

Caracterización y Optimización de las Propiedades Mecánicas en Compresión de una Mezcla a Base de
Ceniza de Material Orgánico, Residuos de Carbón Mineral, Cemento, Arena y Cal para Ladrillos
ecológicos

Juan Daniel Peña Quintero

David Felipe Rodríguez Cubillos

Plan de trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Dr. Ingeniería Civil.

Codirector

Luis Enrique Lambis Benítez

Máster en Ing. Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Contenido

1. Objetivos.....	10
1.1. Objetivo General.....	10
1.2. Objetivos Específicos	10
2. Marco teórico.....	10
3. Estado del arte	11
4. Metodología.....	12
5. Etapa 1: Evaluación de los Componentes de la Mezcla	14
5.1. Inicio de Ensayos de Compresión.....	17
5.2. Resultados de la Primera etapa: Evaluación de los Componentes de la Mezcla	21
6. Etapa 2: Mejoramiento de la Mezcla.....	24
6.1 Proceso de mejoramiento de la mezcla.....	24
6.2. Resultados de la Segunda etapa: Mejoramiento de la Mezcla.....	27
6.3. Resultados de la Segunda Etapa: Absorción de Humedad	31
7. Etapa 3: Evaluación Bajo Norma NTC6033	32
7.1. Resultados de la Tercera Etapa: Evaluación Bajo Norma NTC 6033	32
8. Etapa 4: Contrastación de Ladrillo Tradicional con el Material Obtenido.....	33
8.1. Resultados de la Cuarta Etapa: Contrastación de Ladrillo Tradicional con el Material Obtenido	34
9. presupuesto	36
10. Conclusiones.....	37

Referencias38

Figuras

Figura 1. Minería en cielo abierto	9
Figura 2. Residuos de la industria azucarera, Ceniza de material orgánico	9
Figura3.. Distribución pentagonal para mezclas de cinco componentes.....	15
Figura 4. Diseño del molde para fabricación de probetas	19
Figura 5. Probetas frescas, listas para iniciar el proceso de curado.....	19
Figura 6. Ensayo de compresión en proceso en Prensa estática Controls Multiloader	20
Figura 7. Resultados del ensayo de compresión aplicado a las probetas	21
Figura 8. Resultados del espécimen número 7.....	27
Figura 9. Resultados del espécimen número 12	28
Figura 10. Resultados del espécimen número 13	29
Figura 11. Probetas con desempeño superior en cada uno de sus especímenes	30
Figura 12. Ladrillo temosa comercial.....	34
Figura 13. Grafica de comportamiento mecánico de ladrillo temosa y probeta 12.2.....	35

Tablas

Tabla 1 Combinaciones de material que se usaran en la fase experimental	16
Tabla 2 Masa de probetas ajustada, lista para fabricación.....	18
Tabla 3 Respuesta mecánica de la probeta 7	22
Tabla 4 Respuesta mecánica de la probeta 12	23
Tabla 5 Respuesta mecánica de la probeta 13	23
Tabla 6 Combinaciones en porcentaje ajustadas para buscar mejoría	25
Tabla 7 Combinaciones en gramos listas para el proceso de fabricación.....	26
Tabla 8 Valores de porcentaje y masa para cada material de la mezcla 12.2.....	30
Tabla 9 Porcentaje de agua absorbido por el material	31
Tabla 10 Presupuesto de intangibles y documentación	36
Tabla 11 Costos de fabricación.....	36

Resumen

Título: Caracterización y Optimización de las Propiedades Mecánicas en Compresión de una Mezcla a Base de Ceniza de Material Orgánico, Residuos de Carbón Mineral, Cemento, Arena y Cal para Ladrillos ecológicos

Autor: Juan Daniel Peña Quintero y David Felipe Rodríguez Cubillos *

Palabras Clave: Ladrillo, Propiedades mecánicas, NTC**

Descripción: El proyecto se centró en el desarrollo de un ladrillo mediante una mezcla compuesta por ceniza orgánica, ceniza de carbón mineral, cemento, arena y cal, que cumpliera con los estándares de desempeño mecánico en compresión y humedad establecidos por la normativa NTC 4076 para ladrillos no estructurales. Para lograrlo, primero se evaluó el efecto de los componentes de la mezcla en el desempeño mecánico conforme a la norma mencionada. Luego, se mejoraron los componentes clave de la mezcla para incrementar tanto la resistencia en compresión como para cumplir con los estándares de absorción de humedad del ladrillo resultante. Asimismo, se llevó a cabo una evaluación de la calidad del ladrillo bajo la norma NTC 6033 para ladrillos ecológicos, garantizando que cumpliera con los estándares ambientales establecidos. Por último, se realizó una comparación directa entre el ladrillo obtenido y un ladrillo convencional para contrastar su desempeño mecánico y determinar su viabilidad y eficacia en el contexto de la construcción sostenible. Este proyecto buscó contribuir al desarrollo de soluciones constructivas más respetuosas con el medio ambiente, promoviendo prácticas de construcción más sostenibles y eficientes.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Físicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Programa académico. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Dr. Ingeniería Civil. Codirector: Luis Enrique Lambis Benitez. Máster en Ing. Química

Abstract

Title: Characterization and Optimization of the Mechanical Properties in Compression of a Mixture Based on Ash of Organic Material, Residue of Mineral Coal, Cement, Sand and Lime for Ecological Bricks

Author(s): Juan Daniel Peña Quintero and David Felipe Rodríguez Cubillos*

Key Words: brick, Mechanical properties, NTC**

Description: The project focused on the development of a brick using a mixture composed of organic ash, mineral coal ash, cement, sand, and lime, which met the mechanical performance standards in compression and humidity established by the NTC 4076 norm for non-structural bricks. To achieve this, the effect of the mixture components on the mechanical performance according to the mentioned norm was first evaluated. Then, the key components of the mixture were improved to increase both the compressive strength and to meet the humidity absorption standards of the resulting brick. Additionally, a quality evaluation of the brick was carried out under the NTC 6033 norm for ecological bricks, ensuring it met the established environmental standards. Finally, a direct comparison between the obtained brick and a conventional brick was conducted to contrast their mechanical performance and determine its viability and efficiency in the context of sustainable construction. This project aimed to contribute to the development of more environmentally friendly construction solutions, promoting more sustainable and efficient construction practices.

* Degree Work

** Faculty of Physic mechanics. School of Mechanical Engineering. Academic program. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Dr. Civil Engineering. Co-director: Luis Enrique Lambis Benitez. Master's in chemical engineering

Introducción

En Colombia, se consumen anualmente cerca de 7 millones de toneladas de carbón mineral, generando una gran cantidad de residuos contaminantes. Una situación similar ocurre con la ceniza de caña de azúcar, la cual, aunque es utilizada en la industria agrícola como abono, no toda la ceniza producida se emplea para tal fin, quedando una parte considerable expuesta al medio ambiente. Este panorama presenta una oportunidad para explorar nuevos campos productivos que permitan generar ganancias y aprovechar en gran medida estos residuos.

El presente proyecto encontró una oportunidad en la industria ladrillera, ya que la construcción de viviendas es una actividad constante que requiere materiales de construcción económicos y abundantes. Aprovechando estos desechos, no solo se contribuye a la reducción de residuos, sino que también se ayuda a mitigar el impacto ambiental.

El uso de cenizas y residuos en la fabricación de ladrillos no es un tema nuevo. En 2015, el señor Duque desarrolló un ladrillo utilizando cenizas de alto horno, hidróxido de sodio, cal y arcilla, obteniendo resultados prometedores. De manera similar, en 2017, los investigadores Quesada, Molina y Franco utilizaron cenizas de biomasa volante como reemplazo parcial en materiales de construcción. Tras evaluar variables como la absorción de agua, densidad aparente y resistencia a la compresión, también obtuvieron resultados positivos.

