

**EVALUACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y PORCENTAJE DE
SUSTITUCIÓN ÓPTIMO DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN
LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN MORTERO SOSTENIBLE**

AMBAR LENNON BARON BELLO

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2017**

**EVALUACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y PORCENTAJE DE
SUSTITUCIÓN ÓPTIMO DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN
LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN MORTERO SOSTENIBLE**

AMBAR LENNON BARON BELLO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

**Asesor disciplinar: Ing. Arnold Gutiérrez
Asesor metodológico: Lic. Laura Cala**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2017**

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mis asesores metodológicos, la licenciada Laura Cala, por su gran compromiso y apoyo incondicional, por sus tan importantes orientaciones y contribución, el ingeniero Arnold gutierrez, quien dispuso su tiempo y entusiasmo para permitir que el trabajo se realizara de la mejor forma.

Agradezco también a aquellas personas que de alguna forma contribuyeron e influenciaron el desarrollo y orientación de este proyecto.

Quiero agradecer finalmente a mi familia, a mis padres que han servido de inspiración y motivación para afrontar todos los retos, por más difíciles que fuesen, y cuya influencia ha sido fundamental. Agradezco también a mis tíos, que afortunadamente han sido mis segundos padres, quienes con su amor, tolerancia, dedicación, y mucha, mucha paciencia, me permitieron a través de los años desarrollar y alcanzar mis metas. Agradezco a toda mi familia, que donde quiera que estén, y donde quiera que yo esté, sé que hay presente un amor que quiebra fronteras y alimenta el alma y la vida.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
2. JUSTIFICACIÓN	17
3. OBJETIVOS	21
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
4. MARCOS DE REFERENCIA.....	33
4.1. MARCO TEÓRICO.....	33
4.2. MARCO CONCEPTUAL.....	39
4.3. MARCO LEGAL.....	41
5. DISEÑO METODOLÓGICO	45
5.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	45
5.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	45
5.3. DISEÑO MUESTRAL	45
5.4. HIPOTESIS	47
5.5. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	48
5.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	49
5.7. FASES DE LA INVESTIGACIÓN	49
5.8. DISEÑO EXPERIMENTAL	50
5.8.1. Ensayo de fluorescencia de rayos x	50
5.8.2. Ensayo de compresión	51
5.8.3. Ensayo de flexión	52
5.9. MATERIALES EMPLEADOS	53
5.9.1. Ceniza de Bagazo de Caña de azúcar	53
5.9.1.1. Origen.....	53
5.9.1.2. Preparación.....	53
5.9.2. Cemento.....	53
5.9.3. Agua.....	54
5.9.4. Áridos	54
5.10. EQUIPOS EMPLEADOS	55
5.10.1. Tamizado.....	55

5.10.2.	Fluorescencia de rayos x	55
5.10.3.	Elaboración de probetas de mortero	56
5.10.4.	Resistencia mecánica	62
5.10.5.	Consistencia normal y tiempos de fraguado	65
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	66
6.1.	RESULTADOS DE LA CBCA.....	66
6.1.1.	Fluorescencia de rayos x	66
6.1.2.	Consistencia normal y tiempos de fraguado	67
6.2.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTERO	69
6.2.1.	Resistencia a la compresión según tamaño de CBCA	70
6.2.2.	Resistencia a la compresión según tipo de curado.....	74
6.3.	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN MORTERO.....	79
6.4.	PORCENTAJE, TAMAÑO Y CURADO ÓPTIMO	81
7.	CONCLUSIONES	83
8.	RECOMENDACIONES	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	86
	ANEXOS.....	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de resultados del ensayo Fluorescencia de rayos x en CBCA de antecedentes consultados.....	31
Tabla 2. Resumen de resultados del ensayo compresión en mortero de antecedentes consultados...	32
Tabla 3. Compuestos principales del cemento portland.....	33
Tabla 4. Límites aproximados de composición de principales fases o compuestos del cemento pórtland.	34
Tabla 5. Proporciones aproximadas de las fases o compuestos menores del cemento portland.	34
Tabla 6. Óxidos y compuestos de un cemento portland típico del medio Colombiano.....	35
Tabla 7. Especificaciones para cenizas según norma NTC 3493.	41
Tabla 8. Especificaciones para escorias de alto horno según la norma NTC 989.	42
Tabla 9. Especificaciones para el uso de humo de sílice en mezclas cementicias según la norma ASTM C 1240.....	43
Tabla 10. Resumen de las normas utilizadas para el desarrollo de los ensayos de laboratorio.	43
Tabla 11. Cantidad de muestras por ensayo y características de la muestra.	47
Tabla 12. Descripción de las variables del proyecto.....	48
Tabla 13. Proporciones para cubos de mortero de 5*5*5 cm.	51
Tabla 14. Proporciones mortero ensayo a compresión para diferentes % de sustitución.	52
Tabla 15. Proporciones mortero ensayo a flexión para diferentes % de sustitución.	52
Tabla 16. Especificaciones técnicas cemento gris Argos tipo 1.....	54
Tabla 17. Caracterización química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar mediante el ensayo de fluorescencia de rayos x.	66
Tabla 18. Rango de la composición química de la CBCA según antecedentes.....	67
Tabla 19. Tiempo de fraguado inicial y final de la norma y de las muestras estudiadas.	68
Tabla 20. Resultados de esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para tamaños T#100-#200 y T#200, porcentajes de sustitución de 15%, 20% y 25% de sustitución y curado ambiente.....	70
Tabla 21. Valores de relación entre % de sustitución, tamaño de CBCA y resistencia a la compresión.....	73
Tabla 22. Valores esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para sustituciones de 10% 15%, 20% y 25%, tamaño T#200 y curado ambiente y sumergido.....	74
Tabla 23. Valores % de sustitución vs esfuerzo de compresión para 28 días de curado ambiente y sumergido.....	78
Tabla 24. Comparación de la resistencia a la compresión entre curado sumergido y curado ambiente.....	79
Tabla 25. Resultados ensayo resistencia a la flexión para 28 días de curado ambiente.	80

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Procesos de la caña de azúcar.	15
Ilustración 2. Vivienda típica proyecto.....	25
Ilustración 3. Matriz de ensayos compresión y flexión.....	46
Ilustración 4. Arena de sílice usada en la elaboración de todos los morteros.....	54
Ilustración 5. Perladora Minifuse para fluorescencia de rayos x.	55
Ilustración 6. Espectrómetro de fluorescencia de rayos x.	56
Ilustración 7. Mezcladora mecánica del Laboratorio de materiales de la Universidad La Gran Colombia.....	57
Ilustración 8. Dimensiones de la paleta mezcladora.	57
Ilustración 9. Paleta mezcladora del Laboratorio de Materiales de La Universidad La Gran Colombia.....	58
Ilustración 10. Dimensiones del recipiente de mezcla.	58
Ilustración 11. Recipiente de mezcla del Laboratorio de materiales de La Universidad La Gran Colombia.....	59
Ilustración 12. Procedimiento de apisonado para compresión.	61
Ilustración 13. Procedimiento de apisonado para flexión.	61
Ilustración 14. Centrado de la probeta ensayo compresión simple.	62
Ilustración 15. Máquina universal ensayo compresión simple.....	63
Ilustración 16. Montaje ensayo de flexión.....	63
Ilustración 17. Especificaciones de la base y apoyos para ensayo de flexión en mortero.	64
Ilustración 18. Montaje de vigueta para ensayo de flexión en morteros.	64
Ilustración 19. Aparato de Vicat de la universidad La Gran Colombia.	65
Ilustración 20. Fases de desarrollo del ensayo de compresión.....	69

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Indicador productividad mundial de producción de caña de azúcar. Toneladas por hectárea cuadrada. (Años 2011-2015).	18
Gráfica 2. Producción anual de azúcar y caña molida anualmente en Colombia entre los años 2000 – 2016.	19
Gráfica 3. Penetración de la aguja Vicat vs tiempo de fraguado con 31% de humedad.....	67
Gráfica 4. Penetración de la aguja Vicat vs tiempo de fraguado con 32% de humedad.....	68
Gráfica 5. Esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para tamaños T#100-#200 y T#200, porcentajes de sustitución de 15%, 20% y 25% de sustitución y curado ambiente.	72
Gráfica 6. Relación entre % de sustitución, tamaño de CBCA y resistencia a la compresión.....	73
Gráfica 7. Esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para sustituciones de 10% 15%, 20% y 25%, tamaño T#200 y curado ambiente y sumergido.....	75
Gráfica 8. Esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para sustituciones de 10% 15%, 20% y 25%, tamaño T#200 y curado ambiente.	76
Gráfica 9. Esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para sustituciones de 10% 15%, 20% y 25%, tamaño T#200 y curado sumergido.	77
Gráfica 10. % de sustitución vs esfuerzo de compresión para 28 días de curado ambiente y sumergido.....	78
Gráfica 11. Esfuerzo de flexión para 28 días de curado ambiente vs % de reemplazo.	81

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Resistencia a la compresión promedio de las muestras de mortero.	71
Ecuación 2. Esfuerzo a la compresión de muestras de mortero.	71
Ecuación 3. % de esfuerzo de compresión del mortero modificado con respecto al mortero convencional.	71
Ecuación 4. Esfuerzo de flexión en muestras de mortero.	80

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados ensayo de Fluorescencia de rayos x aplicado a la ceniza de bagazo de caña de azúcar y realizado por la Universidad Nacional de Colombia.	93
---	----

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo busca evaluar la resistencia a la compresión simple y a la flexión en función del tamaño de partícula de ceniza de bagazo de caña de azúcar (en adelante CBCA) y el porcentaje de sustitución de cemento portland por CBCA en mezclas de mortero, de tal forma que se obtenga la máxima resistencia en la mezcla de mortero modificado.

Es importante investigar el porcentaje de sustitución en peso el cemento portland por CBCA que aporte a la mezcla de mortero una resistencia igual o preferiblemente superior a la resistencia alcanzada por las mezclas de mortero convencionales. Debido a que la CBCA es un material puzolánico, y no un material cementicio, una sustitución muy alta puede llegar a disminuir significativamente la resistencia del mortero, mientras que una sustitución muy baja, puede llevar a que la implementación de la CBCA no sea viable.

Además del porcentaje de sustitución, es importante estudiar el efecto que tiene el tamaño de partícula de CBCA en la resistencia de la mezcla de mortero. Si la máxima resistencia del mortero modificado se obtiene con el tamaño de partícula natural, el costo de procesar el material para la elaboración de mortero es muy bajo, pero si es necesario implementar procesos para disminuir el tamaño de partícula, estos costos adicionales pueden hacer que el uso de la CBCA no sea factible.

Los beneficios de implementar la CBCA, como sustitutos del cemento portland, es reducir significativamente el costo en mezclas de mortero y concreto para el sector de la construcción, debido a que es un desecho del sector azucarero, y también disminuir la gran contaminación que se genera en primer lugar en la producción del cemento portland, cuya producción implica explotación de canteras para obtener las materias primas y en su proceso de clinkerización genera cerca del 7% del CO₂ emitido a la atmósfera. Y en segundo lugar dar un uso útil a un material residual que en Colombia se genera en gran cantidad y evitar su uso como material de abono, debido al alto contenido de metales pesados.

Las investigaciones sobre la CBCA en distintos países, muestran que la composición química varía en todas las investigaciones y la resistencia obtenida por las muestras varía de igual forma, por esta razón es de suma importancia reconocer previo a los ensayos de resistencia, las propiedades químicas de la CBCA y con estas identificar su capacidad puzolánica.

Se determinó la resistencia a la compresión y a la flexión alcanzadas por morteros modificados con CBCA usando dos tamaños de partícula y cuatro porcentajes de sustitución de CBCA por cemento portland en las muestras de mortero. Además se

determinó la consistencia y el tiempo de fraguado de mezclas de pasta de cemento modificadas con CBCA.

Según los resultados presentados por los morteros modificados con CBCA, ya que estos presentan una alta capacidad de resistencia mecánica, es óptimo implementar de la CBCA del sector azucarero del Valle del Cauca de Colombia en mezclas de mortero, dando respuesta a la actual necesidad de materiales sostenibles que disminuyan la contaminación ligada a los materiales convencionales de construcción y a las altas demandas de construcción en países en vía de desarrollo como es el caso de Colombia.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de la CBCA en mezclas de mortero pretende disminuir el consumo de cemento portland conservando y si es posible mejorando propiedades esenciales como lo son el comportamiento mecánico y la manejabilidad. Además, para que las investigaciones acerca de materiales sustitutos de cemento portland, como la CBCA, puedan ser viables, los materiales de construcción producidos a partir de estos materiales, deben cumplir toda la normatividad y especificaciones que se aplican en los materiales de construcción tradicionales, y además, su producción debe tener un valor agregado para la industria de la construcción, como un menor costo o mejores características mecánicas, de durabilidad o trabajabilidad, además de traer beneficios para el sector ambiental y social de una comunidad.

