura 10.

Figura 10.

Mallado Tetraédrico y Cubico.



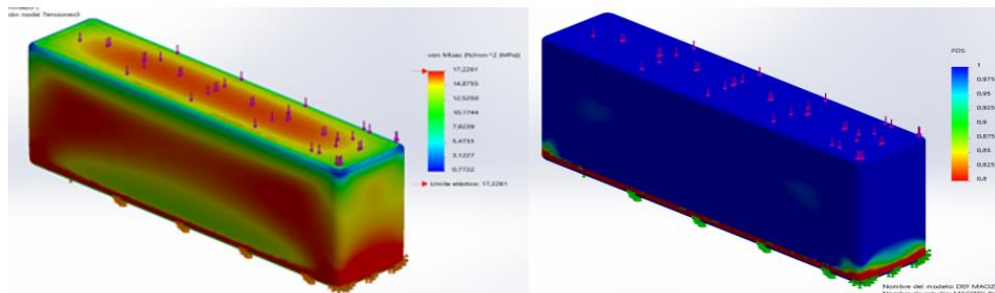
La convergencia de malla se alcanzó utilizando una malla estándar compuesta por 240552 elementos y 339079 nodos, El mallado cubico se generó a partir de elementos basados en triángulos rectángulos, con cada elemento teniendo dimensiones de 3 mm de ancho por 0,15 mm de alto. Estos parámetros garantizan una representación adecuada de la geometría y una mayor precisión en los resultados.

4.4.2.3 Factores de resultados. Los resultados de tensiones muestran que los esfuerzos en la cara superior del ladrillo se concentran en el centro, donde la carga es mayor al estar más alejado de los bordes libres y experimentar mayor restricción, mientras que los laterales permiten mayor libertad de deformación. Las esquinas del ladrillo son las zonas más críticas, con la mayor concentración de esfuerzos debido a la geometría discontinua y la restricción de movimiento, lo que limita su capacidad de deformarse. Además, la falla ocurre a 45° , común en materiales frágiles que indica la dirección de menor resistencia a la fractura. Por consiguiente, el caso base se valida con los resultados obtenidos experimentalmente, confirmando que el modelo refleja adecuadamente la realidad y facilita la evaluación de diferentes configuraciones de perforaciones. El análisis del factor de seguridad muestra que, aunque las esquinas del ladrillo han cedido, su integridad general se mantiene intacta. En la imagen adjunta, se puede observar que, a pesar de la falla en las esquinas, el resto del ladrillo continúa soportando la carga aplicada sin comprometer su estructura. Esta preservación

sugiere que, aunque se han alcanzado niveles críticos de esfuerzo en las esquinas, el ladrillo es capaz de resistir esfuerzos adicionales antes de enfrentar una falla catastrófica.

Figura 11.

Diagrama de tensiones y factor de seguridad caso 0.



4.4.3 Modelos perforados

Volumen máximo de perforaciones: 316,25 cm³.

Masa mínima del ladrillo: 1869,21 gramos.

Tabla 27.

Diámetros comerciales.

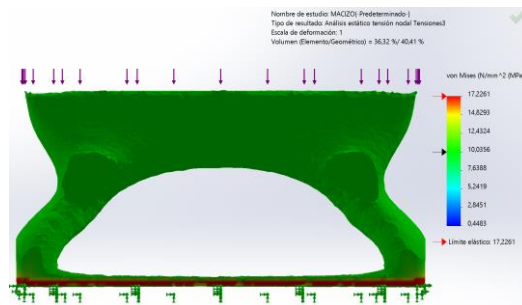
Diámetros de barras comerciales			Diámetros de perfiles comerciales.		
pulg	mm	Volumen [cm ³]	Nominal	Exterior [mm]	Volumen [cm ³]
1/2"	12.7	6.3	1/2"	20.7	16.8
5/8"	15.9	9.9	3/4"	26.1	26.8
3/4"	19.1	14.3	1"	32.9	42.5
7/8"	22.2	19.4	1 1/4"	42.2	69.9
1"	25.4	25.3	1 1/2"	48.3	91.6
1 1/4"	31.8	39.6	2"	59.9	140.9
2"	50.8	101.3	2 1/2"	72.4	205.8

Se realizaron alrededor de 200 diseños distintos que reducían el volumen entre un 20% y un 25%, pero debido a limitaciones de espacio, no se incluirán en el documento. Ninguna de estas configuraciones alcanzó resistencias superiores al mínimo requerido, comprometiendo la integridad del ladrillo bajo una carga de 115000 N. Por ello, se optó por determinar la geometría de las perforaciones a través de un análisis topológico.