Con base en estos antecedentes, este proyecto busca desarrollar un material adecuado para la fabricación de ladrillos que cumpla con las normativas vigentes, como la NTC 4076. Para lograrlo, se evaluará la resistencia de diferentes combinaciones de mezclas, buscando siempre maximizar el consumo de residuos. Posteriormente, el material será evaluado bajo la norma NTC 6033 para obtener la etiqueta ambiental. Finalmente, se realizará una comparación con un ladrillo convencional para evidenciar de forma concreta la viabilidad del material desarrollado.

La metodología adoptada busca obtener resultados óptimos mediante ensayos de compresión con diferentes combinaciones en la mezcla. Se estudiará también el parámetro de absorción de humedad. Una vez identificadas las combinaciones más prometedoras, se llevará a cabo un proceso de reevaluación de

proporciones con el objetivo de aumentar la presencia de desechos y reducir la cantidad de cementantes. La proporción ganadora será evaluada bajo la norma ambiental, y finalmente se compararán las propiedades mecánicas a compresión del material obtenido con las de un ladrillo convencional.

Figura 1.

Minería en cielo abierto



La figura 1 muestra el gran impacto ambiental que tiene la minería de carbón a cielo abierto

Figura 2.

Residuos de la industria azucarera, Ceniza de material orgánico



La figura 2 muestra el subproducto obtenido al quemar material biológico como vegetación de caña de azúcar, esta ceniza es un material suabe y volátil

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Fabricar un ladrillo a base de ceniza orgánica, ceniza de carbón mineral, cemento, arena y cal capaz de cumplir con el desempeño mecánico en compresión y humedad establecido por la NTC 4076 (ladrillos no estructurales).

1.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de los componentes de la mezcla en el desempeño mecánico establecido en la norma NTC 4076.
- Mejorar la mezcla variando los componentes clave en función de la resistencia en compresión y absorción de humedad.
- Evaluar la calidad del ladrillo bajo la norma NTC 6033 (ladrillos ecológicos).
- Contrastar el desempeño mecánico del ladrillo obtenido y un ladrillo convencional.

2. Marco teórico

- Carbón mineral: Material fósil compuesto principalmente por carbono que se utiliza como combustible en la industria.
- Residuos: Sobrantes de procesos industriales que no tienen un uso directo en la producción y que suelen generar problemas de acumulación y contaminación.
- Ceniza: Sobrante sólido generado por la combustión de diferentes materiales, como el carbón mineral o la biomasa.
- Industria: Conjunto de procesos productivos destinados a la fabricación de bienes o prestación de servicios.
- Ladrillos ecológicos: Materiales de construcción elaborados con componentes que disminuyen su impacto ambiental.
- Desempeño mecánico: Capacidad de un material de soportar cargas sin sufrir deformaciones o fracturas.

- Norma NTC 4076: Normativa técnica colombiana que establece los requisitos para la fabricación de ladrillos no estructurales.
- Norma NTC 6033: Normativa técnica colombiana que establece los requisitos para la fabricación de materiales de construcción ecológicos.
- Materiales orgánicos: Componentes de origen vegetal o animal que se utilizan como materia prima en procesos productivos.
- Cementante: sustancia que tiene la capacidad de unir o cementar otros materiales juntos

3. Estado del arte

La presencia de materiales orgánicos en la elaboración de productos se ha vuelto tendencia, principalmente por su fácil acceso y disminución en el impacto ambiental que se generan con materiales artificiales y de difícil degradado, en la elaboración de ladrillos se ha incorporado las cenizas de desechos orgánicos (caña de azúcar, hojas de árboles, cascaras de diferentes frutas, etc.) que permiten evaluar la posibilidad de hacer cambios en los procesos de obtención de esta materia prima generando buenos comportamientos mecánicos, químicos, entre otros.

- Duque. G, (2015) Crean ladrillo a partir de ceniza

Desarrollan un innovador material conocido como EcoBlac, el cual se produce a partir de una mezcla compuesta por un 70% de las cenizas generadas por los altos hornos de las fábricas de papel, junto con hidróxido de sodio, cal y una pequeña cantidad de arcilla. A diferencia de las ladrilleras tradicionales que requieren altas temperaturas y combustibles altamente contaminantes como el carbón y el diésel, este nuevo material se seca naturalmente a temperatura ambiente, sin necesidad de procesos de cocción a temperaturas extremadamente altas. (“Crean ladrillo a partir de ceniza | Tendencias | Portafolio”)

- Eliche-Quesada, D.; Felipe-Sese, MA.; Moreno-Molina, AJ.; Franco, F.; Infantes-Molina, A. (2017). (“Investigation of using bottom or fly pine-olive pruning ash to produce environmental friendly ceramic materials”) Applied Clay Science.

Eliche-Quesada et al. (2017) investigaron la viabilidad de utilizar cenizas de biomasa volante o de fondo como reemplazo parcial en la producción de materiales de construcción ecológicos. En su estudio, las cenizas volantes y de fondo de la combustión de biomasa (poda de olivo y poda de pino) se utilizaron como materia prima para sustituir la arcilla en la producción de ladrillos cocidos. Los autores evaluaron el efecto de la adición de cenizas volantes o de biomasa de fondo sobre el comportamiento tecnológico del ladrillo mediante el estudio de la contracción lineal, la absorción de agua, la densidad aparente, la resistencia a la compresión, conductividad térmica y la morfología. (vol. 135, Pág. 333–346)

- Torres-Agreto, J., Mosquera-Idrobo, L. F., Paz-Villegas, P., & Díaz-Huertas, M. F. (2021). (“Evaluación de cenizas de fondo de carbón para la fabricación de ladrillos de arcilla: estudio preliminar.”)

Torres-Agreto et al. (2021) investigó el uso de cenizas de fondo de carbón (CBA) en la producción de ladrillos de arcilla. Se emplearon diversas técnicas para determinar la composición del material y se realizaron pruebas ambientales para evaluar su viabilidad. Los resultados indicaron que las CBA son un material amorfo que cumple con la normativa ambiental y que posee potencial para su uso en la fabricación de ladrillos de arcilla. (Vol.20(40), Pág. 161–170).

4. Metodología

Este proyecto se dividió en 6 etapas, las cuales abarcaron desde la recolección y preparación de los materiales hasta la evaluación final del producto, garantizando un proceso riguroso para el desarrollo del ladrillo. Las etapas se trabajaron de la siguiente forma:

1. Recolección de Materiales y Preparación de Probetas

1.1 Materiales Utilizados:

- **Ceniza de material orgánico:** Obtenida de residuos agrícolas como el bagazo de caña de azúcar y cáscara de arroz, entre otros.

- **Ceniza de carbón mineral:** Proveniente de la combustión del carbón en siderurgias y hornos industriales.
- **Cemento y cal:** Adquiridos comercialmente.
- **Arena:** Adquirida comercialmente.

1.2 Preparación de Probetas:

- **Diseño Pentagonal:** Se utilizó un modelo de mezcla pentagonal para poder abarcar los 5 componentes de la mezcla de una forma equitativa, esto con el fin de tener varias combinaciones
- **Fabricación:** Se fabricaron las probetas utilizando un molde de diseño propio, cada probeta contenía las mezclas obtenidas en el paso anterior.

2. Evaluación de Propiedades Mecánicas

2.1. Ensayos de Compresión:

- **Procedimiento:** Las probetas fueron sometidas a ensayos de compresión para determinar su resistencia mecánica. Estos ensayos fueron realizados en una máquina de compresión estática la cual permite encontrar el esfuerzo máximo antes de fallar.
- **Resultados:** Se midieron y registraron los valores de resistencia a la compresión para cada combinación de mezcla, posteriormente se eligieron las que mejor resistencia obtuvieron.