Por esta razón es de suma importancia determinar las variables que afectan el comportamiento mecánico del mortero modificado, para de esta forma encontrar las proporciones que logren las características más óptimas de resistencia y de esta forma, producir una mezcla de mortero que cumpla las especificaciones técnicas. Entre las variables que afectan la resistencia de un mortero modificado con CBCA, se encuentra el tamaño de partícula de la ceniza, el cual en el caso de no presentar un buen comportamiento con un tamaño muy grande, va a necesitar un tratamiento adicional para reducir el tamaño y esto afectará no sólo la resistencia, sino que al requerir un tratamiento adicional, el costo de producción del mortero modificado va a ser más alto, e inversamente proporcional al tamaño de partícula que se quiera alcanzar. Otra de las variables que afecta la resistencia en el mortero modificado, es el porcentaje de cemento que deba ser reemplazado por CBCA, dicho porcentaje es de suma importancia, ya que la CBCA no posee la capacidad de presentar propiedades cementantes en presencia de agua, así que el cemento portland sigue siendo el componente principal, pero la ceniza debe disminuir el consumo de cemento portland de forma significativa, para que de esta manera, la investigación genere los beneficios necesarios para que su uso en el sector de la construcción sea viable.

Otra de las problemáticas ligadas al presente proyecto de investigación, es la gran contaminación producida por el sector de la construcción, en donde se encuentra específicamente la explotación de materiales para la construcción a través de canteras, la cual es una actividad que acaba con los recursos naturales no renovables del planeta. Cabe resaltar que en países en vía de desarrollo como Colombia, el cual es el tercer país con mayor población de América Latina, superado por Brasil y México y cuenta con cerca de 47 millones de habitantes, hay una gran demanda de materiales de construcción¹. Además, la explotación de materiales se presenta en mayor grado debido a que en los planes de

¹ FEDERACIÓN INTERAMÉRICANA DEL CEMENTO (FICEM). Informe estadístico 2013. 2013. p. 13.

desarrollo de estos países, la construcción es uno de los aspectos más importantes, buscando crear y mejorar la infraestructura nacional.

Específicamente, el cemento portland es el material cementante más usado a nivel mundial en todas las construcciones. Colombia es el sexto país con mayor producción de cemento portland de Latinoamérica y el Caribe, produciendo 13.2 Millones de toneladas en el año 2016². La producción de cemento portland tiene dos fases que destacan porque se genera gran contaminación. En primer lugar se encuentra la explotación de canteras para extraer la materia prima, para mostrar el grado de contaminación, una empresa productora de cerca de un millón de toneladas de cemento portland llega a extraer cerca de 20 millones de metros cúbicos en 25 años³. La segunda fase que genera gran contaminación es la etapa de clinkerización, en donde el cemento es llevado a temperaturas entre 1280°C y 1500°C, en donde se produce una descalcificación de varios compuestos, esta etapa es la responsable de alrededor del 7% de la generación de CO₂ anual a la atmosfera⁴⁵. Cabe destacar también el gran consumo energético y de materiales fósiles usados en la producción del cemento portland.

Debido a esta alta producción de materiales de construcción convencionales y a la gran contaminación que genera, y a la creciente explotación de materiales no renovables del planeta, se ha generado en todo el mundo un gran interés en la búsqueda de materiales residuales que puedan ser usados como sustituyentes de los materiales convencionales, logrando igual o mejor calidad que estos materiales convencionales como el cemento portland, para de esta forma disminuir el consumo de materias primas no renovables, disminuir la contaminación y dar uso más útil a materiales residuales de distintos sectores industriales⁶. Unos de los materiales recientemente investigados son los residuos del sector azucarero, conocidos como bagazo de caña de azúcar y ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Otra problemática presente tiene que ver con la gran cantidad de residuos caña de azúcar que se genera en Colombia, este país es uno de los principales productores de ceniza de bagazo de caña de azúcar en el mundo y gracias a las características agroclimáticas y al avance tecnológico, la región es líder en producción de caña de azúcar a nivel mundial, con

² DANE. Estadísticas de cemento gris. Boletín técnico. Colombia. 2016.

³ RAMÓN MARTÍNEZ, Alejandro. Estudio del sector cementero a nivel mundial. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2014. p. 67.

⁴ PUERTAS, Francisca, et al. Empleo de residuos cerámicos como materia prima alternativa para la fabricación de clínker de cemento Portland. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. España. 2007. p. 19.

⁵ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Tercera edición. Bogotá, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. 2001. p. 35.

⁶ TORREZ Rivas, et al. Valorización de la ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial del cemento portland. Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua. 2014. Revista científica NEXO, Vol. 27. p. 83.

más de 14 toneladas de azúcar por hectárea al año. Según ASOCAÑA⁷, en Colombia existe un gran sector azucarero ubicado en el Valle del cauca, que cuenta con 225.560 hectáreas sembradas con caña para azúcar, las cuales abastecen a los 13 ingenios ubicados en la zona. Desde el año 2005, cinco de estos ingenios cuentan con destilerías cercanas para la producción de alcohol carburante.

La caña de azúcar es usada generalmente para la producción de azúcar y etanol. Como resultado de estos procesos, se obtiene el residuo conocido como el bagazo, el cual es usado en un porcentaje para producir papel y el resto de bagazo es quemado a temperaturas entre 700°C y 900°C en calderas para generación de vapor de alta presión y con este producir energía eléctrica; como resultado de este último proceso, se obtiene la ceniza del bagazo de la caña de azúcar. Esta ceniza ha sido usada como material de abono, pero debido al alto contenido de metales pesados en la ceniza, se genera daños en el suelo⁸. Es por esto que en la presente investigación se plantea detener el uso de la CBCA como material de abono y utilizarla en el sector de la construcción. El proceso actual por el que pasa la caña de azúcar estudiada y sus residuos se muestra en la ilustración 1.

Ilustración 1. Procesos de la caña de azúcar.



Fuente: INCAUCA S.A.S. Fuente: <http://bit.ly/2rzeD0v>

A pesar del gran aporte al desarrollo socioeconómico que genera el sector azucarero, este también genera gran cantidad de residuos de bagazo y ceniza de bagazo. En la necesidad de

⁷ ASOCAÑA. El sector azucarero Colombiano en la actualidad. Disponible en: www.asocaña.org.

⁸ SALES, Almir y ARAÚJO, Sofía. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. Revista Science Direct. Universidad Federal de San Carlos. Brazil. p. 1.

dar un uso útil y reducir el impacto ambiental negativo, se ha desarrollado en países con gran producción de caña de azúcar, estudios para implementar la Ceniza del Bagazo de la Caña de Azúcar (CBCA) como un material puzolánico para el cemento portland. Una de las principales características que se observó para el desarrollo de dichas investigaciones, fue el alto contenido de Sílice, el cual es un componente fundamental del cemento portland⁹.

Además de los estudios que pretenden agregar CBCA a mezclas de mortero y concreto, también hay estudios que pretenden sustituir de forma parcial o total el uso del cemento portland para en cambio utilizar la CBCA disminuyendo la producción de cemento portland y la contaminación ligada a dicha producción. Los resultados han mostrado que en las mezclas de mortero, reemplazando parcialmente el cemento portland por CBCA, se ha mejorado la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión del concreto¹⁰.

La Ceniza del Bagazo de la Caña de Azúcar ha sido usada como un material puzolánico para cemento. Aunque existe recientes estudios sobre la implementación de este material residual en la elaboración de mezclas de mortero y concreto, y su incidencia en la variación de las propiedades mecánicas, la proporción más adecuada dentro de mezclas de mortero y concreto y el tamaño de ceniza más óptimo, varían a través de las investigaciones.

Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál porcentaje de sustitución de ceniza de bagazo de caña de azúcar por cemento portland y tamaño de dicha ceniza confieren la mayor resistencia a compresión a una mezcla de mortero?

⁹ VIDAL Diana, *et al.* Estudio comparativo de cenizas de bagazo de caña como adición puzolánica. Revista Colombiana de Materiales. Medellín, Colombia. p. 14.

¹⁰ HENAO Salomón, LIBREROS Juan y RAMÍREZ Aníbal. Evaluación de la ceniza proveniente del bagazo de caña de azúcar como material cementante alternativo para la elaboración de morteros. Cali: Pontificia Universidad Javeriana. p. 79.

2. JUSTIFICACIÓN

La importancia de esta investigación en el ámbito de materiales de construcción sostenibles, radica en la idea de sugerir nuevos materiales para lograr, entre otros, mezclas de mortero que utilicen materiales residuales y que en su producción generen menor impacto ambiental negativo en el ambiente. La investigación científica debe crear esta serie de alternativas, luego de un proceso riguroso de pruebas y análisis de resistencia y durabilidad para sugerir a la comunidad académica nuevos conocimientos que puedan mejorar el acervo teórico sobre este tema. Además puede llegar en un momento determinado a implementarse de forma práctica en el trabajo cotidiano de la ingeniería civil los conocimientos logrados en los laboratorios de la facultad de ingeniería civil de la Universidad La Gran Colombia.

La importancia de determinar el porcentaje óptimo de sustitución de cemento portland por CBCA, es fundamentalmente conocer con qué cantidad de cemento y CBCA la mezcla de mortero alcanza la máxima resistencia a la compresión y a la flexión, y comparar esta resistencia con la de un mortero convencional, determinando si el mortero modificado iguala o mejora sustancialmente la capacidad mecánica con respecto al mortero convencional, lo que beneficiaría al sector de la construcción, mostrando que el uso de las muestras de CBCA en mortero es óptimo porque mejora la resistencia mecánica y disminuye el costo de la construcción ya que se disminuye el cemento usado y en su lugar se emplea un desecho del sector azucarero. Otro beneficio económico consiste en que para su producción se requiere menor tecnología, ya que sólo es necesario su tamizado y si posiblemente un procedimiento de molienda para disminuir el tamaño de partícula.

Al disminuir el consumo del cemento portland, se generaría un beneficio ambiental, reduciendo la explotación de canteras y la emisión de CO₂ a la atmósfera ligados a la producción del cemento portland. Además se generaría un beneficio al desarrollo social, debido a que las poblaciones más necesitadas y de bajos recursos, tendrían más accesibles estos materiales de construcción por su bajo costo. Finalmente, las industrias azucareras, se beneficiarían deteniendo el uso de la CBCA como material de abono, que debido al contenido de metales pesados, contamina el suelo.

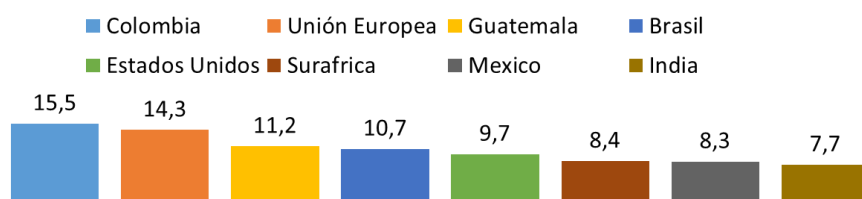
Es necesario conocer la variación de la resistencia del mortero modificado con CBCA en función del tamaño de partícula de la ceniza, debido a que la CBCA que se obtiene de las calderas de las industrias azucareras presenta tamaños de partícula grandes con respecto al tamaño de partícula del cemento portland, además las muestras que de CBCA que se obtienen, poseen un alto porcentaje de material orgánico no quemado, el cual no va a presentar comportamiento óptimo en las mezclas de mortero. Por esta razón se debe

determinar la relación entre el tamaño de partícula de la ceniza y la resistencia del mortero modificado, y de esta forma determinar el costo de llevar la ceniza natural al tamaño requerido, que en caso de ser muy alto haría que el uso de la CBCA como sustituto del cemento portland no sea viable.

El argumento que respalda la intención de disminuir el consumo de cemento portland tiene que ver con que la demanda de cemento portland en el sector de la construcción es muy elevado, según en DANE¹¹ en el año 2016 en Colombia se registró una producción de cemento gris de 13,2 Millones de toneladas. También es importante mencionar la fuerte emisión de contaminantes que se presenta en el proceso de fabricación del cemento portland tradicional¹².

Además de la alta producción de cemento, la razón que fundamenta el uso de CBCA consiste en que tanto en Colombia como en el mundo se presenta una alta producción de azúcar, según ASOCAÑA, en el año 2015 Colombia ocupó el primer puesto en productividad mundial de caña de azúcar¹³, como se muestra en la gráfica 1, es decir toneladas de azúcar por hectárea cuadrada. En ese mismo año se produjo en todo el mundo 169 Millones de toneladas de azúcar, de las cuales Colombia ocupó el puesto 13 produciendo 2.35 Millones de toneladas de azúcar¹⁴, para las cuales se necesitó moler 24.2 Millones de toneladas de caña de azúcar.

Gráfica 1. Indicador productividad mundial de producción de caña de azúcar. Toneladas por hectárea cuadrada. (Años 2011-2015).



Fuente: ASOCAÑA. Tomado de: <http://bit.ly/2oF5mBi>. p. 44.