4.4.3.1 Análisis de topología. El análisis topológico indica que, bajo una carga de 10 MPa, alrededor del 36,32% del volumen del ladrillo está sometido a esfuerzos superiores a los límites permitidos, lo que impide eliminar material en esas áreas sin comprometer su resistencia estructural. Por ello, se optará por perforar en las zonas vacías, optimizar el peso y la eficiencia sin afectar su resistencia.

Figura 12.

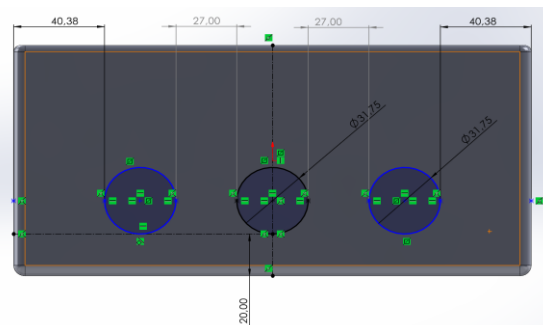
Análisis de topología.



4.4.2.2 Configuración óptima de perforaciones. Las perforaciones se ubicaron respetando las fibras críticas del ladrillo, y los 20 mm de pared establecidos por la norma NTC 4076 (1977). Se obtuvo un volumen de perforaciones de 118,76cm³, que representan en relación con el volumen total del ladrillo, un valor del 9,4 %, siendo esta la relación óptima para garantizar la resistencia a compresión. La relación permite que por cada 11 ladrillos fabricados, sobre material para crear un ladrillo adicional.

Figura 13.

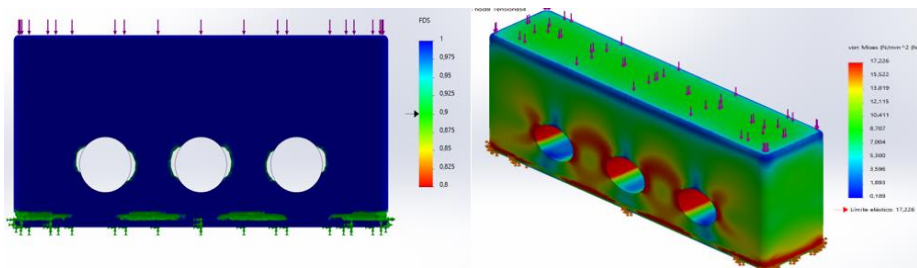
Croquis del ladrillo perforado.



Al aplicar una fuerza de 115000 N, el gráfico de factor de seguridad indica desgarramiento del material en las zonas de concentración de esfuerzos (perforaciones y esquinas del ladrillo). Sin embargo, estos son tolerables, ya que el análisis matemático del modelo tiende a maximizar los esfuerzos en dichas áreas. A pesar de estas concentraciones, la integridad del ladrillo se mantiene con un factor de seguridad de 1.0, permitiendo validar este modelo. El gráfico de tensiones muestra una concentración de esfuerzos alrededor de las perforaciones, causada por la discontinuidad geométrica entre el área sólida y el espacio vacío. En los bordes de las perforaciones, el material tiene menos área para absorber las fuerzas, lo que genera estas concentraciones. En contraste, el resto del ladrillo presenta tensiones moderadas, lo que sugiere un comportamiento estructural estable. El modelo predice que fallará por fractura en los bordes de las perforaciones donde las tensiones son más altas.

Figura 14.

Factor de seguridad y diagrama de tensiones de Ladrillo perforado.



4.5 Fabricación del ladrillo

4.5.1 Acondicionamiento del horno y del molde

Figura 15.

Horno y molde del ladrillo perforado.



4.5.2 Dosificación del material y elaboración de muestra

El volumen total de las perforaciones es de 118,76 cm³, lo que deja un volumen final del ladrillo perforado de 1146,25 cm³: Para su fabricación, se utilizara 1742 gramos de arena y 499 gramos de PET.