2.2 Absorción de Humedad:

- **Procedimiento:** Se sumergieron las probetas en agua durante 7,14,28 días y se midió el porcentaje de absorción, luego se clasificó el ladrillo de acuerdo a la ntc 4076
- **Resultados:** Se determinaron los valores de absorción de agua para cada combinación de mezcla, evaluando su desempeño en relación con las normas vigentes.

3. Optimización de la Mezcla

3.1 Proceso Iterativo:

- **Mejoramiento:** Se aplicó un proceso iterativo para ajustar las proporciones de los componentes, buscando maximizar la resistencia a la compresión y minimizar la absorción de agua.

- **Resultados:** se eligieron las 3 combinaciones con mejor desempeño mecánico basados en algunos criterios técnicos y empíricos.

4. Evaluación Ambiental

4.1 Normas NTC 6033 y NTC 4076:

- **Cumplimiento Normativo:** Se evaluó el cumplimiento de los ladrillos con las normas NTC 6033 y NTC 4076, asegurando que cumplieran con los requisitos de resistencia y absorción de agua.
- **Etiqueta Ambiental:** Se buscó obtener la etiqueta ambiental, evaluando el impacto positivo de los ladrillos en la reducción de residuos y consumo energético.

5. Comparación con Ladrillos Convencionales

5.1 Ladrillo Temosa:

- **Ensayos Comparativos:** Se realizaron pruebas de compresión comparativas entre las probetas del ladrillo obtenido y ladrillos convencionales (Temosa).
- **Resultados:** Los ladrillos obtenidos mostraron una resistencia de 7.5 MPa en comparación con 5.7 MPa de los ladrillos convencionales, además de ser más ligeros.

6. Documentación y Análisis Final

6.1 Redacción de Memorias:

- **Elaboración:** Se redactaron las memorias finales del proyecto, detallando los procedimientos, resultados y conclusiones.
- **Corrección y Presentación:** Se realizaron revisiones y correcciones antes de la presentación final del trabajo.

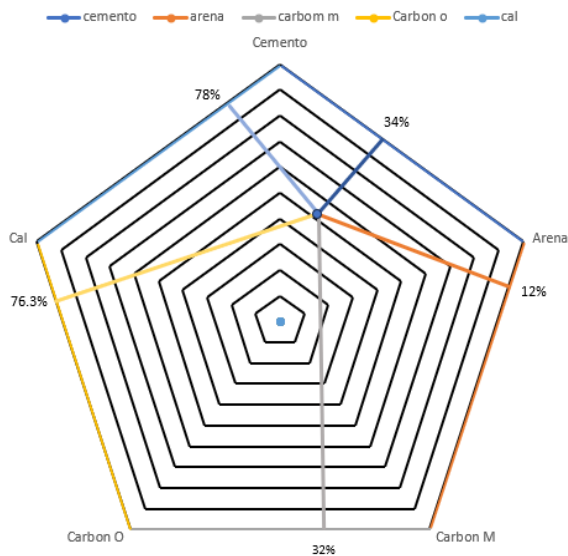
5. Etapa 1: Evaluación de los Componentes de la Mezcla

Para abordar el primer objetivo y conocer cuál de los materiales de la mezcla es relevante en función de la resistencia en compresión, se decidió hacer un proceso iterativo en el que, mediante ensayo y error, al variar los diferentes componentes de la mezcla se busca obtener resultados aproximados en un amplio espectro de combinaciones distintas.

Según la literatura existen ejemplos de mezclas ternarias y cuaternarias, sin embargo, las de cinco componentes no se hallan en la literatura, por lo tanto, para este proyecto se decidió adaptar un modelo pentagonal siguiendo los lineamientos y las lógicas del modelo para mezclas ternarias lo que derivó en lo siguiente.

Figura3.

Distribución pentagonal para mezclas de cinco componentes



En la figura 3 se puede apreciar la distribución elegida en un diagrama pentagonal, donde cada arista del pentágono representa un material en un rango porcentual de 0% a 100%, década arista se realiza una línea perpendicular y la intersección de estas cinco líneas es un punto de combinación de mezclas que contiene un valor único en porcentaje de cada material.

Dentro del pentágono se observan cinco triángulos inscritos en el y en cada triángulo se ubicaron 3 puntos con el fin de obtener un espectro amplio de resultados, se evitó tener valores muy pequeños ya que en el caso de los aglutinantes como el cemento porcentajes muy bajos harán forzosamente fallar la mezcla.

Los datos obtenidos del pentágono se ajustaron usando equivalencias y aritmética sencilla obteniendo así un 100% ajustado entre los cinco componentes.

Tabla 1*Combinaciones de material que se usaran en la fase experimental*

Probeta #	Arena (%)	Ceniza Orgánica (%)	Cal (%)	Ceniza carbón Mineral (%)	Cemento (%)
1	14.84	4.75	15.77	32.62	32.02
2	20	9.22	13.34	26.66	30.78
3	25.2	7.97	7.37	24.22	35.24
4	32.02	14.84	4.75	15.77	32.62
5	30.78	20	9.22	13.34	26.66
6	35.24	25.2	7.97	7.37	24.22
7	32.62	32.02	14.84	4.75	15.77
8	26.66	30.78	20	9.22	13.34
9	24.22	35.24	25.2	7.97	7.37
10	15.77	32.62	32.02	14.84	4.75
11	13.34	26.66	30.78	20	9.22
12	7.37	24.22	35.24	25.2	7.97
13	4.75	15.77	32.62	32.02	14.84
14	9.22	13.34	26.66	30.78	20
15	7.97	7.37	24.22	35.24	25.2

La tabla 1 muestra las 15 diferentes combinaciones en porcentaje de materiales obtenidas del proceso anteriormente mencionado, se puede apreciar como los datos tienen una tendencia que abarca ampliamente es espectro de combinaciones, justamente lo que se quería lograr en esta primera etapa, conseguir una noción a grandes rasgos del comportamiento mecánico de la mezcla según la proporción de componentes.

5.1. Inicio de Ensayos de Compresión

Luego de una revisión de bibliográfica y con los datos obtenidos en el paso anterior se seleccionó los materiales disponibles en la oferta local que serían usados para la mezcla de las probetas:

Arena lavada: se obtiene mediante la extracción y selección de materiales de río, seguido de un lavado para eliminar los sedimentos como limo y arcilla.

Cal hidratada: es un compuesto químico obtenido al mezclar cal viva con agua. Se utiliza en la construcción para mejorar propiedades del concreto como la compactación y resistencia a las variaciones de temperatura.

Cemento gris: Se trata de mezclas que incluyen caliza, marga, esquisto, arena, arcilla o minerales de hierro. Este tipo de cemento es el encargado de unificar de forma consistente la mezcla.

Ceniza orgánica: Se produce mediante la combustión de materia orgánica como el bagazo de caña de azúcar, las cáscaras de arroz, entre otros. Su propósito dentro de la mezcla es sustituir una parte de los elementos como la arena, el cemento y la cal.

Ceniza de carbón mineral: Son desechos generados durante el proceso de quemar carbón mineral en plantas eléctricas, siderúrgicas y durante el coquizado. Su propósito en la combinación es sustituir una parte de los elementos como la arena, el cemento y la cal.

En la elaboración de la mezcla, se tomó como patrón, una masa de 400g, de tal forma que con simple aritmética y en conjunto con el diagrama pentagonal se obtuvieran las cantidades de material necesario para cada probeta.

$$m = \frac{(X\% * 400g)}{100}$$

m: masa proporcional al porcentaje total de la mezcla.

X%= porcentaje del elemento estipulada en la tabla (1).