¹¹ DANE. Estadísticas de cemento gris. Boletín técnico. Colombia. 2016.

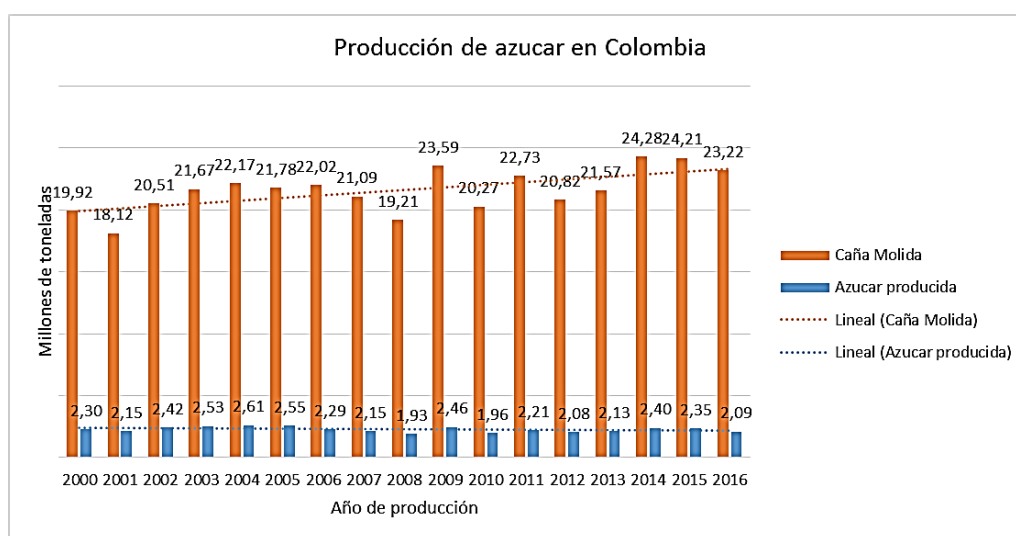
¹² TORREZ Rivas, et al. Valorización de la ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial del cemento portland. Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua. 2014. Revista científica NEXO, Vol. 27. p. 83.

¹³ ASOCAÑA. Aspectos generales del sector azucarero Colombiano 2015-2016. Disponible en: <http://bit.ly/2oF5mBi>. p. 44.

¹⁴ ASOCAÑA. Aspectos generales del sector azucarero Colombiano 2016-2017. Disponible en: <http://bit.ly/2sv7vle>.

Según ASOCAÑA¹⁵ La producción de azúcar en Colombia ha presentado variaciones poco significativas desde el año 2000 hasta el año 2016, con un valor promedio de 2.3 millones de toneladas de azúcar producido anualmente. Por otro lado, la cantidad de caña molida ha venido presentando un aumento significativo entre los años mencionados, tal como se muestra en la gráfica 2. Esto quiere decir que el sector azucarero anualmente produce alrededor de 20 Millones de toneladas de residuos, de los cuales el residuo de ceniza es susceptible a estudios para ser usado como material puzolánico en mezclas de mortero y concreto. De esta forma se puede emplear un residuo del sector azucarero en la industria de la construcción y reducir significativamente la producción de cemento portland.

Gráfica 2. Producción anual de azúcar y caña molida anualmente en Colombia entre los años 2000 – 2016.



Fuente: ASOCAÑA. Tomado de: <http://bit.ly/1MaN8OE>

Para fundamentar la implementación de la CBCA como sustituto parcial del cemento portland, es de principal importancia es el aspecto técnico, y que en el para que un material alternativo pueda reemplazar al cemento portland, debe evaluarse la calidad y características de resistencia de este material alternativo y estos no deben ser inferiores al del material convencional, por eso es necesario comparar los resultados de dichos materiales modificados con las especificaciones de los materiales convencionales.

En este orden de ideas, la CBCA ha sido estudiada en diversos países aproximadamente desde el año 2000, y a pesar de que las características químicas de la ceniza, y las características mecánicas de los morteros y concretos modificados con CBCA, varían de un

¹⁵ ASOCAÑA. Balance azucarero colombiano Asocaña 2000 - 2017 (toneladas). Disponible en: <http://bit.ly/1MaN8OE>.

estudio a otro, en la mayoría de estudios coinciden en que el uso de la CBCA en mezclas de mortero y concreto es óptimo debido a que esta ceniza se comporta como una puzolana, ya que sus aluminosilicatos reaccionan con el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento portland mejora la resistencia a ambientes ácidos, es decir mejora la durabilidad, y al realizarse dicha reacción rellenan los espacios resusltantes de la reacción de hidratación del cemento, es decir que mejora la resistencia mecánica y la impermeabilidad¹⁶.

De esta forma se pretende profundizar y aportar conocimiento que pueda ser útil en la búsqueda de materiales alternativos sostenibles para el sector de la construcción, sector que actualmente genera gran contaminación ambiental tanto en la fabricación de sus materiales como a la hora de desarrollar los proyectos constructivos, para así generar conocimiento mediante la investigación y estudiar la mayor cantidad de características posibles de estos materiales, y la mejor forma de implementarlos en la construcción.

¹⁶ ALVAREZ MANTILLA, Hernando. Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Colombia. 2010. Universidad Industrial de Santander. p. 38.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el porcentaje óptimo de reemplazo de cemento por ceniza y tamaño de ceniza de caña de azúcar para obtener mayor resistencia en una mezcla de mortero.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar para determinar el carácter puzolánico del material, mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X.
- Determinar la resistencia a la compresión y flexión de muestras de mortero para dos tamaños distintos de ceniza y distintos porcentajes de sustitución.
- Establecer el porcentaje de sustitución de cemento por CBCA que confiera la mayor resistencia a la compresión y flexión a una mezcla de mortero.

4. ANTECEDENTES

El trabajo de ÁGUILA y SOSA¹⁷, denominado “Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos”, de la Universidad Central de Venezuela, del año 2008, es el primer referente del estado de la cuestión presente. El estudio realizado consistió en una caracterización de algunos residuos del sector agroindustrial venezolano, evaluando la potencialidad de ser usados como materiales puzolánicos para cemento pórtland. Los materiales usados fueron cenizas de cascarilla de arroz, de hoja de maíz y de bagazo de caña de azúcar, todas estas con importantes cantidades de sílice amorfa en su composición química.

En primer lugar se realizaron caracterizaciones químicas y físicas, para determinar si poseen la composición necesaria para ser clasificados como puzolanas, sobre esto el autor concluyó que uno de los elementos principales de una puzolana de buena calidad es el contenido de sílice, la ceniza de bagazo de caña de azúcar resultó no ser muy efectiva en este aspecto debido a que presentó un contenido de sílice del 36% comparado con la gran potencialidad de la ceniza de cascarilla de arroz que presentó más de 80% de sílice. Posteriormente se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y durabilidad en muestras de mortero, realizadas con sustituciones parciales de cemento por cada materia en porcentajes del 10% al 30% en peso del cemento portland. Las cenizas de bagazo de caña de azúcar no mostraron probabilidad de ser empleadas como material puzolánico. Ante el resultado anterior, el autor recomienda estudiar los procesos de los cuales procede la ceniza de bagazo de caña de azúcar y de cualquier puzolana a estudiar. Por otra parte, las cenizas de cascarilla de arroz mejoraron la resistencia a la compresión del mortero, siendo el porcentaje de sustitución ideal el 20%.

El aporte de esta investigación en el presente proyecto es que para residuos del sector agroindustrial que se quieran usar como material puzolánico, es fundamental que presenten un alto contenido de sílice amorfa en su estructura. Acerca del porcentaje de sustitución por cemento portland, el que presenta la máxima resistencia está alrededor del 20% en peso del cemento portland.

El trabajo de VIDAL, TORRES Y GONZALES¹⁸, denominado “Ceniza de bagazo de caña para elaboración de materiales de construcción: estudio preliminar”, de Colombia, del año

¹⁷ ÁGUILA, Idalberto y SOSA, Milena. Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. Venezuela. 2008. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. Vol. 23 (4).

¹⁸ VIDAL, Diana; TORRES, Janneth y GONZALEZ, Luis. Ceniza de bagazo de caña para elaboración de materiales de construcción: estudio preliminar. Colombia. 2014. Revista de física. Vol. 48 E. p. 14-23.

2008, es el segundo referente del estado de la cuestión presente. El estudio consistió en la caracterización física y química de tres muestras de ceniza de bagazo de caña de azúcar procedentes de ingenios azucareros del Valle del Cauca. Los resultados mostraron que las cenizas contienen Sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), en diferentes proporciones, y poseen amorficidad en su estructura, lo que favorece la reactividad con cemento. Las muestras fueron tratadas debido al alto contenido de material no quemado, y se les determinó la actividad puzolánica, presentando valores de hasta 97%, cumpliendo con las especificaciones de la norma ASTM C618 para puzolanas.

El aporte de esta investigación en el presente proyecto consiste en que las CBCA que se usen como material de reemplazo del cemento portland, deben estar compuestas principalmente de sílice y alúmina, y poseer una estructura amorfa, para que la reactividad con el cemento y su comportamiento mecánico sean óptimos.

El trabajo de MEJIA MARTINO¹⁹, denominado “Componentes alternativos para la producción de concreto en la construcción de vivienda ambientalmente sostenible”, de la universidad EAFIT de Colombia, del año 2011, es el tercer referente del estado de la cuestión presente. El trabajo consistió en una investigación acerca de componentes alternativos para el concreto y las consideraciones técnicas que deben tenerse en cuenta sobre estos materiales a la hora de su implementación en la construcción. Según el autor, la ceniza de bagazo de caña de azúcar está compuesta principalmente por silicio y puede desarrollar actividades puzolánicas dependiendo de las características de quema y del tamaño de partícula.

Según el autor MEJIA MARTINO, las cenizas de bagazo de caña de azúcar tienen un comportamiento similar al de las cenizas volantes, si alcanzan temperaturas de activación y permanecen el tiempo apropiado dentro de las calderas. Además Las CBCA mezcladas con cal, producen un conglomerante que puede funcionar por si solo o al combinarlo con alguna cantidad de cemento portland, se pueden ejecutar obras de pequeño nivel.

El autor MEJIA MARTINO, habla sobre un proyecto en Colombia, en donde se redujeron los costos de construcción en una vivienda de interés social. La Federación Nacional de Vivienda Popular de Colombia (FENAVIP) y la corporación CONSTRUIR generaron un proyecto en el cual planteaban la reducción de costos de la construcción de una vivienda de interés social con bloques de concreto, en los cuales se implementaron cenizas de bagazo de caña de azúcar. En el proyecto se plantearon estrategias que buscaban principalmente optimizar el diseño de mezcla para la prefabricación de bloques de concreto, la fabricación

¹⁹ MEJÍA MARTINO, Marlon Esteban. Componentes alternativos para la producción de concreto en la construcción de vivienda ambientalmente sostenible. Colombia. 2011. Universidad EAFIT.

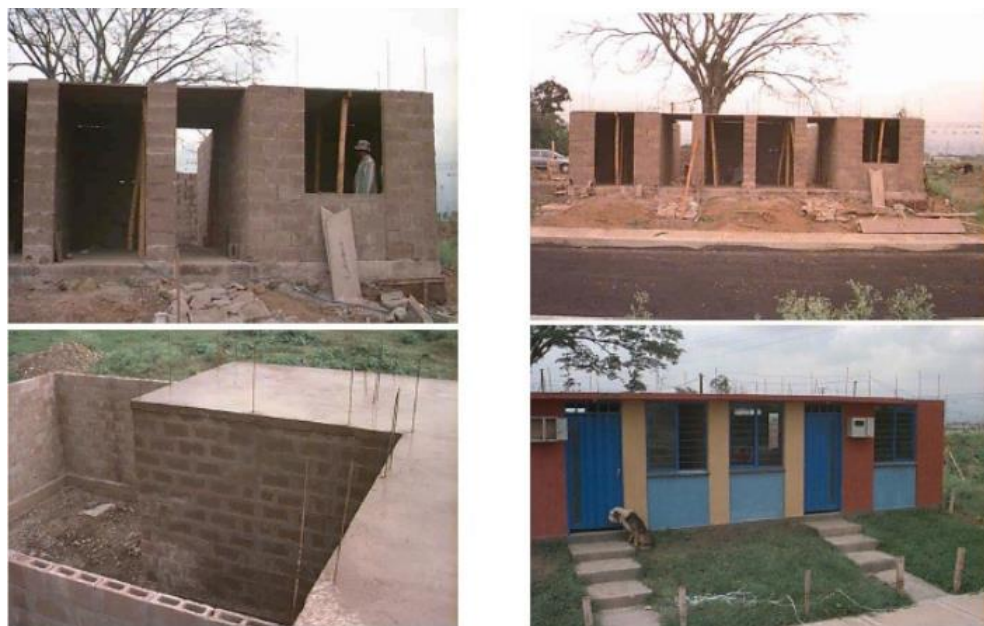
de losas y fundaciones en concreto y la elaboración de morteros de inyección, reduciendo los costos de producción aplicando tecnologías innovadoras.