4.5.2.1 Moldeado de ladrillos. El material se dividió en muestras iguales de 580.7 gramos de arena y 166,3 gramos de plástico PET, lo que garantizó un moldeado y mezclado sin desperdicios significativos, salvo el material adherido a la espátula en la última capa.

4.5.2.2 Compactación y mezclado. Al momento de colocar la tapa del molde sobre el material homogéneo, se observó que durante el proceso de compactación, el material se desplazó por encima de las barras, alcanzando una altura superior a los 5 cm, y las perforaciones no quedaron correctamente definidas. Por lo que se ajustó la dosificación a 1722 g de arenas y 493 g de PET, logrando que el material quedara al mismo nivel de las barras. No obstante, es necesario optimizar el proceso de compactación, ya que con esta cantidad de material, el mecanismo de la tapa no logra compactarlo, limitándose únicamente a moldear el material a dicha altura.

4.5.2.3 Desencofrado y ensayo. Después de 50 minutos, el ladrillo se desmoldo fácil de las paredes laterales, aunque quedo adherido a la base, obligando a destruirlo y replantear la metodología. Se decidió aplicar una capa gruesa de aluminio sobre el molde y las barras para facilitar el proceso de desencofrado. También se aumentaron los ciclos de mezclado del material por capa de 3 a 4 ciclos, cada uno 21 Procesos de reducción del peso del ladrillo elaborado con material Arena-Pet mediante tratamiento térmico, implementando orificios que cumplan con la normativa NTC 4205 y NTC 4076. de 5 minutos, ya que la nueva barrera térmica retrasaba el calentamiento de la materia, de ahí el porqué del aumento de la

temperatura. Aunque el proceso permitió obtener el ladrillo, no quedó completamente liso y algunos fragmentos de aluminio se incrustaron, lo que, aunque no afecta significativamente la resistencia, modifica el material compuesto y el acabado de este por lo que se recomienda optimizar el proceso. Finalmente se verificó las dimensiones, se pesó el ladrillo y se sometió a una prueba de compresión en la maquina MTS.

Figura 16.

Resultado inicial y final de los ladrillos.



Figura 17.

Curva Esfuerzo-Deformación del ladrillo perforado.

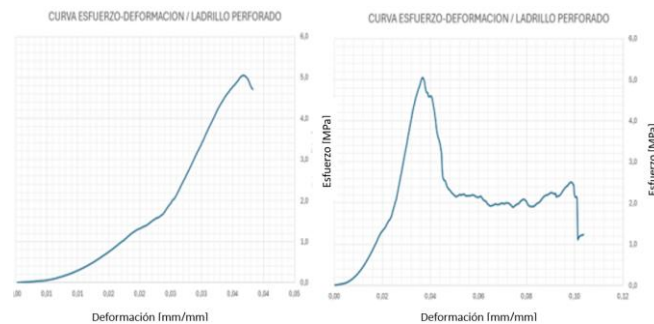


Figura 18.

Ladrillos después del ensayo.



Se obtuvo experimentalmente un ladrillo con un peso 1949 gramos, que fallo por fractura en los bordes de las perforaciones, tal como se había previsto en el modelo. Este comportamiento plástico se debe a la presencia de orificios, que reducen las restricciones internas durante la deformación y permiten que el material se deforme con mayor facilidad. Durante la aplicación de la fuerza, los orificios se ensacharon de 3,2 cm de diámetro a aproximadamente 3,4 cm. Aunque el aluminio parecía ser parte del material compuesto, este solo quedó adherido a las paredes de los orificios y se desprendió durante el ensayo, por lo que su aporte en resistencia fue nulo. A pesar de que en el software SolidWorks indicaba que podía soportar una carga mínima para ser clasificarlo como ladrillo macizo, el resultado experimental fue de 5,05 MPa debido a la complejidad en su fabricación y a las imperfecciones observadas.