Tabla 2*Masa de probetas ajustada, lista para fabricación*

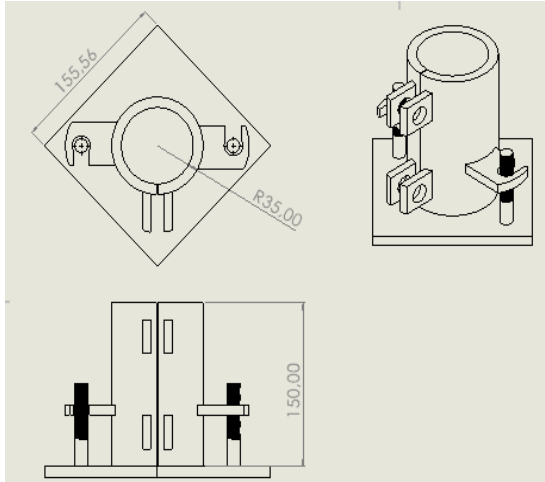
PROBETA	Arena (gr)	Ceniza O (gr)	Cal (gr)	Ceniza C (gr)	Cemento (gr)
1	59,36	19	63,08	130,48	128,08
2	80	36,88	53,36	106,64	123,12
3	100,8	31,88	29,48	96,88	140,96
4	128,08	59,36	19	63,08	130,48
5	123,12	80	36,88	53,36	106,64
6	140,96	100,8	31,88	29,48	96,88
7	130,48	128,08	59,36	19	63,08
8	106,64	123,12	80	36,88	53,36
12	29,48	96,88	140,96	100,8	31,88
13	19	63,08	130,48	128,08	59,36
14	36,88	53,36	106,64	123,12	80
15	31,88	29,48	96,88	140,96	100,8

La tabla 2 muestra la masa en gramos ya ajustada que llevara cada una de las probetas seleccionadas con ayuda del diagrama pentagonal.

El molde diseñado para la hacer las probetas se fabricó según la norma ACTM C 470 donde se indica que la altura del molde debe ser mínimo dos veces el diámetro de la base, los planos fueron realizados en el programa SOLIDWORKS.

Figura 4.

Diseño del molde para fabricación de probetas



Para la primera etapa se elaboraron un total de 15 probetas, cada probeta consta de un duplicado por lo cual al final del proceso se fabricaron 30 probetas, estas probetas serán sometidas a un fraguado en agua, el cual evita la deshidratación y posibles fracturas, el prensado de las probetas, se hizo bajo una carga de 35 KN, fuerza estimada que se aplica a una prensa manual para ladrillos ecológicos, en el mercado se pueden encontrar prensas que permiten mayor aplicación de fuerza.

Figura 5.

Probetas frescas, listas para iniciar el proceso de curado



La norma 4076 indica que, cumplidos los 28 días de curado del ladrillo, este debe soportar una carga a compresión mínima de 5 Mpa, sin embargo, es posible realizar los ensayos en un periodo más temprano, si se presenta un historial donde se refleje la evolución de la resistencia.

Según (Portland Cement Association P. Diseño y control de mezclas de concreto. Portland Cement Association, 1a edición, Capítulo. 2004; 3:77–91) nos indica que transcurrido 7 días de fraguado las probetas que obtienen una resistencia a la compresión de 3 Mpa tienden a incrementarla en el transcurso del tiempo, según notas de la NTC se recomienda realizar los ensayos en tiempos de 7, 14 y 28 días de curado para esta primera etapa la realizaremos a los 7 días para ahorrar tiempo y material.

Transcurridos los 7 días de curado se realiza el ensayo en una prensa estática, para obtener la resistencia a la compresión para cada una de las probetas y su duplicado, la línea de productos NORMATEST-CONTROLS ofrece una selección de máquinas de compresión pequeñas y de diseño compacto, ideales para realizar diversas pruebas bajo norma, según se requiera (Máquina digital de Compresión MULTILOADER - Normatest. (n.d.). Normatest.)

Figura 6.

Ensayo de compresión en proceso en Prensa estática Controls Multiloader

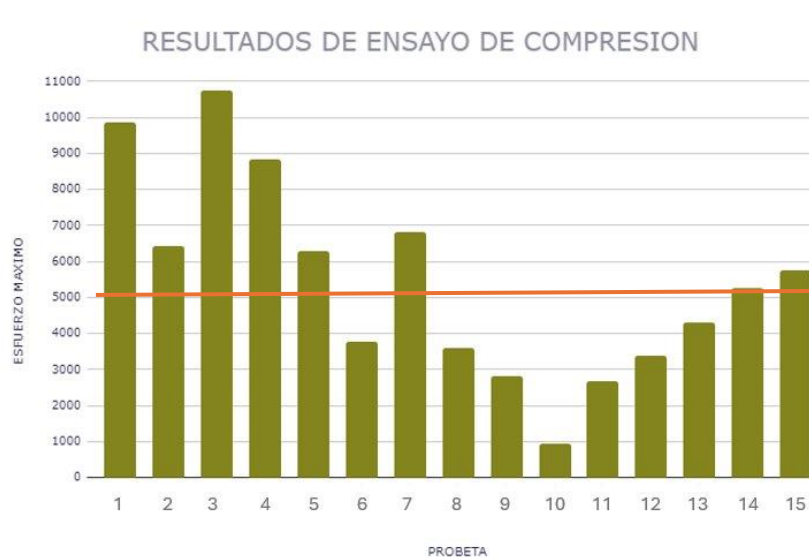


La Máquina mostrada en la figura 6, permite obtener cálculos precisos de la deformación versus el esfuerzo, los cuales se interpretan en una gráfica, gracias al uso de esta tecnología se pueden tomar decisiones basados en ellos, a continuación, en la figura 7 se observa los puntos de esfuerzo máximo obtenidos de cada probeta.

5.2. Resultados de la Primera etapa: Evaluación de los Componentes de la Mezcla

Figura 7.

Resultados del ensayo de compresión aplicado a las probetas



Recordando que los ensayos se hicieron a los 7 días de fraguado, y teóricamente la resistencia debe aumentar proporcionalmente al tiempo de curado, se encuentran algunas composiciones que satisfacen las necesidades del proyecto como se aprecia en la figura 7, también se evidencia que el cemento es un factor clave en la resistencia de la mezcla ya que las combinaciones que obtuvieron los resultados más altos tienen en común que son las que más cemento tienen en sus proporciones.

la selección de las probetas adecuadas para la continuidad de los ensayos, fueron aquellas que lograron obtener una resistencia de 3 Mpa en adelante.

Otro punto para considerar es que se utilice la mayor cantidad posible de residuos de carbón mineral y ceniza orgánica ya que esto hace parte de la justificación de este proyecto, realizando variaciones entre el cemento la arena y la cal.

las probetas 1, 2, 3, 4 y 6 presentan una resistencia alta a la compresión, también tienen el mayor porcentaje de cemento, y el consumo de ceniza no es muy destacable por eso se descartan, las probetas 10 se encuentra por debajo del límite de 3 Mpa establecido por la literatura, por lo tanto, es descartable, en cuanto a las probetas 5, 6, 8, 9, 11, 14 y 15 se pueden considerar utilizables, pero presentan bajo consumo de residuos comparado con el porcentaje de cemento por lo que no son candidatos seguros.

El trabajo de investigación se centrará en las probetas 7, 12 y 13 ya que presentan esfuerzos prometedores, altos consumos de residuos y bajos consumos en cemento, lo que es ideal ya que, según Zhang, S., Worrell, E., & Crijns-Graus, W. (2015). "Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry, Applied Energy, 147, 192-213. la producción de cemento contamina y perjudica gravemente a las especies florales.

Tabla 3

Respuesta mecánica de la probeta 7

DATOS RESPUESTA MECÁNICA PROBETA 7	
Esfuerzo máximo [kPa]	6837.40
Fuerza máxima [kN]	27.15
Deformación máxima al momento de falla [%]	3.1
Área corregida [mm ²]	3971.2

La probeta # 7 presenta altos porcentajes en arena y ceniza orgánica mientras muestra un porcentaje más moderado en cal y cemento.