FENAVIP, fabricó bloques de concreto con un consumo promedio de 201 Kg de cemento portland (tipo I) por bloque. Esa cantidad de cemento aseguraba la resistencia de 80 kg/cm² establecida en la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-98. La corporación CCONSTRUIR, logró optimizar las mezclas con una disminución significativa del consumo de cemento por bloque. Se desarrolló utilizando 0.5 Kg de cemento portland (Tipo III) por bloque e incorporando adiciones activas e inertes. Con esas especificaciones se cumplió con las especificaciones exigidas por la NSR-98, para construir con muros estructurales en bloques. La cantidad total usada de material cementante (cemento más adiciones), fue de 1.2 Kg por bloque. Los bloques modificados, alcanzaron la resistencia especificada a los 28 días de curado.

La cantidad de cemento utilizada por FENAVIP para la elaboración de concretos de 3000 PSI, era de 7 sacos de cemento (350 Kg/m³ de concreto). Mientras que la corporación CONSTRUIR optimizó el diseño de mezcla con el método de los mínimos espacios vacíos. Así diseñaron concretos de 3000 PSI con 270 Kg de cemento pórtland tipo III y se incorporaron 70 kg de adición (Ceniza de bagazo de caña de azúcar), todo por m³ de concreto. Dicha dosificación garantizó la resistencia especificada. En la mezcla se utilizó un superplastificante con el cual se controló la relación agua/cemento. La cantidad de aditivo utilizada fue de 1.5% del peso del cemento, es decir, 4 Kg por m³ de concreto.

Para la construcción de la cimentación, según las especificaciones de diseño, se requerían concretos de 3000 PSI. Para esto se utilizaron 350 Kg de cemento por m³ de concreto. Para la construcción de la losa, se utilizaron 300 Kg de cemento por m³ de concreto. Con esa cantidad de cemento, se alcanzó una resistencia de 2500 PSI de resistencia a la compresión. En el desarrollo realizado por CONSTRUIR se diseñaron concretos de 3000 PSI con la utilización de 270 Kg de cemento más 70 Kg de adición, para un total de 340 Kg de material cementante por m³ de concreto. En los casos de los concretos para las losas, se emplearon 240 Kg de cemento más 80 Kg de adición, obteniéndose concretos de 2500 PSI a los 28 días de curado. En la ilustración 2 se muestra la vivienda de interés social de la que se habla anteriormente.

Ilustración 2. Vivienda típica proyecto



Fuente: MEJÍA MARTINO, Marlon Esteban²⁰.

El aporte de esta investigación en el presente proyecto consiste en que la CBCA debe tener un alto contenido de sílice para que presente un óptimo comportamiento puzolánico, y para que se presente una óptima reactividad con cemento, la temperatura de combustión y el tamaño de partícula son parámetros muy importantes. Además, es necesario reconocer la mineralogía de la muestra de CBCA para determinar si el material es cristalino o amorfo, en caso de que sea cristalino, la muestra requiere un tratamiento térmico, pero si el material es amorfo, está casi listo para ser usado como material puzolánico y puede separarse directamente de la materia orgánica del bagazo. Para optimizar la reactividad de las cenizas a producir, se realiza una combustión controlada. Acerca de la aplicación de la CBCA en un proyecto de construcción de vivienda, este es un ejemplo claro de que su uso en el sector de la construcción tiene grandes beneficios económicos, ya que su implementación reduce significativamente el costo de construcción manteniendo las especificaciones de resistencia y disminuyendo su peso, lo que es ideal, ya que la estructura es más liviana y tiene la misma capacidad que las convencionales.

El trabajo de A. Tórrez Rivas²¹, denominado “Valorización de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial al cemento Portland”, de la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua, del año 2014, es el cuarto referente del estado de la cuestión presente. El estudio consiste en el uso de la CBCA procedentes de

²⁰ *Ibíd.* p. 80.

²¹ TÓRREZ RIVAS B, et al. Valorización de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial al cemento Portland. Nicaragua. 2014. Revista Nexo. Vol 27. No. 02. p. 82-89.

Nicaragua como sustituto parcial del cemento portland, para el desarrollo de la investigación se realizó un estudio de caracterización avanzada de la CBCA, donde se encontró que las CBCA contienen 62.33% de SiO₂ amorfa. Posteriormente se ejecutaron ensayos para medir las propiedades mecánicas de pastas endurecidas de cemento portland con sustituciones de 15% y 45%. Los resultados de los estudios mostraron que los valores más altos fueron alcanzados por la muestra de referencia (sin sustitución), lo cual indicó que la resistencia mecánica disminuyó con el incremento del porcentaje de CBCA.

El aporte de esta investigación en el presente proyecto es que para lograr un comportamiento óptimo de CBCA como puzolana, esta debe presentar un alto contenido de sílice amorfa, lo que coincide con los estudios anteriores. El porcentaje de sustitución más óptimo en las condiciones establecidas es del 15%, y sustituciones superiores generan disminución en la resistencia del mortero.

El trabajo de Daniel Ernesto Ma-tay Pinel²², denominado “Valorización de cenizas de bagazo procedentes de honduras: posibilidades de uso en matrices de cemento pórtland”, de la Universidad Politécnica de Valencia de España, presentado en el año 2014, es el quinto referente del estado de la cuestión presente. El objetivo del estudio fue implementar el uso de CBCA procedente de Honduras como sustituto parcial en mezclas de mortero. Para el desarrollo de la investigación se realizó una caracterización de tres tipos de CBCA usadas y los resultados mostraron que la composición química de dos de las cenizas indica un potencial como puzolanas reactivas. Se evaluó la posible reactividad puzolánica de las cenizas y su interacción con el cemento, y se encontró que dos de las muestras de ceniza son altamente reactivas según los resultados de los ensayos de pH y conductividad en suspensión acuosa cal/ceniza. Finalmente se ejecutaron ensayos de compresión en muestras de mortero con sustitución parcial de ceniza por cemento, en donde se encontró que la adición de CBCA alteró significativamente la resistencia a la compresión de los morteros, en donde sustituciones del 25% de cemento por CBCA con 28 días de curado presentaron una resistencia 15% mayor a la muestra de referencia.

El aporte de esta investigación en el presente proyecto es que para que las CBCA presenten un potencial uso como puzolanas, el contenido de óxidos de aluminio, silicio y hierro debe ser superior al 75%. La ceniza reacciona con la cal y forma silicatos cálcicos hidratados que mejoran la durabilidad y resistencia. Las pastas cemento/CBCA, presentan un aumento de tiempo de curado. La adición de CBCA en mortero disminuye la trabajabilidad, debido a que se aumenta la demanda de agua con respecto al mortero de referencia. Y finalmente, el uso de CBCA como sustituto del cemento portland en porcentajes cercanos al 15% mejora la resistencia del mortero en porcentajes de 15% con respecto al mortero convencional.

²² MA-TAY PINEL, Daniel Ernesto. Valorización de cenizas de bagazo procedentes de honduras: posibilidades de uso en matrices de cemento pórtland. España. Universidad Politecnica de Valencia. 2014.

El trabajo de CAMARGO MACEDO²³, denominado “Rendimiento de morteros producidos con la incorporación de ceniza de bagazo de caña de azúcar”, del año 2014, es el sexto referente del estado de la cuestión presente. El objetivo del trabajo fue determinar la factibilidad técnica de la utilización de las cenizas resultantes del proceso de la quema del bagazo de caña de azúcar, en mezclas de mortero. Para esto, se realizaron ensayos de caracterización física y química en las cenizas de bagazo de caña de azúcar. Las muestras de mortero usadas reemplazaron el agregado fino por CBCA en peso de la arena, en las siguientes proporciones 3%, 5%, 8% y 10%. A las muestras de mortero modificado, se les realizó ensayos de compresión y tensión para estudiar sus propiedades mecánicas. El autor concluye que la CBCA puede ser empleada como reemplazo parcial de agregados finos para la producción de morteros. El proceso de la molienda es una etapa muy importante, el tiempo de molienda ideal es de 20 minutos, debido a que proporciona uniformidad granulométrica y también reduce el tamaño. La ceniza contiene una pequeña cantidad de material amorfo. La adición de finos de la CBCA para todas las proporciones de reemplazo usadas, condujo a la reducción de la absorción capilar, debido a que aumenta el llenado de vacíos, previniendo el ingreso de agentes agresivos al mortero.

El aporte de esta investigación en el presente proyecto de investigación consiste en que el tiempo de molienda es una etapa muy importante que determina el comportamiento morteros modificados con CBCA. Además, la CBCA debe contener material amorfo para que presente un comportamiento óptimo y su uso en mortero mejora la durabilidad debido al llenado de vacíos.

El trabajo de Salomón Henao²⁴, denominado “Evaluación de la ceniza proveniente del bagazo de caña de azúcar como material cementante alternativo para la elaboración de morteros”, de la Pontificia Universidad Javeriana de Colombia, del año 2015, es el séptimo referente del estado de la cuestión presente. El objetivo de este estudio fue hacer una evaluación de la utilización de la CBCA como reemplazo parcial del cemento portland en mezclas de mortero. La CBCA utilizada provenía de procesos de quema a temperaturas entre 700 y 900 grados centígrados. Se evaluó la variación de la consistencia normal al sustituir cemento por CBCA, en donde se encontró que los tiempos de fraguado inicial y final son mucho mayores a las muestras de mortero convencional, obteniéndose valores de 221% y 234% respectivamente, con respecto a los valores del mortero convencional. Se ejecutó los ensayos de compresión y se encontró que las muestras con sustitución del 10% y 20% superaron la resistencia a la compresión de la muestra de referencia a los 56 días de

²³ CAMARGO MACEDO, Pamela; PEREIRA, Adriana Maria; AKASAKI, Jorge Luis; FIORITI, Cesar Fabiano; PAYÁ, Jordi y PINHEIRO MELGES, José Luiz. Rendimiento de morteros producidos con la incorporación de ceniza de bagazo de caña de azúcar. 2014. Revista Ingeniería de construcción. Vol. 29. No. 2. p. 187-199.

²⁴ HENAO, Salomon; LIBREROS, Juan y RAMIREZ Aníbal. Evaluación de la ceniza proveniente del bagazo de caña de azúcar como material cementante alternativo para la elaboración de morteros. Cali, Colombia. 2015. Pontificia Universidad Javeriana. p. 79-80.

curado, en 2.5% y 5% respectivamente. En el caso del ensayo a flexión, el mortero con sustitución del 20% presentó la mayor resistencia con un valor de 40% mayor a la del mortero de referencia. Finalmente el autor concluye indicando el gran potencial que tiene la implementación de la CBCA obtenida del Valle del Cauca Colombiano, como sustituto parcial del cemento portland en mezclas de mortero.

El aporte de este estudio en el presente estudio consiste en que el historial térmico de las CBCA es uno de los parámetros que determinan su comportamiento como puzolana. El tiempo de fraguado de un mortero modificado con CBCA aumenta en más del 200%. El porcentaje de sustitución óptimo de cemento portland por CBCA se encuentra alrededor del 10% y 20%, y estos pueden mejorar la resistencia a la compresión del mortero hasta un 5% con respecto al mortero convencional y mejora la resistencia a la flexión en mayor medida.

El trabajo de Fernando Almeida²⁵, denominado “Ceniza de bagazo de caña de azúcar: subproducto agroindustrial brasileño para uso en mortero”, del año 2015, es el octavo referente del estado de la cuestión presente. En este estudio se sustituyó el agregado fino por CBCA (30% y 50% de sustitución en peso) en mezclas de mortero. La CBCA fue tamizada hasta un tamaño de 4.8 mm y posteriormente fue molido por tres minutos en un molino mecánico, en donde finalmente la máxima partícula medía 1.18 milímetros. Finalmente se realizó el ensayo de compresión en mortero, en donde se concluyó que las sustituciones de agregado fino por CBCA de más del 50% en peso, no afecta la resistencia a la compresión de las muestras de mortero. La implementación de CBCA en mezclas de mortero puede reducir la cantidad de poros menores debido al tamaño de partícula más pequeño de CBCA. La profundidad de carbonatación es igual para muestras con 0% y 30% de sustitución de agregado fino por CBCA. La incorporación de CBCA, tanto para 30% como para 50% de sustitución, incrementa significativamente la resistencia a la penetración de cloruros en mortero.

El aporte de este estudio en el presente estudio es que el uso de CBCA en mortero reduce la cantidad de poros y debido a esto mejora la durabilidad.

El trabajo de Elisabeth Arif²⁶, denominado “Ceniza de bagazo de caña de azúcar procedente de una caldera de alta eficiencia de cogeneración: aplicación en productos de cemento y mortero”, de Australia, del año 2016, es el noveno referente del estado de la cuestión presente. En el desarrollo de este trabajo se determinó la composición química de la CBCA mediante el ensayo de Fluorescencia de rayos x, el cual arrojó resultados que indicaban un

²⁵ ALMEIDA, Fernando, et al. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. Brazil. 2015. Revista construction and building materials. Vol. 82. p. 31-38.