5. Conclusiones

Las modificaciones en el proceso de fabricación de ladrillos macizos H5 compuestos de arena y PET, mediante tratamiento térmico, incluyeron la implementación de orificios de 31,8 mm de diámetro, el aumento de la temperatura de 260 °C a 300 °C y la vibración del material, lo que generó resultados positivos en el análisis de elementos finitos, cumpliendo con los parámetros geométricos establecidos en el artículo 2.3.6.1 de la norma Sismorresistente y en la norma NTC 4076 (20 mm de espesor de pared y tabique). Además, se logró mantener la resistencia mínima de 10 MPa exigida por la NTC 4205 para ladrillos macizos. Sin embargo, la adición de orificios complicó el proceso de fabricación, dificultando el desencofrado, aumentando el tiempo de cocción y causando imperfecciones en las paredes del ladrillo por la adaptación al aluminio, lo que generó concentradores de esfuerzos puntuales. Desde una perspectiva económica, aunque el uso de residuos plásticos como materia prima reduce costos y las perforaciones optimizan el volumen del material, lo que permite fabricar más ladrillos, los costos energéticos y el tiempo de producción, que se incrementó de 1 hora y 55 minutos

aproximadamente del proyector anterior a 2 horas y 15 minutos, haciendo que la fabricación de estos ladrillos perforados sea menos competitiva.

Los resultados obtenidos marcan un avance significativo en la investigación llevada a cabo por la Universidad Industrial de Santander sobre la nueva metodología de fabricación de ladrillos a partir de material reciclado. Aunque el ensayo final no logro cumplir con todos los objetivos establecidos, la información recopilada en la caracterización del material compuesto resultará muy valiosa para comprender la respuesta del ladrillo en futuros ensayos. Este conocimiento permitirá optimizar el proceso y mejorar las propiedades del material en desarrollos posteriores.

El análisis de los resultados generados mediante el modelado en el software SolidWorks, en comparación con los datos experimentales, demuestra la efectividad de esta herramienta en la predicción del comportamiento de los elementos. Los resultados obtenidos confirmaron que la relación óptima entre el volumen de las perforaciones y el volumen total del ladrillo es de 9,4 % y que el modelado fue capaz de replicar el comportamiento experimental, lo que resalta la fiabilidad de SolidWorks en el análisis estático. Además, este software ofrece una amplia gama de aplicaciones, incluyendo estudios de frecuencia, análisis de fluidos, evaluaciones térmicas, simulaciones no lineales y dinámicas, entre otras, lo que lo convierte en una herramienta versátil y practica en el ámbito de la ingeniería.

El estudio al material compuesto con arena fina Marn, extraída de la cantera de Rionegro, reveló que es el más adecuado para la fabricación de ladrillos con características optimas. Su granulometría, junto con sus propiedades físicas como una baja cantidad de finos y un alto limite elástico, superaron el rendimiento de la arena utilizada en el proyecto de grado titulado “Procesos de optimización para la elaboración de ladrillos macizos H5 compuestos de material arena-Pet mediante tratamiento térmico” (Bermúdez & Cáceres, 2023), proveniente de Chicamocha. Estas características mejoran significativamente la trabajabilidad y la mezcla del agregado con plástico

PET, lo que resulta en un ladrillo macizo que alcanza una resistencia de 17,23 MPa, superior a los 15,48 MPa logrados con la arena Mach. Ambos tipos de ladrillos cumplen con los estándares establecidos por la normativa NTC 4205 de 10 MPa para ladrillo macizo no estructural. Además se prevé que, con la futura optimización del proceso de desencofrado, se puedan fabricar ladrillos perforados que satisfagan los requisitos experimentales de la normativa NTC 4205.

6. Recomendaciones

Se recomienda que se realice una caracterización completa del material compuesto, incluyendo variables críticas como el módulo de cortante, límite de tracción, límite de compresión, coeficiente de expansión térmica, calor específico y coeficiente de amortiguamiento. Esto permitirá conocer su desempeño mecánico y térmico ante situaciones complejas.

Para obtener un valor más preciso del coeficiente de Poisson, se sugiere seguir la normativa NTC 4025, que detalla la metodología y los equipos necesarios para su determinación. Este proyecto no se realizó utilizando esta metodología debido a la falta del equipo, por lo que se hizo de esta manera. Sin embargo, el coeficiente de variación de los datos obtenidos es alto, 35,85%, indicando la necesidad de una evaluación más sólida del comportamiento del material.

Se recomienda realizar perforaciones cónicas en los ladrillos, debido a dos factores clave: la concentración de esfuerzos y la facilidad de desencofrado. Las perforaciones cónicas ayudan a distribuir de manera más uniforme los esfuerzos con relación a otras geometrías que presentan puntos críticos de concentración de esfuerzos, disminuyen el riesgo de fracturas y facilita el desencofrado al reducir la adherencia entre el ladrillo y el molde, permitiendo una extracción más sencilla sin generar deformaciones en el material. A su vez, se aconseja investigar algún o material antiadherente resistente a altas temperaturas, para evitar que el compuesto se adhiera a las paredes del molde o las barras durante el proceso de fabricación, especialmente cuando el PET alcanza su punto de fluidez.