Tabla 4*Respuesta mecánica de la probeta 12*

DATOS RESPUESTA MECANICA PROBETA 12	
Esfuerzo máximo [kPa]	3375.26
Fuerza máxima [kN]	13.56
Deformación máxima al momento de falla [%]	4.3
Área corregida [mm ²]	3983.1

La probeta #12 presenta porcentajes medios de ceniza orgánica y ceniza mineral y porcentajes moderados en arena y cemento.

Tabla 5*Respuesta mecánica de la probeta 13*

DATOS RESPUESTA MECÁNICA PROBETA 13	
Esfuerzo máximo [kPa]	4334.06
Fuerza máxima [kN]	17.26
Deformación máxima al momento de falla [%]	3.3
Área corregida [mm ²]	3982.09

La probeta #13 presenta altos porcentajes en ceniza de carbón y cal mientras muestra porcentajes moderados en cemento y arena.

Según (“ICONTEC. (1996). NTC 4076: ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto (parágrafo 4.2).”) la resistencia a la compresión a los 28 días de evaluada sobre el área neta debe ser mayor a 5 Mpa, y bien las probetas elegidas vemos que ya superan o están cerca de este valor, teniendo en cuenta que las pruebas se

realizaron a los 7 días, se proyecta que la resistencia debe subir considerablemente por tal motivo no es erróneo afirmar que cumple con los requerimientos mínimos establecidos por la norma NTC 4076.

6. Etapa 2: Mejoramiento de la Mezcla

Para la etapa dos se hará un proceso de mejoramiento de la mezcla buscando conseguir la mejor resistencia posible con las limitaciones de alcance existentes en el proyecto como lo son el tiempo y el dinero.

6.1 Proceso de mejoramiento de la mezcla

Una vez identificadas las mejores muestras en la etapa anterior, se continuará con el proceso de fabricación de estas para ser probadas a los 7,14 y 28 días, no sin antes hacer unos ajustes a la mezcla.

Se harán cambios a la composición, específicamente al cemento y la cal en un 1.5% y 3%, de igual forma se aumentará proporcionalmente la cantidad de los materiales ceniza orgánica y de carbón mineral, con esto en mente se obtuvo la siguiente tabla de combinaciones.

Tabla 6*Combinaciones en porcentaje ajustadas para buscar mejoría*

Probeta #	Arena (%)	Ceniza Orgánica (%)	Cal (%)	Ceniza Carbón Mineral (%)	Cemento (%)
7	32.62	32.02	14.84	4.75	15.77
12	7.37	24.22	35.24	25.20	7.97
13	4.75	15.77	32.62	32.02	14.84
7.1	32.62	32.50	14.62	4.82	15.53
7.2	32.62	32.98	14.39	4.89	15.30
7.3	32.62	32.50	14.62	4.89	15.30
7.4	32.62	32.98	14.39	4.82	15.53
12.1	7.37	24.58	34.71	25.58	7.85
12.2	7.37	24.95	34.18	25.96	7.73
12.3	7.37	24.58	34.71	25.96	7.73
12.4	7.37	24.95	34.18	25.58	7.85
13.1	4.75	16.01	32.13	32.50	14.62
13.2	4.75	16.24	31.64	32.98	14.39
13.4	4.75	16.01	32.13	32.98	14.39
13.5	4.75	16.24	31.64	32.50	14.62

De la tabla 6 se aclara, que las variaciones se hicieron de la siguiente forma, la disminución del 1.5% de cal y fue agregada a la ceniza orgánica, lo mismo ocurre con el cemento y el carbón mineral, este mismo proceso se realiza con la variación del 3%.

La segunda combinación fue cruzar las variaciones, en la cal se aplicó la disminución del 1.5% y al cemento el 3%, seguidamente se realizó el mismo procedimiento a la inversa, obteniendo un total de 4 variaciones, sumando la probeta inicial serian 5 en total por cada espécimen.

Esto con el fin de reducir los porcentajes de cemento y la cal, ya que estos son materiales que generan altos niveles de contaminación en todo su proceso de producción, por tal motivo no se buscaron combinaciones que aumentaran el uso de dichos materiales.

El porcentaje de arena se mantiene fijo, es tomado como un elemento neutro en las combinaciones ya que es económico y no es contaminante, además al discretizarlo de esta forma se reducen las combinaciones posibles lo que beneficia al proyecto en cuestión de tiempo y costos.

Entendiéndose que al decir " espécimen "son aquellas muestras obtenidas de la discretización de la etapa 1, en este caso, el del espécimen n°7 se obtienen las probetas (7,7.1, 7.2 ,7.3 y 7.4) multiplicado por los 3 días de pruebas serian 15, por duplicado 30, y como son 3 espécimen (7,12,13), nos daría un total de 90 probetas.

Tabla 7

Combinaciones en gramos listas para el proceso de fabricación

Probeta #	Arena (Gr)	Ceniza Orgánica (Gr)	Cal (%)	Ceniza carbón Mineral (Gr)	Cemento (Gr)
7	130.48	128.08	59.36	19.00	63.08
12	29.48	96.88	140.96	100.80	31.88
13	19.00	63.08	130.48	128.08	59.36
7.1	130.48	130.00	58.47	19.29	62.13
7.2	130.48	131.92	57.58	19.57	61.19
7.3	130.48	130.00	58.47	19.57	61.19
7.4	130.48	131.92	57.58	19.29	62.13
12.1	29.48	98.33	138.85	102.31	31.40
12.2	29.48	99.79	136.73	103.82	30.92
12.3	29.48	98.33	138.85	103.82	30.92
12.4	29.48	99.79	136.73	102.31	31.40
13.1	19.00	64.03	128.52	130.00	58.47
13.2	19.00	64.97	126.57	131.92	57.58
13.3	19.00	64.03	128.52	131.92	57.58
13.4	19.00	64.97	126.57	130.00	58.47

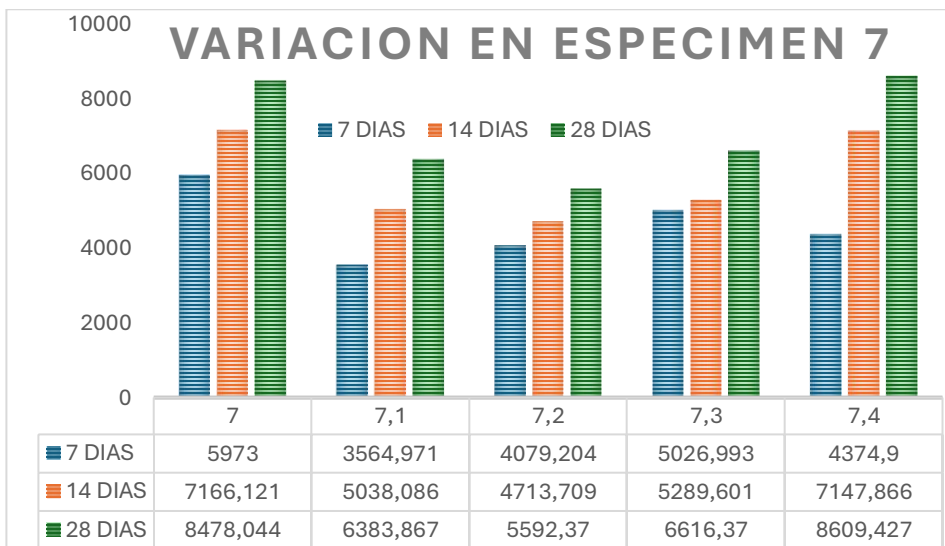
En la tabla 7 se aprecian las cantidades en masa ya ajustadas con las variaciones, lista para pasar a la fase de fabricación, curado y posterior destrucción en los ensayos de compresión.

6.2. Resultados de la Segunda etapa: Mejoramiento de la Mezcla

Los resultados obtenidos se plasmaron en 4 gráficas, una por cada espécimen y una que reúne los mejores candidatos de cada uno, en cada, grafico se aprecia los valores de esfuerzo correspondiente a las variaciones y a los días (7, 14 y 28).