²⁶ ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm y LAKE, Neal. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. Australia. 2016. Revista Construction and building materials. Vol. 128. p. 287-297.

óptimo índice de capacidad puzolánica. Se encontró que a medida que se incrementaba el porcentaje de sustitución de cemento por CBCA, se incrementaba la cantidad de agua necesaria para la consistencia normal de la pasta. En cuanto a los tiempos de fraguado, se concluyó que al disminuir el contenido de cemento en la muestra aumenta los tiempos de fraguado inicial y final. Se realizó cubos de mortero de 5cm de lado, con sustituciones de 5%, 10%, 15% y 20% de cemento por CBCA en peso y se aplicó el ensayo de compresión a 28 días de curado en una cámara con 90% de humedad, los resultados mostraron que para sustituciones hasta 15% las muestras de mortero modificado presentan resistencias de cerca del 90% de la presentada por el mortero de referencia, el porcentaje de sustitución que presentó la máxima resistencia fue el de 5% con 97% de la alcanzada por el mortero de referencia, y para sustituciones de 20%, la resistencia que se obtuvo es del 72% de la presentada por el mortero de referencia, por esta razón se recomiendan sustituciones no mayores a 15%. Todas las muestras con sustitución de cemento por CBCA mejoraron la resistencia ante el ataque de ácidos, determinado mediante el ensayo de compresión luego de curar las muestras en soluciones de ácido. La sustitución de arena natural por CBCA, especialmente para 30%, puede conservar las propiedades mecánicas, obstrucción de poros y mejorar la durabilidad del mortero en comparación con un mortero convencional.

El aporte de este estudio en el presente estudio consiste en que a medida que se aumenta la cantidad de CBCA en la mezcla de mortero, aumenta la demanda de agua y aumenta en gran medida el tiempo de fraguado. Para sustituciones de cemento portland por CBCA en mortero hasta un 15%, se conserva el 90% de la resistencia con respecto al mortero convencional. La implementación de CBCA en mortero mejora la durabilidad.

El trabajo de Phool Shahnaz²⁷, denominado “Utilización de biomateriales como materiales puzolánicos para la sustitución parcial de cemento”, de Pakistán, del año 2016, es el décimo referente del estado de la cuestión presente. En esta investigación se utilizó la CBCA como material puzolánico en la elaboración de cubos de mortero con sustituciones de cemento portland por CBCA de 10%, 15%, 20% y 25% en peso, a los cuales se les aplicó el ensayo de compresión. El autor concluye que las CBCA tienen buenas propiedades puzolánicas y pueden ser usadas como material de reemplazo parcial de cemento, debido a la reacción química entre el Ca(OH)_2 liberado durante la hidratación del cemento y los componentes de ceniza del bagazo se forman óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , entre otros) que forman un gel cementante que actúa como relleno y mejora la resistencia del mortero.

El aporte de este estudio en el presente estudio consiste en que la implementación de la CBCA como sustituto parcial del cemento portland es óptimo debido a su capacidad puzolánica, mejorando la durabilidad y resistencia del mortero modificado.

²⁷ SHAHNAZ, Phool, et al. Utilization of Bio materials as Pozzolan material for partial replacement of Cement. Pakistán. 2016. Revista Journal of Chemistry and Materials Research. Vol. 5. p. 85-91.

Los estudios consultados como antecedentes, son el resultado de la búsqueda de materiales de construcción que en su producción no generen tanta contaminación ambiental como los materiales de construcción tradicionales. Pero es necesario que dichos materiales además de amigables con el medio ambiente iguallen las características de resistencia de los materiales convencionales, para que de esta forma comparados con la misma normatividad, se pueda generar una reglamentación que guíe las construcciones con materiales como la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Por esta razón, debe adelantarse estudios que aumenten el conocimiento en estos materiales sostenibles, para conocer más a fondo y en distintas condiciones, las capacidades constructivas de estos nuevos materiales. Como ejemplo de esto se puede observar que en las últimas décadas ha aumentado los estudios que pretenden determinar la viabilidad de usar la ceniza del bagazo y el bagazo de caña de azúcar en mezclas de concreto para el sector de la construcción.

La investigación en las propiedades de la CBCA en el mundo intenta demostrar que un material residual que se produce en enormes cantidades en varios países, puede ser usado para solucionar los problemas de falta de vivienda de poblaciones rurales, aprovechando estos residuos para generar materiales constructivos de muy bajo costo y con beneficios de resistencia que se comparan con los materiales de construcción tradicionales.

En la tabla 1 se muestra un resumen de los resultados del ensayo de fluorescencia de rayos x de varios de los antecedentes consultados, con el objetivo de mostrar la composición química de las CBCA usadas en cada uno de los estudios y de esta forma comparar con los resultados de la composición química de la ceniza usada en el presente trabajo. Los resultados de fluorescencia de rayos x muestran que las CBCA de los diferentes estudios tienen una composición química muy similar, en donde el óxido de silicio (SiO_2) compone más del 50% de la ceniza con un rango entre 50% y 83%, y los óxidos de aluminio (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3) componen menor porcentaje, con un valor promedio de 8% y 5% respectivamente.

Tabla 1. Resumen de resultados del ensayo Fluorescencia de rayos x en CBCA de antecedentes consultados.

Autor	Año	País	Fluorescencia de rayos x					
			CBCA			Cemento		
			SiO2	Al2O3	Fe2O3	SiO2	Al2O3	Fe2O3
			%	%	%	%	%	%
GANESAN, K; RAJAGOPAL, K y THANGAVEL, K.	2007	India	64,2	9,1	5,6	19,3	5,0	3,2
CORDEIRO, Guilherme, et al	2008	Brazil	78,3	8,6	3,6	20,9	4,2	5,3
GHUSILP, Nuntachai; JATURAPITAKKUL, Chai y KIATTIKOMOL, Kraiwood	2009	Tailandia	64,9	6,4	2,6	20,9	4,8	3,4
RUZZON, Sumrerng y CHINDAPRASIRT, Prinya	2012	Tailandia	65,0	4,8	0,9	25,1	5,5	5,9
SUA-IAM, Gritsada y MAKUL, Natt.	2013	Tailandia	65,3	6,9	3,7	16,4	3,9	3,5
TORRES AGREDO, Janneth, et al	2014	Colombia	72,8	6,4	5,5	19,4	4,0	3,6
			61,3	5,6	5,6			
GIRALDO Camilo, et al.	2012	Colombia	58,6	11,8	5,8	19,4	4,0	3,6
			76,4	5,8	4,5			
			63,2	8,5	6,4			
OLIVEIRA Marcos, et al.	2010	Colombia	83,0	-	7,0			
VIDAL, Diana; TORRES, JANETH y GONZÁLES Luis	2014	Colombia	58,6	11,8	5,8	24,3	4,3	3,0
			76,4	5,8	4,5			
			63,2	8,5	6,4			
BAHURUDEEN, A, et al	2014	India	57,6	6,1	1,3			
HENAO, Salomon; LIBREROS, Juan y RAMIREZ Anibal	2015	Colombia	53,1	26,9	7,7			
BAHURUDEEN, A y SANTHANAM, Manu	2015	India	73,0	1,7	1,9			
BAHURUDEEN, A, et al	2015	India	75,7	1,5	2,3	20,7	5,1	5,4
ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm y LAKE, Neal	2016	Australia	78,5	7,3	3,9	19,2	3,5	2,5
ALMEIDA, Fernando, et al	2015	Brazil	80,2	5,6	4,0			
MA-TAY PINEL, Daniel Ernesto	2014	España	50,6	6,3	23,3	19,9	5,4	3,6
			64,2	8,9	3,4			
SHAHNAZ, Phool, et al	2016	Pakistán	66,3	15,1	3,4	20,0	5,3	3,0
		Máximo valor	83,0	26,9	23,3			
		Mínimo valor	50,6	1,5	0,9			
		promedio	67,4	8,2	5,2			

Fuente: Compilado de varias fuentes consultadas por el autor.

En la tabla 2 se muestra un resumen de los resultados del ensayo de resistencia a la compresión en mortero, obtenidos de los antecedentes consultados, con el objetivo de mostrar cuál ha sido el porcentaje de sustitución que ha alcanzado la máxima resistencia y si ha superado la resistencia del mortero convencional, y de esta forma comparar con los resultados obtenidos en el presente trabajo. Los resultados de los antecedentes, sobre el ensayo de compresión en mortero, muestran que el porcentaje de sustitución con la mayor resistencia varía de un estudio a otro, pero se encuentra en un rango entre el 10% y el 30%, y en varios de los estudios, la resistencia del mortero modificado con CBCA ha superado la resistencia del mortero convencional.

Tabla 2. Resumen de resultados del ensayo compresión en mortero de antecedentes consultados.

Autor	Año	País	MORTERO						
			Resistencia a la compresión a los 28 días						
			% sustitución cemento por CBCA						Cemento
			5%	10%	15%	20%	25%	30%	0%
			Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
GANESAN, K; RAJAGOPAL, K y THANGAVEL, K.	2007	India	33,4	33,9	32,1	27,9	26,1	25,1	28,3
OLIVEIRA Marcos, et al.	2010	Colombia		48,0		46,9		40,7	47,8
HENAO, Salomon; LIBREROS, Juan y RAMIREZ Anibal	2015	Colombia		16,5		18,5		17,5	20,5
ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm y LAKE, Neal	2016	Australia	56,2	50,3	50,3	41,3			57,7
ALMEIDA, Fernando, et al	2015	Brazil						46,3	45,9
MA-TAY PINEL, Daniel Ernesto	2014	España				55,7			51,0
						58,5			
SHAHNAZ, Phool, et al	2016	Pakistán	57,0	62,6	54,5	52,3	49,3		55,3

Fuente: Compilado de varias fuentes consultadas por el autor.

4. MARCOS DE REFERENCIA

4.1. MARCO TEÓRICO

El fundamento teórico del presente busca argumentar el uso de la CBCA en el sector de la construcción, debido a que se va a emplear en mezclas de mortero como sustituto del cemento portland, y estos dos presentan una reacción química, es importante explicar inicialmente el comportamiento químico del cemento portland. El principal compuesto del cemento portland es el Clinker, el cual está compuesto por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio²⁸ y por esta razón en la química del cemento se suelen considerar los cuatro compuestos principales, que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Compuestos principales del cemento portland.

Tabla 2.3 Compuestos del cemento portland		
Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaOSiO_2	C ₂ S
Aluminio tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C ₄ AF

Fuente: Diego Sánchez de guzmán²⁹.

Según Sánchez de Guzmán, los compuestos mencionados en la tabla 3, se forman en el interior del horno en el proceso de clinkerización del cemento portland, cuando el horno alcanza temperaturas entre 1280°C y 1500°C. Estos compuestos no se encuentran aislados, sino que se presentan en una especie de fases que los contienen en una gran proporción con algunas impurezas, y por esta razón no son considerados compuestos en sí, pero su cálculo proporciona información acerca de las propiedades del cemento. Estas fases son la fase Alita, que consiste en C3S; la fase Belita, que consiste en C2S; la fase Aluminato, que consiste en C3A y la fase ferrito, que consiste en ferritos y aluminatos de calcio.

La fase Alita, compuesta por C3S, es la principal fase en la mayoría de los clínkeres portland y de esta dependen en gran medida las propiedades de desarrollo de la resistencia mecánica. El C3S se endurece rápidamente y por eso tiene mayor influencia en el tiempo de fraguado y la resistencia inicial. La fase Belita, suele ser la segunda más importante en el clínker. El C2S se hidrata más lento y por esto su contribución al desarrollo de

²⁸ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Op. Cit. p. 35.

²⁹ *Ibíd.*, p. 35.

resistencia se siente después de una semana. Se ha comprobado que estas dos fases (C3S y C2S) determinan significativamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí por su endurecimiento. El contenido de ambas suma cerca del 75% del cemento.

La fase Aluminato está constituida por C3A, la cual es una solución sólida de C3A con impurezas de SiO₂ y MgO. Esta fase contribuye a una alta resistencia inicial, pero con presencia de calor de hidratación relativamente alto, además aporta al concreto propiedades no deseables, como cambios volumétricos y baja resistencia a los sulfatos, por esta razón su contenido se limita a 5% y 15% según el tipo de cemento. La fase Ferrito, compuesta por C4AF, es una solución sólida que varía desde C2F hasta C6A2F. Esta fase reduce la temperatura de clinkerización, pero debe mantenerse en un valor bajo por tratarse de un relleno. En la tabla 4 se presenta un resumen del rango de valores aproximados del contenido de las principales fases del cemento portland, mencionadas anteriormente.

Tabla 4. Límites aproximados de composición de principales fases o compuestos del cemento pórtland.