Referencias bibliográficas

- Acoplasticos. (2023). *Acoplasticos. Opciones de plástico. Asociación Colombiana de plásticos.*
Acoplásticos. <https://acoplasticos.org/>
- Arbeláez, L. (2022). *Ficha Técnica PET.* <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/25ebc239-9873-4c72-bcd2-255fa3a50dda/content>
- Bermúdez, L. Y. M., & Cáceres, J. M. S. (2023). *procesos de optimización para la elaboración de ladrillos macizos h5 compuestos de material arena-pet mediante tratamiento térmico.*
- Brick Industry Association. (2023). *Brick Benefits.* Brick Industry Association.
<https://www.gobrick.com/learn-about-brick/brick-benefits>
- Calbet, J. B. (2012). El tratamiento térmico en rocas silíceas, un procedimiento técnico para la talla. *Trabajos de Prehistoria*, 69(1), Article 1. <https://doi.org/10.3989/tp.2012.12078>
- Cascante, L. (s. f.). *Propiedades del PET.* <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/a6248f0c-47a2-443d-8c82-bd026791949d/content>
- CIVIL ENGINEERING TUTORIALES (Director). (2017, noviembre 28). *Clasificación de Suelos SUCS Y AASHTO (Parte 01—SUCS)* <https://www.youtube.com/watch?v=1tgYT7nG3N0>
- Estudio de topología—Ayuda de SOLIDWORKS.* (2021). https://help.solidworks.com/2021/Spanish/SolidWorks/cworks/c_generative_design_study.htm
- Gómez, A. C. O., & Ocaño, D. A. P. (2019). *Propuesta de material compuesto suelo – pet para la elaboración de ladrillos macizos h5 mediante tratamiento termico.*
- González Rodríguez, V. M., Mendoza Baquero, J. S., & Páez Niño, N. S. (2021). *Análisis comparativo de distintos métodos de determinación del factor de seguridad.*
<https://hdl.handle.net/20.500.12494/33517>

- Juárez, M., Santiago, M., & Vera, J. (2011). *Estudio De Factibilidad Para La Manufactura De Empuñaduras De Pet Reciclado*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73020063002>
- Ladrillos: Tipos Y Usos | Grupo Matmap*. (2021, julio 13). <https://matmap.com/info/tipos-de-ladrillos-y-sus-usos/>
- MECAPEDIA • *Coefficiente de Poisson*. (2022). https://www.mecapedia.uji.es/pages/coeficiente_de_Poisson.html
- Moreno, A. (2005). Capitulo 2. El método de elementos finitos. En *ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA TENSION FUERA DEL PLANO EN LA CONFORMABILIDAD DE CHAPA METÁLICA*.
- Nava, M., Jiménez, M., & Vera, J. (2011). Estudio de factibilidad para la manufactura de empuñaduras de PET reciclado. *e-Gnosis*, 9, 1-12.
- NSIV OpenFOAM & Ansys (Director). (2022, marzo 9). *ANSYS #MESHING en Español— Refinamiento de Malla (Estructurada vs No estructurada)* https://www.youtube.com/watch?v=tYG0m7M92_o
- NTC 174. *Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto*. (2000).
- NTC 4025. Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de poisson en concreto a compresión(2019).
- NTC-4076 *Mampostería no estructural interior y chapas de concreto*. (1977).
- NTC-4205-*Unidades-de-mamposteria-de-arcilla-ladrillos-y-bloques-ceramicos*. (2000).
- Sanjuan, M. I. D. (2023, junio 5). *En Colombia, el consumo de plástico alcanza la cifra de 1.250.000 toneladas anuales*. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/en-colombia-el-consumo-de-plastico-alcanza-la-cifra-de-1-250-000-toneladas-anuales-775090>

Serrano, Guzmán, M. F., Diego. (2010). *Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112010000100002&script=sci_arttext

Torices, C. (2024). *¿Qué tipo de arena para construcción debes utilizar?* Cementos Torices. <https://cementostorices.com/blog/construccion/que-tipo-de-arena-para-construccion-debes-utilizar/>