Figura 8.

Resultados del espécimen número 7

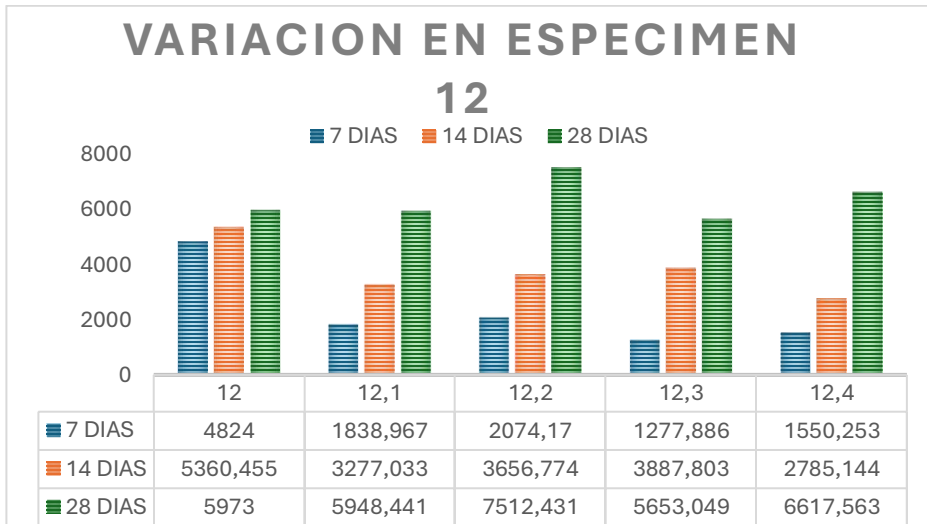


En el espécimen 7 se puede apreciar claramente la tendencia del material a mejorar a medida que transcurre el tiempo de curado, y en este caso particular la probeta 7 y 7.4 mostraron las mejores cualidades en resistencia a la compresión y tienen en común una gran parte de ceniza orgánica lo que permite inferir que es buen sustituto de la arena, también se aprecia que el cemento es fundamental en el esfuerzo máximo que soporta una mezcla.

de este espécimen se elegirá la 7.4 ya que es la mejor, comparándola con la probeta base, encontramos que tiene un aumento de 3% en ceniza orgánica y 1.5% en ceniza de carbón, así como una reducción de 3% en cal y 1.5% en cemento lo que nos arroja una mejoría del 1.55%.

Figura 9.

Resultados del espécimen número 12

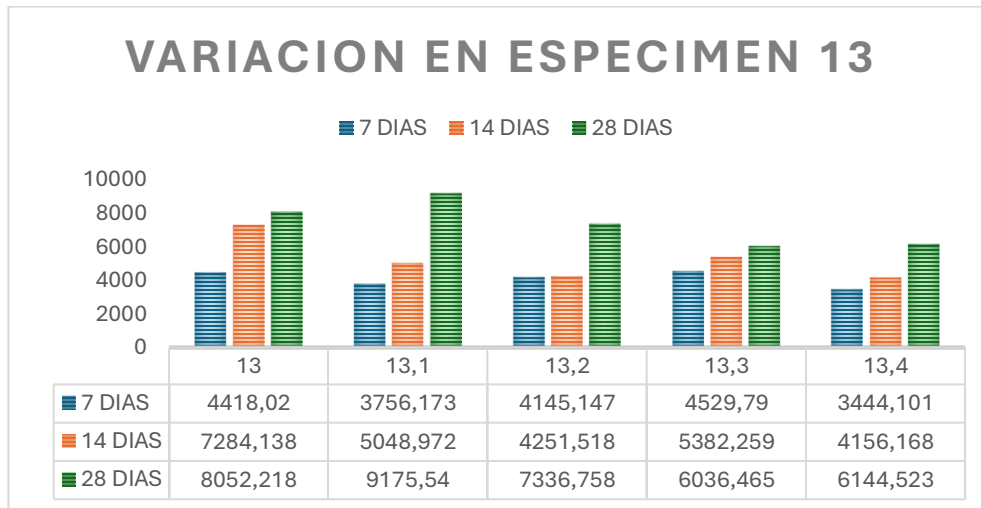


En la figura 8 correspondiente al espécimen 12 se puede apreciar un aumento considerable con una de las combinaciones realizadas, lo que cumple con las expectativas que se tenían del proceso, también se aprecia que la cal es un buen sustituto del cemento que en comparación con el espécimen 7 esta contiene mucho menos cemento, y ya que el cemento es mucho más contaminante que la cal hace que este espécimen sea muy prometedor para los objetivos del proyecto.

En este caso la probeta 12.2 presenta las mejores cualidades con diferencia respecto a las demás, recordando que en este caso sufrió un aumento de 3% en ceniza orgánica y ceniza de carbón mineral y una reducción de 3% en cal y cemento mostrando una mejoría del 25.8% lo que la convierte en una de las combinaciones más prometedoras.

Figura 10.

Resultados del espécimen número 13

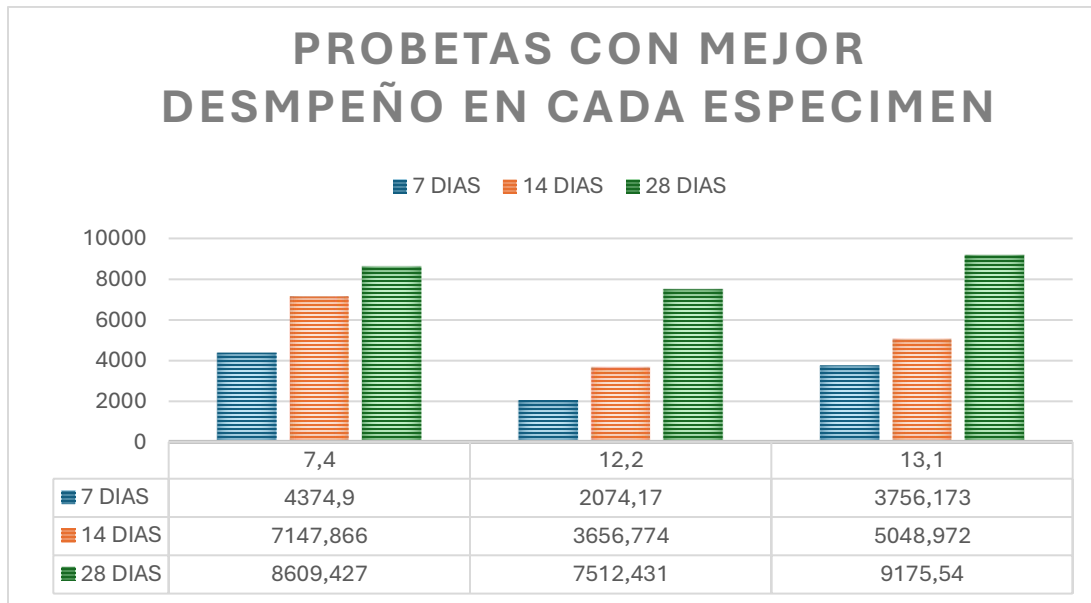


Se puede apreciar que similar al espécimen 12, el espécimen 13 también presenta una resistencia superior a costa de aumentar el porcentaje de cemento, si bien también aumenta el porcentaje de cenizas de carbón mineral, el aumento de casi el doble en cemento es desalentador para los objetivos del proyecto.

En el espécimen 13 se puede apreciar la probeta 13.1 como la superior en su grupo, esta cuenta con un aumento de 1.5% en ceniza orgánica y ceniza de carbón mineral y una reducción de 1.5% en cal y cemento mostrando una mejoría de 13.95% con respecto a la original.

Figura 11.