Oxido	Contenido, por ciento
CaO	60 - 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0.5 - 6.0
MgO	0.1 - 4.0
Alcalis	0.2 - 1.3
SO ₃	1 - 3

Fuente: Diego Sánchez de guzmán³⁰.

Además de las fases principales mencionadas, existen algunos compuestos o fases menores que generalmente están presentes en un pequeño porcentaje del peso del cemento. Estos compuestos o fases menores tienen unos límites de composición aproximada, los cuales se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Proporciones aproximadas de las fases o compuestos menores del cemento portland.

Tabla 2.5 Proporciones aproximadas de los compuestos del cemento portland

Oxido	Contenido, por ciento
C ₃ S	20 - 70
C ₂ S	5 - 50
C ₃ A	1 - 15
C ₄ AF	1 - 17

Fuente: Diego Sánchez de guzmán³¹.

³⁰ *Ibíd.*, p. 37.

En la tabla 6, se muestran los óxidos y compuestos de un cemento portland típico del medio Colombiano, según el autor Sánchez de Guzmán.

Tabla 6. Óxidos y compuestos de un cemento portland típico del medio Colombiano.

Composición en óxido	Contenido en porcentaje
CaO	62
SiO ₂	21
Al ₂ O ₃	4.5
Fe ₂ O ₃	3.5
MgO	1.0
SO ₃	2.0
K ₂ O	0.4
Na ₂ O	0.1
Otros	1.0
Pérdida al fuego	3.0
Residuo insoluble	1.5

Fuente: Diego Sánchez de Guzmán³².

Aclarada la química del cemento portland convencional, es necesario mencionar que la CBCA es un material puzolánico, y según ALVAREZ MANTILLA, estas se dividen según su origen, en donde se encuentran las puzolanas de origen natural, las de origen artificial y puzolanas de origen natural que necesitan un tratamiento térmico de activación para mejorar su reactividad. Las puzolanas de origen natural son productos minerales con composición química sílico-aluminosa, con estructuras amorfas y de grano fino, que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento. Entre estas destacan las siguientes:

- Acumulaciones de cenizas generadas durante erupciones volcánicas explosivas, que por el alto contenido de materiales vítreos, son propensas a sufrir reacciones como las requeridas para las puzolanas. Más tarde, debido a procesos de sedimentación, estas cenizas se convierten en tobas, las cuales son rocas volcánicas bastante porosas, características que favorecen su reactividad, por lo tanto la roca, como el sedimento sirven como puzolanas. En rocas y materiales volcánicos es necesario considerar dos factores controladores de la actividad puzolánica, en primer lugar la composición química del magma originario que determina la de los productos, y en segundo lugar, la constitución y textura de los minerales de dichas rocas, que dependen de la velocidad de enfriamiento y de los procesos de meteorización.
- Rocas o minerales sedimentarios ricos en sílice hidratada, que se forman en yacimientos submarinos, debido a la acumulación de esqueletos y caparzones.

³¹ *Ibíd.*, p. 37.

³² *Ibíd.*, p. 37.

- Existen algunas rocas y minerales no puzolánicos de origen, pero que a descomponerse generan productos puzolánicos, estos son muy escasos en el mundo.

Las puzolanas de origen artificial, son subproductos de procesos industriales y requieren debido a esto equipo para su disposición, en algunos casos requieren un tratamiento para obtener mayor reactividad, entre las puzolanas artificiales se destacan las siguientes:

- Las cenizas volantes se producen en la combustión de carbón mineral en plantas térmicas de generación de electricidad.
- Las arcillas activadas o calcinadas artificialmente, entre estas se encuentran los residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que han sido sometidas a temperaturas superiores a los 800°C.
- El humo de sílice, proviene de la industria de aleaciones de ferro-silicio.
- Escorias de fundición o de alto horno, provienen de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos, estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.
- Las cenizas de residuos agrícolas, como la ceniza de la cascara de arroz y la ceniza de bagazo de caña de azúcar, que al ser quemados convenientemente se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

Las puzolanas mixtas o intermedias, son aquellas puzolanas naturales de origen, pero que se somete a un tratamiento térmico con el objeto de cambiar sus propiedades para aumentar su reactividad química. Dentro de estas, se destacan las zeolitas, suelos, rocas, cascarilla de arroz y las arcillas, un representante de estas últimas, es el polvo de ladrillo.

El autor ALVAREZ MANTILLA³³ explica la aplicación de las puzolanas en el cemento portland ordinario y las ventajas de dicha aplicación, mencionando que la puzolana puede reemplazar entre el 20% al 40% del cemento portland, disminuyendo los costos de producción porque dicha adición es más barata que el Clinker y más barata a la hora de moler. Las ventajas que ofrece el cemento puzolánico sobre el resto son las siguientes:

- Rebajan cierto porcentaje de aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente reaccionan de manera perjudicial con los agregados del concreto.

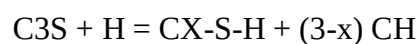
³³ Ibíd. p. 37-38.

- Reemplazan entre el 20% al 40% de cemento portland, disminuyendo los costos de producción.
- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado.
- Reducen el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción bastante exotérmica.
- Incrementan la resistencia a la compresión.
- Incrementan la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumentan la resistencia a la abrasión.
- Aumentan la durabilidad del cemento.
- Disminuyen la necesidad de agua.

Para explicar la base de las mejoras que generan las puzolanas, mencionadas anteriormente, es necesario explicar la reacción química que se produce entre el cemento portland y la puzolana, aclarando que esta es la reacción que se espera suceda entre el cemento portland y la CBCA. Según el autor ALVAREZ MANTILLA³⁴, los Aluminosilicatos presentes en la puzolana, reaccionan con el Hidróxido de Calcio liberado en la hidratación del cemento portland. Esto se realiza en una reacción lenta (que disminuye el calor), consumiendo el Hidróxido de Calcio (lo que mejora su resistencia a ambientes ácidos), y al realizarse la reacción rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento (aumentando la impermeabilidad y la resistencia mecánica).

El autor ALVAREZ MANTILLA³⁵, explica la reacción química que se da en el fraguado del cemento con adición de puzolanas, dándose de la siguiente forma:

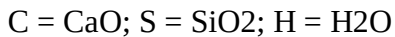
La reacción de fraguado del cemento portland convencional es la siguiente:



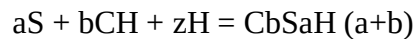
³⁴ Ibid. p. 38.

³⁵ Ibid. p. 39.

Donde:

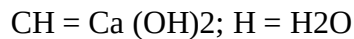


Siendo el gel C-S-H el responsable de las propiedades mecánicas del cemento. Podemos observar que se produce un tercer producto, abreviado CH en la fórmula, que es el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, con poco valor cementante, y que es el responsable de la reacción de los sulfatos que degradan la calidad del mismo. Para hacer frente a este problema, es por lo que se añade la puzolana. Ésta, se compone de aluminosilicatos que reaccionan con el componente CH de la fórmula siguiente:



Donde:

S = Aluminosilicatos de la puzolana (Composición tipo SiO_2 (75%) + Al_2O_3 (10%) y otros).



Existen otros materiales que tiene actividad puzoolánica en mayor o menor medida. Entre ellas se encuentran las escorias de fundiciones de acero, la microsílce o humo de sílice y metacaolines procedentes de la combustión del carbón.

La ceniza de bagazo de caña de azúcar es un material que ha sido catalogado como una puzolana por su composición química, según los autores consultados, por esta razón es importante conocer el origen de este material y el proceso mediante el cual se llega al residuo final, debido a que el comportamiento mecánico que pueda aportar la CBCA, está determinado en gran medida por el historial térmico de esta. Según el trabajo de Henao³⁶, el bagazo de caña de azúcar es un residuo de la industria azucarera, el cual es quemado en calderas a temperaturas que varían entre los 700°C y los 1000°C para la producción de energía para distintos sectores de la industria, después de esa quema se obtiene la ceniza de bagazo de caña de azúcar, la cual posee una gran capacidad cementante debido a la composición química y al tamaño de partícula que posee.

³⁶ HENAO, Salomon; LIBREROS, Juan y RAMIREZ, Aníbal. Evaluación de la ceniza proveniente del bagazo de caña de azúcar como material cementante alternativo para la elaboración de morteros. Cali: Pontificia Universidad Javeriana. p. 1

4.2. MARCO CONCEPTUAL

La presente investigación pretende sustituir cemento portland por ceniza de bagazo de caña de azúcar en una mezcla de mortero, evaluando su resistencia a compresión y flexión. Por esta razón es importante definir conceptualmente el cemento, según Sánchez de Guzmán, la palabra cemento en el sentido amplio de la palabra, no solo se refiere a los cementos convencionales, sino que también se refiere a varios materiales como las cales, asfaltos y alquitranes, este define la palabra cemento como “un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas”³⁷.

En el sector de la construcción, el cemento comúnmente usado es el cemento portland, el cual define Sánchez de Guzmán de la siguiente forma: “El cemento a base de portland que tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, ya que con ella experimenta una reacción química. Este proceso se llama hidratación, por lo cual son también llamados cementos hidráulicos”³⁸.

Según la Norma Técnica Colombiana, el cemento se define como “Un material pulverizado que además de óxido de calcio contiene sílice, alúmina y óxido de hierro y que forma, por adición de una cantidad apropiada de agua, una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire. Se excluyen las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos”³⁹.

Según la Norma Técnica Colombiana, el cemento portland se define como “Producto que se obtiene por la pulverización del clinker pórtland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante.”⁴⁰.

Uno de los componentes principales del cemento portland es el Clinker, el cual es definido por la Norma Técnica Colombiana como “Componente del cemento en forma granulada, constituido principalmente por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio y que se obtiene por la cocción, hasta fusión parcial (clinkerización), de una mezcla convenientemente proporcionada y homogenizada de materiales debidamente seleccionados”⁴¹.

³⁷ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Tercera edición. Bogotá, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. 2001. p. 27.

³⁸ *Ibíd.*, p. 27.

³⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Cemento Definiciones. NTC 31. Bogotá D.C. 1998. p. 1.

⁴⁰ *Ibíd.*, p. 2.

⁴¹ *Ibíd.* p. 1.

El cemento portland es el principal componente de una mezcla de mortero, con respecto al mortero, Sánchez de Guzmán lo define de la siguiente forma:

Una mezcla homogénea de un material cementante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos, prácticamente es hormigón sin el agregado grueso. El uso del mortero en la construcción ha sido muy diverso; en Colombia se usa ampliamente como material de revoque o repello, como material de pega en la mampostería y en los últimos tiempos en la mampostería estructural⁴².

Uno de los componentes del mortero, son los agregados, los cuales son definidos por Sánchez de Guzmán de la siguiente forma: “En el sentido general de la palabra, los agregados, también llamados áridos, son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento portland en presencia de agua conforman un todo compacto”⁴³.

Una de las características que permiten al cemento su carácter conglomerante es la propiedad puzolánica, la cual es definida por la Norma Técnica Colombiana como “Aptitud de un material pulverizado de reaccionar químicamente en presencia de agua con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente, formando compuestos que poseen propiedades hidráulicas”⁴⁴.

Las puzolanas tiene su origen histórico en Grecia y Roma, quienes fueron los primeros en conocer la cal y sus propiedades cementicias, a la cual le agregaron materiales naturales como áridos, y de esta forma obtuvieron morteros de alta resistencia y durabilidad. En la localidad de Puzzuoli se encontraba gran cantidad de cenizas volcánicas, de allí se cuñó su nombre⁴⁵.

La Norma Técnica Colombiana define las puzolanas como: “Material silíceo o sílico-aluminoso que posee propiedad puzolánica. Puede ser en estado natural (tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas, pumitas), de material calcinado (los nombrados anteriormente y algunos como las arcillas y esquistos más comunes) o de material artificial (óxido de silicio precipitado y cenizas volantes)”⁴⁶.

⁴² *Ibíd.*, p. 65

⁴³ *Ibíd.*, p. 65

⁴⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Cemento Definiciones. NTC 31. Bogotá D.C. 1998. p. 1.

⁴⁵ ALVAREZ MANTILLA, Hernando. Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Colombia. 2010. Universidad Industrial de Santander. p. 33.

⁴⁶ *Ibíd.* p. 1

4.3. MARCO LEGAL

En el ámbito de las cenizas de bagazo de caña de azúcar como material puzolánico, no hay reglamentación específica, por esta razón es importante profundizar en la investigación sobre la CBCA para generar un marco normativo que reglamente su uso en la construcción.

El control sobre puzolanas artificiales que se adicionen al concreto, son regidas por la norma ASTM C618⁴⁷ denominada “Especificación normalizada para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto”, para Colombia la norma que adapta esta normativa es la NTC 3493⁴⁸. Estas normas dan los requerimientos y clasificación de los materiales puzolánicos, según estas normas, existen principalmente dos tipos de cenizas volantes.