Probetas con desempeño superior en cada uno de sus especímenes



Aunque la probeta 13.1 presenta el mejor rendimiento aparente hay que recordar que el objetivo del proyecto es cumplir con la resistencia mínima requerida además de consumir y reutilizar residuos como lo son la ceniza, por tal motivo la elección más sensata es la combinación de materiales expresada en la probeta 12.2 ya que presenta un desempeño aceptable y es la que consume mayor cantidad de residuos y ahorra la mayor cantidad de cementantes.

Tabla 8

Valores de porcentaje y masa para cada material de la mezcla 12.2

Arena	Ceniza orgánica	Cal	Ceniza de carbón	Cemento
7.37	24.95	34.18	25.96	7.73
29.48	99.79	136.73	103.82	30.92

Con esto se finaliza la fase de mejora de la mezcla y se expone la combinación 12.2 como la mejor obtenida en este estudio, cabe mencionar que para el alcance de este proyecto se cumple el objetivo y aún

puede existir una proporción mejor, no se seguirá buscando por cuestión de tiempo, queda abierto a estudios futuros que encuentren el punto máximo de rendimiento en la mezcla.

Todas las probetas fueron fabricadas por duplicado, aun sabiendo que por norma en un proceso estadístico se deben realizar 7 réplicas para obtener una tendencia real con su respectiva desviación estándar y porcentaje de error, aun así, mediante el apoyo de antecedentes bibliográficos se puede verificar que los datos obtenidos no están por fuera de lo real, dicho esto se continuo el proceso establecido para el proyecto.

6.3. Resultados de la Segunda Etapa: Absorción de Humedad

Según (“ICONTEC. (1996). NTC 4076: ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto (parágrafo 4.3).”) la absorción de agua en ladrillos los clasifica en tres tipos, peso ligero, menos de 1680 gramos, peso mediano entre 1680 y 2000 gramos y por último peso normal, de 2000 gramos o más, los porcentajes de retención de agua son de 18%, 15% y 12% respectivamente.

Utilizando las propiedades del material brindadas por la masa y las dimensiones para la probeta 12.2 son, radio 3.5cm y altura 10 cm, se obtiene una densidad promedio de 1.04 gr/cm³ y usando las medidas de un ladrillo comercial de 22x11x5 en centímetros encontramos que un ladrillo fabricado con este material tendrá una masa de 1258,4 gr.

Tabla 9

Porcentaje de agua absorbido por el material

ABSORCION DE AGUA EN LA PROBETA 12.2			
Masa en seco	Masa húmeda	Masa agua	% agua
400 gr	473 gr	85 gr	18%

Según la norma NTC 4076 el ladrillo se clasificaría como ligero según su peso ya que es de 1254.4 gramos, con esto en mente la humedad máxima debe ser de 18% para estar alineados con la norma, y fue

justo lo que se obtuvo, con un posible error de más o menos 0.25% asociado a la toma de datos e instrumentación.

7. Etapa 3: Evaluación Bajo Norma NTC6033

En esta etapa se procede a hacer la evaluación pertinente siguiendo la norma NTC6033, esta consta de cinco ítems a evaluar, los cuales si son superados de forma exitosa hace posible la obtención de sello ambiental colombiano (SAC).

7.1. Resultados de la Tercera Etapa: Evaluación Bajo Norma NTC 6033

- "El producto debe hacer un uso sostenible de los recursos naturales que emplea como materia prima o insumo." ("ETIQUETAS AMBIENTALES TIPO I. CRITERIOS AMBIENTALES PARA LADRILLOS Y ...").

Dado que aproximadamente la mitad de los materiales empleados son productos derivados de otros procesos, podemos concluir que este criterio se cumple de manera parcial, ya que los elementos cementantes son indispensables; sin embargo, se ha trabajado en reducir al máximo su consumo.

- "El producto debe minimizar el uso de materias primas nocivas para el ambiente." ("ETIQUETAS AMBIENTALES TIPO I. CRITERIOS AMBIENTALES PARA LADRILLOS Y ...").

Si bien las cenizas de material orgánico no son contaminantes, la ceniza de carbón si suele serlo ya que normalmente trae residuos de metales pesados como mercurio, plomo y arsénico y suele producirse en grandes cantidades en la industria, este proyecto no minimiza la producción de dicho residuo, pero si busca una forma de aprovecharlo y utilizarlo en el ámbito de la construcción disminuyendo la aglomeración de este material.

- "Los procesos de producción deben utilizar menos cantidades de energía o hacer uso de fuentes de energía renovables o ambos." ("ETIQUETAS AMBIENTALES TIPO I. CRITERIOS AMBIENTALES PARA LADRILLOS Y ...").

El proceso de producción no requiere un consumo energético significativo, ya que no implica la cocción de ladrillos. En su lugar, se utiliza un secado al ambiente, lo que reduce las emisiones contaminantes. Esta alternativa, al no requerir hornos de cocción, representa un ahorro energético considerable en este aspecto.

- “El producto debe utilizar menos material de empaque, preferiblemente reciclables, reutilizables o degradables.” (“ETIQUETAS AMBIENTALES TIPO I. CRITERIOS AMBIENTALES PARA LADRILLOS Y ...”).

Este producto ofrece la ventaja de prescindir de embalaje para su almacenamiento y transporte. Está compuesto por ceniza orgánica y ceniza de carbono, siendo esta última reutilizable. Gracias a esta característica, el producto cumple con la norma de utilizar menos material de embalaje y, además, utiliza materiales preferiblemente reciclables y reutilizables.

- “Este producto debe ser fabricado haciendo uso de tecnologías limpias o generando un menor impacto relativo sobre el ambiente.” (“ETIQUETAS AMBIENTALES TIPO I. CRITERIOS AMBIENTALES PARA LADRILLOS Y ...”).

Según (“Perea Daza, B. L. (2018). Análisis documental de la contaminación atmosférica reportada por el uso del carbón en industrias ladrilleras.”). La combustión incompleta de carbón mineral en la industria cerámica causa afectaciones a la salud ya que empeora la calidad del aire agregando material particulado siendo más vulnerables los niños y ancianos, ya que el proceso productivo planteado elimina el proceso de cocción se puede decir que el ladrillo cumple a cabalidad con este ítem.

8. Etapa 4: Contrastación de Ladrillo Tradicional con el Material Obtenido

En esta etapa se busca comparar la viabilidad del material obtenido con uno comercial que ya cumple con los requerimientos y normativas, haciendo una aclaración de que el ladrillo temosa es arcilloso por lo que no está en la misma categoría que el material obtenido en el proyecto, pero como es de uso

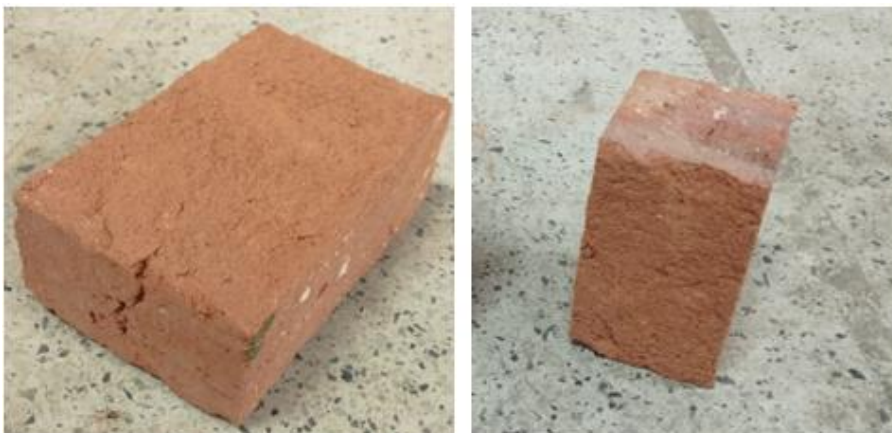
común, la comparación dará luz sobre la pregunta, ¿puede un ladrillo echo con el material obtenido en este proyecto remplazar el uso de los ladrillos convencionales?

8.1. Resultados de la Cuarta Etapa: Contrastación de Ladrillo Tradicional con el Material Obtenido

con el fin de conocer la carga que soporta un ladrillo convencional y compararlo con el obtenido, se realizan dos probetas del ladrillo temosa con área de contacto igual a las de las probetas, se debe tener en cuenta la geometría de las probetas, ya que la probeta de este proyecto es tipo cilíndrica y la preparada del ladrillo convencional es rectangular, lo que puede diferir en los resultados obtenidos.

Figura 12.

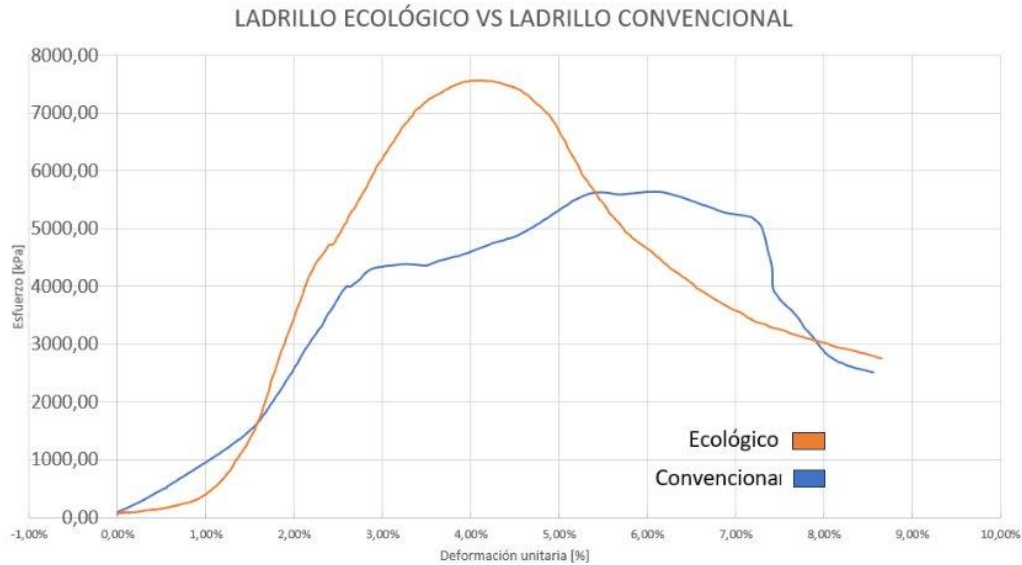
Ladrillo temosa comercial



Los resultados obtenidos en cuanto a la resistencia de compresión para el ladrillo obtenido y el convencional (temosa) son 7.5 Mpa y 5.7 respectivamente, esta prueba fue realizada en la máquina de compresión estática usada para las probetas.

Figura 13.

Grafica de comportamiento mecánico de ladrillo temosa y probeta 12.2



El resultado para el ladrillo convencional nos indica que tiende a ser menos resistente, según la gráfica, presenta fracturas en ciertos momentos durante la prueba, disminuyendo la resistencia a la compresión, probablemente se deba a la composición de su mezcla, este análisis se deja a interés de otra investigación.

Un aspecto que también resulta importante es que el ladrillo temosa al ser de tipo arcilloso se comporte de forma distinta, la comparación pudo ser mejor si se hubiera usado un ladrillo de cemento tipo comercial.

Otro aspecto que pudo alterar los datos del ensayo es la geometría de las probetas, para el ladrillo temosa no se contó con la herramienta necesaria para darle una geometría cilíndrica, por lo tanto, su geometría cuadrada distribuye los esfuerzos de forma distinta a geometría cilíndrica.

En cuanto al peso, un ladrillo ecológico con dimensiones 22*11*5 cm, tiene un peso de 1.25 kg y el convencional (temosa) 2.5 kg, siendo el primero más ligero, gracias a esta característica, se puede tener un amplio uso en lugares donde se requiera un peso restringido.

9. presupuesto

Las siguientes tablas muestran el presupuesto del que se dispuso para la ejecución del proyecto en su totalidad.

Tabla 10*Presupuesto de intangibles y documentación*

Gastos Generales	Valor
Papelería (Memorias, cartas, fotocopias, carpetas, borradores, empastes, etc.).	\$ 150. 000.00
Trabajo Intelectual.	\$ 2'000. 000.00
Asesoría Profesional (Asumido por la Universidad).	\$ 2'100. 000.00
Subtotal	\$ 4'250. 000.00

Tabla 11*Costos de fabricación*

Gastos Constructivos	Valor
Compra de materiales y accesorios	\$ 300. 000.00
Proceso de fabricación (Mano de obra)	\$ 500. 000.00
Subtotal	\$ 800. 000.00
Laboratorio	\$ 300.000.00
Imprevistos	\$ 400. 000.00
Total	\$ 6'550.000.00

10. Conclusiones

- La mezcla de los cinco componentes, arena, ceniza de material orgánico, cal, ceniza de carbón mineral y cemento cumple los requerimientos de resistencia que establece la norma NTC 4076 en varias combinaciones lo que hace viable este proyecto y da paso a la investigación posterior.
- La mezcla usada en la probeta 12.2 la cual consta de un 7.37% de arena, 24.95 de ceniza orgánica. 34.18% de cal, 25.96% de ceniza de carbón mineral y 7.73% de cemento es la combinación que presenta un excelente desempeño mecánico con una resistencia a la compresión de 7.5 Mpa además consume la mayor cantidad de residuos contemplados en el alcance de este proyecto, tiene una absorción de humedad del 18%, cumpliendo con la norma NTC 4076, lo que la hace un material utilizable con buenos parámetros mecánicos.
- El material del ladrillo cumple de forma satisfactoria las exigencias impuestas en la norma NTC 6033 por lo que en un proceso de obtención del sello ambiental colombiano (SAC) podría aprobar de forma segura, es un producto que disminuye la contaminación y el consumo de energía, además de cumplir con los requerimientos mínimos de resistencia impuestos en la norma NTC 4076.
- La utilización de cenizas de material orgánico y volantes en la fabricación de ladrillos se ha demostrado viable. La comparación realizada con un ladrillo convencional revela resultados alentadores que sugieren diversas aplicaciones potenciales. Estos ladrillos modificados muestran una notable mejora en resistencia, ligereza y capacidad de mitigación de contaminantes. Aunque inicialmente se enfocaron en aplicaciones donde no se requiere una carga excesiva, investigaciones más detalladas podrían explorar su inclusión en estructuras que demanden una resistencia superior a la considerada en este estudio.

Referencias

- Duque. G, (2015) Crean ladrillo a partir de ceniza, Especial para Portafolio., (<https://www.portafolio.co/tendencias/crean-ladrillo-partir-ceniza-52026>)
- Eliche-Quesada, D.; Felipe-Sese, MA.; Moreno-Molina, AJ.; Franco, F.; Infantes-Molina, A. (2017). Investigation of using bottom or fly pine-olive pruning ash produce environmental friendly ceramic materials. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131716304331>)
- Homecenter. (2023). Catálogo de productos (<https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/catalogo-de-productos/>).
- Marcela S. (2015) Especificaciones normalizadas para la fabricación de los moldes para ensayos de hormigón. Recuperado en: (<https://www.studocu.com/pe/document/universidad-privada-antenor-orrego/tecnologia-de-concreto/astm-c470-se-adjunta-la-norma-para-conocimiento/29623913>).
- Sika Colombia SA (sf). Aditivos para concreto [Catálogo en línea]. (<https://col.sika.com/content/dam/dms/co01/7/BROCHURE%20ADITIVOS%20PARA%20CONCRETO.pdf>)
- Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi (1993) Diseño y control de mezclas de concreto. Recuperado en: (<https://ingenierosciviles.com.mx/Biblioteca/files/original/4e03b9ddedc81f98353a2e65478f0c50.pdf>).