Las cenizas volantes clase C presentan propiedades cementicias y puzolánicas, obtenidas de lignitos y carbones subbituminosos, y que deben tener un contenido mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ del 50% y un máximo contenido de cal del 20%, para poder ser empleadas en hormigones.

Las cenizas volantes clase F son normalmente obtenidas por la combustión de antracitas y carbones bituminosos, con un contenido mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ del 70% en peso y presentan también propiedades puzolánicas. Las especificaciones para las cenizas según la norma NTC 3493 se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones para cenizas según norma NTC 3493.

CLASE	F	C
Fuente más común	Carbones bituminosos o Antracita	Carbones sub-bituminosos o Lignito
CaO	---	Mín. 10%
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$	Mín. 70%	Mín. 50%
SO_3	Mín. 5%	Mín. 5%
Humedad	Máx. 3%	Máx. 3%
Inquemados ¹	Máx. 6% (hasta Máx. 12% ²)	Máx. 6%
Ret. en Tamiz 45 μm	Máx. 34%	Máx. 34%
Índice Actividad	Mín. 75% a 7 y 28 días	Mín. 75% a 7 y 28 días
¹ Pérdidas por ignición		
² Si resultados de laboratorio muestran desempeño aceptable		

Fuente: MEJÍA MARTINO⁴⁹.

⁴⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Especificación normalizada para ceniza volante de carbón y puzolana natural en crudo o calcinada para uso en concreto. ASTM C618. 2015.

⁴⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento pórtland. NTC 3493. Bogotá D.C. 1993.

⁴⁹ MEJÍA MARTINO, Marlon Esteban. Componentes alternativos para la producción de concreto en la construcción de vivienda ambientalmente sostenible. Colombia. 2011. Universidad EAFIT. p. 48.

Las escorias de alto horno están reglamentadas por la norma ASTM C 989⁵⁰ denominada “Especificación Normalizada para Cemento de Escoria para Uso en Concreto y Morteros”, o su equivalente para Colombia, la norma NTC 4018⁵¹. Estas normas definen tres grados de escorias: 80, 100 y 120, donde el grado más alto contribuye de mayor forma a la resistencia potencial. Las escorias molidas de alto horno tienen por sí mismas propiedades cementantes. En la tabla 8 se muestran las especificaciones para las escorias según su grado, dadas por la norma NTC 989.

Tabla 8. Especificaciones para escorias de alto horno según la norma NTC 989.

REQUISITOS	GRADO		
	80	100	120
Ión Sulfuro (S)	Máx. 2.5%	Máx. 2.5%	Máx. 2.5%
SO₃	Máx. 4%	Máx. 4%	Máx. 4%
Ret.Tamiz 45 µm	0,2	0,2	0.2
Índice de Actividad a 7 días	---	Mín. 75%	Mín. 95%
Índice de Actividad a 28 días	Mín. 75%	Mín. 95%	Mín. 115%

Fuente: MEJÍA MARTINO⁵².

El uso de humo de sílice o microsílíce en mezclas cementicias, se reglamenta mediante un análisis químico completo y de distribución de tamaño de partícula. La norma que reglamenta el humo de sílice, es la ASTM C 1240⁵³ denominada “”, la norma determina las especificaciones para su uso en concreto y en sistemas que contienen cemento hidráulico, además determina los ensayos necesarios para conocer la procedencia del material. Los requerimientos para el humo de sílice dados por la norma ASTM C 1240, se muestran en la tabla 9.

⁵⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Especificación Normalizada para Cemento de Escoria para Uso en Concreto y Morteros. ASTM C 989. 2010.

⁵¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Escoria de alto horno granulada y molida para uso en concreto y morteros. NTC 4018. Bogotá D.C. 1995.

⁵² MEJÍA MARTINO, Marlon Esteban. Componentes alternativos para la producción de concreto en la construcción de vivienda ambientalmente sostenible. Colombia. 2011. Universidad EAFIT. P. 49.

⁵³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Especificación Normalizada para humo de sílice usado en mezclas cementicias. ASTM C 1240. 2015.

Tabla 9. Especificaciones para el uso de humo de sílice en mezclas cementicias según la norma ASTM C 1240.

REQUISITOS	Valor/Rango especificado
Contenido de SiO ₂	Mín. 85%
Humedad	Máx. 3%
Perdida por ignición	Máx. 6%
Ret. en Tamiz 45 µm	Máx. 10%
Índice de Actividad a 7 días	Mín. 105%
Superficie específica	Mín. 15 m ² /g

Fuente: MEJÍA MARTINO⁵⁴.

Las normas utilizadas para la ejecución de los ensayos del presente trabajo, se resumen en la tabla 10, estas se encargan de controlar y reglamentar los ensayos de laboratorio que son necesarios para determinar la calidad de los materiales de construcción.

Tabla 10. Resumen de las normas utilizadas para el desarrollo de los ensayos de laboratorio.

Norma		Descripción
Nombre	Código	
Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.	NTC 118 ⁵⁵	Esta norma establece el método para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat. Da los valores máximos de tiempos de fraguado inicial y final para cemento portland.
Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica.	NTC 112 ⁵⁶	Esta norma tiene por objeto establecer el método para efectuar la mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica. Da los requisitos para la mezcladora mecánica y los procedimientos de mezcla para pastas de cemento y morteros.

⁵⁴ MEJÍA MARTINO, Marlon Esteban. Componentes alternativos para la producción de concreto en la construcción de vivienda ambientalmente sostenible. Colombia. 2011. Universidad EAFIT. P. 49.

⁵⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Determinación de tiempos de fraguado de cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat. NTC 118. Bogotá D.C. 2004.

⁵⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Método para mezcla mecánica de pasta de cemento y mortero. NTC 112. Bogotá D.C. 1998.

Resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico.	INV E 324 - 07 ⁵⁷	Establecer el método para determinar la resistencia a la flexión de viguetas de mortero de cemento hidráulico. Da los requisitos de mezcla, compactación, el montaje para la falla y cálculo de la resistencia a la flexión.
Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado.	NTC 220 ⁵⁸	Esta norma establece el método para la determinación del esfuerzo de compresión de morteros de cemento hidráulico, usando cubos de 50mm o 2 pulgadas de lado. Da las proporciones de los materiales, los requisitos de mezcla, compactación y montaje para la falla.
Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico.	NTC 3937 ⁵⁹	Esta norma establece las características que deben tener los áridos finos para ensayos en cemento hidráulico.
Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico.	NTC 110 ⁶⁰	Establece el método para determinar la consistencia normal de cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.

Fuente: Instituto Nacional de Vías y Norma Técnica Colombiana.

⁵⁷ INVIAS. Resistencia a la flexión de morteros. INV E 324. Colombia. 2007.

⁵⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Determinación de resistencia a compresión de mortero. NTC 220. Bogotá D.C. 2004.

⁵⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico. NTC 3937. Bogotá. 2007.

⁶⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico. NTC 110. Bogotá D.C. 2008.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque metodológico de la presente investigación es de tipo cuantitativo, e intenta comprobar la hipótesis de que puede usarse CBCA como sustituto parcial del cemento portland en una mezcla de mortero conservando las propiedades mecánicas. Con el objetivo de probar esta hipótesis, se procede a recolectar los datos cuantitativos que responden a los ensayos de laboratorio aplicados a las muestras de mortero convencional y modificado con CBCA. De esta forma se intenta aportar conocimiento para profundizar en el uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en la fabricación de un mortero sostenible.

5.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación del presente trabajo es de tipo experimental correlacional, ya que se realizan pruebas en las que se manipula más de dos variables independientes para en función de estas obtener respuesta de la variable dependiente, y con dichos efectos establecer la relación entre las variables, sabiendo que se llevarán a cabo dichas pruebas en ambientes controlados, para que la relación entre las variables no implique la interacción de algún agente externo.

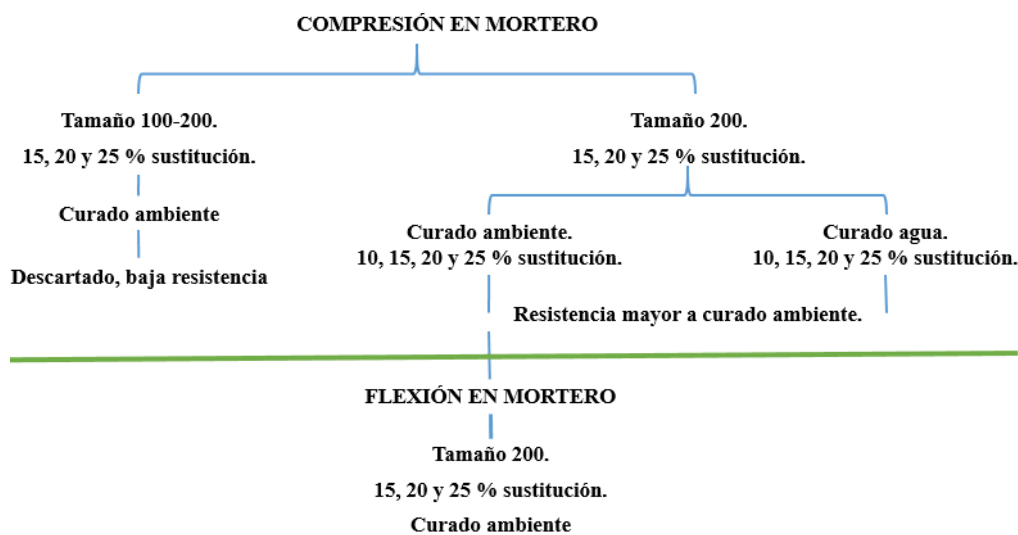
5.3. DISEÑO MUESTRAL

La muestra es de tipo no probabilístico, ya que la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de las características de la investigación. La muestra del presente estudio consistió en probetas de mortero con reemplazo de varios porcentajes de cemento portland por CBCA. Por cada ensayo realizado se hicieron tres muestras iguales para determinar un valor basado en el promedio estadístico de dichos valores, la razón por la que se eligieron tres valores de resultado por cada muestra, es porque según la norma NTC 220 usada para determinar la resistencia de cubos de mortero de cemento hidráulico, en el numeral 8 se dice que “Se deben preparar dos o tres cubos de una batchada de mortero para cada período o edad de ensayo especificado”. Por esta razón se decide elegir tres datos para lograr una mayor confiabilidad en los resultados.

Para todas las muestras se usaron las proporciones indicadas por la norma INV 220. La relación agua/material cementante que se usó en todas las muestras fue de 0,485.

La matriz de ensayos que resume las características de las muestras realizadas y el orden en el que se realizaron los ensayos a compresión y flexión, se resumen en la ilustración 3.

Ilustración 3. Matriz de ensayos compresión y flexión.



Fuente: Autor

En la tabla 11 se muestra la cantidad de muestras que se hicieron por ensayo, el tamaño de partícula y porcentaje de sustitución de dichas muestras.

Tabla 11. Cantidad de muestras por ensayo y características de la muestra.

Ensayo	Tamaños	Curado	% sustitución	Días de curado	# Muestras	Total muestras por ensayo	Total muestras
Compresión	T #100-200	Ambiente	15%	3	3	84	84
				7	3		
				14	3		
				28	3		
			20%	3	3		
				7	3		
				14	3		
				28	3		
			25%	3	3		
				7	3		
				14	3		
				28	3		
	T#200		15%	3	3		
				7	3		
				14	3		
				28	3		
			20%	3	3		
				7	3		
				14	3		
				28	3		
			25%	3	3		
				7	3		
				14	3		
				28	3		
	Estandar		0%	3	3		
				7	3		
				14	3		
				28	3		
Compresión	T#200	Ambiente	10%	3	3	81	
				7	3		
				28	3		
			15%	3	3		
				7	3		
				28	3		
			20%	3	3		
				7	3		
				28	3		
			25%	3	3		
				7	3		
				28	3		
			0%	3	3		
				7	3		
				28	3		
		Sumergido	10%	3	3		
				7	3		
				28	3		
			15%	3	3		
				7	3		
				28	3		
			20%	3	3		
				7	3		
				28	3		
			0%	3	3		
				7	3		
				28	3		
			Flexión	T#200	Ambiente		15%
20%	28	3					
25%	28	3					
0%	28	3					

Fuente: Autor

5.4. HIPOTESIS

La CBCA por su composición química puede ser un material puzolánico que sustituya parcialmente el cemento portland en una mezcla de mortero o concreto, conservando y en las condiciones más favorables llegando a mejorar las propiedades de resistencia evaluadas mediante los ensayos de compresión y flexión.

En los estudios analizados se encuentra que el mejor comportamiento de los morteros modificados con CBCA presenta su máxima resistencia entre el 5% y el 30% de reemplazo por peso de cemento, pero el valor que más se repite en los estudios es el de sustitución de 20%. Es necesario entonces, determinar el porcentaje y tamaño que confieren las mejores propiedades mecánicas a la muestra analizada.

5.5. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

La medición y manipulación de las variables se realizó como se muestra en la tabla 12, basado en los resultados de los antecedentes consultados.

Tabla 12. Descripción de las variables del proyecto.

	Variable	Indicador	Descripción	Medición
Independientes	% de CBCA que reemplaza el cemento.	% de sustitución	10%, 15%, 20% y 25%.	% en peso del cemento
	Tamaño de la CBCA.	Tamaño de partícula	1) entre tamices #100 y #200 2) pasa tamiz #200.	Unidad de longitud.
Dependiente	Propiedades mecánicas del mortero	Resistencia a la compresión y flexión	Se compara la resistencia a la compresión obtenida con los % de sustitución y tamaños de partícula usados.	Unidad de esfuerzo.
Intervinientes	Relación agua cemento	% de agua/ peso de material cementante	Relación agua/cemento de 0,485 para todas las muestras	% en peso de cemento
	Tipo de curado.		Curado al ambiente y curado sumergido en agua.	

Fuente: Autor.

En cuando a variables independientes se buscó establecer una correlación y analizar el comportamiento de las siguientes variables combinadas:

- Los porcentajes de sustitución de cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar usados son 10%, 15%, 20% y 25%.
- Los tamaños de la ceniza de bagazo de caña de azúcar usados son dos, el primero consiste en el material que pasa tamiz #100 y queda retenido en el tamiz #200. El segundo es el material que pasa el tamiz #200.

Las variables dependientes que se midieron en función de las independientes mencionadas anteriormente, son:

- Resistencia a la compresión en cubos de mortero.
- Resistencia a la flexión en viguetas de mortero.

Como variables intervinientes se encuentra la relación agua/cemento, la cual se mantuvo constante para todas las muestras, con un valor de 0.485 con respecto al material cementante. Otra variable interviniente es el tipo de curado, se usaron dos curados, el primero consiste en curado expuesto al ambiente, y el segundo consiste en curado sumergido en agua hasta el momento de la falla de cada muestra.

5.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Los datos se obtuvieron de los ensayos experimentales aplicados en los laboratorios de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad La Gran Colombia. La información se recolectará mediante la medición de las variables en los ensayos de laboratorio y se registran en una matriz o formato para dichos ensayos.

5.7. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

- **Fase 1. Análisis de la composición química de la ceniza de caña de azúcar mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X.**
 - **Actividad 1.1.** Mediante la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, realizó el ensayo de Fluorescencia de rayos x en una muestra de CBCA que pasa Tamiz #200, con el objetivo de identificar la composición química de la ceniza y determinar la capacidad puzolánica del material.
- **Fase 2. Determinación de la resistencia a la compresión y flexión de muestras de mortero para dos tamaños de ceniza, cuatro porcentajes de sustitución y dos tipos de curado.**
 - **Actividad 2.1.** Fallar cubos de mortero a compresión con sustituciones de cemento por CBCA del 15%, 20% y 25%, con curado ambiente para 3, 7, y 28 días. Usando dos tamaños de CBCA (T#100-#200 y T#200).
 - **Actividad 2.2.** Fallar cubos de mortero a compresión con sustituciones de cemento por CBCA del 10%, 15%, 20% y 25%, con dos tipos de curado

(ambiente y sumergido) a los 3, 7 y 28 días. Usando el tamaño de CBCA más óptimo según la actividad anterior.

- **Actividad 2.3.** Fallar vigas de mortero a flexión con los porcentajes de sustitución y el tamaño de CBCA que muestren la mayor resistencia en las actividades anteriores, a los 3, 7, y 28 días de curado ambiente.
- **Fase 3. Identificación del porcentaje de sustitución de cemento por CBCA y tamaño de dicha ceniza, que confieren la mayor resistencia a compresión y flexión al mortero.**
 - **Actividad 3.1.** Analizar los resultados los ensayos a compresión, para determinar el porcentaje que presenta la mayor resistencia a la compresión de cada tipo de curado.
 - **Actividad 3.2.** Analizar los resultados los ensayos a flexión, para determinar el porcentaje que presenta la mayor resistencia a la flexión.
 - **Actividad 3.3.** Determinar el tipo de curado que presenta mayor resistencia a compresión entre curado al medio ambiente o curado sumergido en agua.
 - **Actividad 3.3.** Analizar la relación entre el tamaño de partícula de la ceniza, el porcentaje de sustitución por cemento, tipo de curado y las respectivas resistencias a compresión y flexión.

5.8. DISEÑO EXPERIMENTAL

5.8.1. Ensayo de fluorescencia de rayos x

El ensayo de fluorescencia de rayos x se realizó en la Universidad Nacional de Colombia, con el objetivo de determinar la composición química de la CBCA y compararla con la del cemento portland, para determinar su carácter como material puzolánico.

La Universidad Nacional de Colombia describe este procedimiento de la siguiente forma:

La Fluorescencia de Rayos X es una técnica espectrométrica que permite conocer la composición química elemental de una muestra, analizando la emisión de rayos X de los diferentes elementos presentes en ella y su concentración, con excepción de los elementos livianos H, C, Li, Be, B, N, O y de los elementos transuránicos. Las muestras a analizar pueden ser sólidas, polvos y líquidas. Se pueden llevar a cabo análisis destructivos y no

destructivos (semicuantitativos y cuantitativos) en diferentes tipologías de materiales⁶¹.

5.8.2. Ensayo de compresión

El ensayo de compresión se realizó para mezclas de mortero reemplazando un porcentaje de cemento por CBCAS (15%, 20% y 25%) a los 3, 7, 14 y 28 días de fraguado. Para cada uno de los porcentajes de sustitución se usarán dos tamaños de CBCA: 1) Material pasa tamiz #100 y retenido en tamiz #200. 2) Material pasa tamiz #200.

Las proporciones para las distintas sustituciones realizadas, se basaron en las especificaciones dadas por la NTC 220, como se muestra en la tabla 13, la cual da unas proporciones de cada material para la cantidad de cubos de mortero de 5*5*5 centímetros que se busca preparar.

*Tabla 13. Proporciones para cubos de mortero de 5*5*5 cm.*

Material	6 cubos	9 cubos
Cemento, g	500	740
Arena, g	1 375	2 035
Agua, ml		
- Pórtland (0,485)	242	359
- Pórtland con aire incorporado (0,460)	230	340
Otros (fluidez de 110 ± 5)	-	-

Fuente: Norma Técnica Colombiana 220.

Basado en las especificaciones de la norma NTC 220 se calculó las proporciones de las mezclas de mortero para los diferentes porcentajes de sustitución de cemento por CBCA. Se usó una relación agua cemento de 0.485 tanto para los cubos de mortero convencional como para los cubos de mortero modificado. Las proporciones usadas para la elaboración de todas las muestras de mortero usadas se muestran en la tabla 14.

⁶¹ Universidad Nacional de Colombia. Laboratorio de espectrometría de rayos x. Sede Bogotá. Tomado de: <http://bit.ly/2rqcfLb>.

Tabla 14. Proporciones mortero ensayo a compresión para diferentes % de sustitución.

proporción mezcla - 9 cubos 5x5x5				
% de sustitución	Cemento	CBCA	Arena	Agua
%	gr	gr	gr	mL
0%	740	0	2035	359
10%	666	74	2035	359
15%	629	111	2035	359
20%	592	148	2035	359
25%	555	185	2035	359

Fuente: Autor.

5.8.3. Ensayo de flexión

El ensayo de flexión se realizó a muestras de mortero con los porcentajes de sustitución y el tamaño de CBCA que presentaron la máxima resistencia a la compresión. Las probetas de mortero se realizaron con 16 cm de longitud, y sección transversal de 4 cm x 4cm.

Con base en las especificaciones de la norma NTC 220 se calculó las proporciones de las mezclas de mortero para los diferentes porcentajes de sustitución de cemento por CBCA. Se usó una relación agua cemento de 0.485 tanto para las viguetas de mortero convencional como para los las viguetas de mortero modificado. Las proporciones usadas para la elaboración de todas las muestras de mortero usadas se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Proporciones mortero ensayo a flexión para diferentes % de sustitución.

proporción mezcla - 6 viguetas flexión				
% de sustitución	Cemento	Ceniza	Arena	Agua
%	gr	gr	gr	ml
0	1024	0	2816	496
0,1	922	102	2816	496
0,15	870	154	2816	496
0,2	819	205	2816	496

Fuente: Autor.

5.9. MATERIALES EMPLEADOS

5.9.1. Ceniza de Bagazo de Caña de azúcar

5.9.1.1. Origen

Se utilizó ceniza de bagazo de caña de azúcar procedente del sector azucarero del Valle del Cauca, de la empresa INCAUCA. Un porcentaje del bagazo resultante de la molienda de la caña de azúcar es enviado a unas calderas en donde es utilizado como combustible en la generación de vapor de alta presión, en estas calderas el bagazo se lleva a temperaturas entre 700°C y 900°C, este historial térmico es importante ya que la actividad puzolanica de los materiales se ve afectada por las temperaturas a las que se ha llevado el material, como resultado se obtiene la ceniza de bagazo de caña de azúcar⁶².

5.9.1.2. Preparación

Según el estudio de Cordeiro⁶³, la resistencia a la compresión de la CBCA es inversamente proporcional al tamaño de partícula de la ceniza. Basado en ese criterio y debido a que no se cuenta con equipo para moler la CBCA, se determinó que los tamaños de partícula de la CBCA que se va a usar para las muestras de mortero se clasifiquen con los tamices #100 y #200, de la siguiente forma: Se tamizó la ceniza por el tamiz #100 y al material que pasó este tamiz se le tamizó por el tamiz #200. **A)** El primer tamaño usado para las muestras es el material que pasó el tamiz #100 y que quedó retenido en el tamiz #200. **B)** El segundo tamaño usado es el material que pasó el tamiz #200.

Luego de tener ambos tamaños listos, se procedió a realizar las mezclas de mortero substituyendo el determinado % de cemento en peso por la CBCA.

5.9.2. Cemento

El cemento utilizado para la elaboración de pastas de cemento y mezclas de mortero fue cemento portland gris tipo 1 (de uso general) de la empresa Argos. Las especificaciones técnicas del cemento, dadas por Argos, se muestran en la tabla 16.

⁶² Procesos INCAUCA SA. INCAUCA SA. Consultado el 07/04/2017. Disponible en: www.incauca.com/wp-content/uploads/2016/05/PROCESOS_ESPANOL.pdf.

⁶³ CORDEIRO, Guilherme, *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. Brazil. 2008. Revista cement & concrete composites. Volumen 30. p. 410-418.

Tabla 16. Especificaciones técnicas cemento gris Argos tipo 1.

PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6.00	7.00	–
Trióxido de azufre, SO ₃ , máximo (%)	3.50	3.50	–

PARÁMETROS FÍSICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 121 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , mínimo (minutos)	45	45	45
Fraguado final ⁽¹⁾ , máximo (minutos)	420	480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.8	0.8	0.8
Expansión en agua ⁽²⁾ , máximo (%)	0.02	–	0.02
Resistencia a 3 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	9.0	8.0	13.0
Resistencia a 7 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	16.0	15.0	20.0
Resistencia a 28 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	26.0	24.0	28.0
Blaine, mínimo (cm ² /gr)	2800	2800	–

⁽¹⁾ Ensayo con aguja de Vicat según NTC 118 (ASTM C191)

⁽²⁾ Ensayo en barras de mortero a 14 días según NTC 4927 (ASTM 1038)

⁽³⁾ Ensayo a compresión sobre cubos de mortero con arena normalizada según NTC 220 (ASTM C109)

Fuente: Argos⁶⁴.

5.9.3. Agua

El agua utilizada en la elaboración de pastas de cemento y mezclas de mortero es el agua de la red potable de la Universidad La Gran Colombia.

5.9.4. Áridos

En la elaboración de las mezclas de mortero se utilizó árido de carácter silíceo pasa tamiz #20 y retenida en tamiz #30, tal como lo indica la norma NTC 3937 para arena normalizada. En la ilustración 4, se presenta una muestra de la arena usada.

Ilustración 4. Arena de sílice usada en la elaboración de todos los morteros.



Fuente: Arena Silicea & Arquitectos S.A.S.⁶⁵

⁶⁴ Argos. Cemento gris de uso general. Especificaciones técnicas. Colombia. Disponible en: <http://bit.ly/2rvOtKJ>

5.10. EQUIPOS EMPLEADOS

5.10.1. Tamizado

El tamizado de la ceniza de bagazo de caña de azúcar se realizó manualmente a través de tamices en laboratorio, los tamices seleccionados para las muestras usadas son los dos tamaños más finos de tamiz, debido a que los estudios consultados sobre el material, muestran que la resistencia mecánica de las mezclas de mortero es inversamente proporcional al tamaño del grano de la ceniza⁶⁶.

5.10.2. Fluorescencia de rayos x

El ensayo de fluorescencia de rayos x se realizó y analizó en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, mediante el laboratorio de Espectrometría de Rayos X. Se envió una muestra de 50 gramos de ceniza de Bagazo de Caña de azúcar tamizada por tamiz #200. El equipo utilizado se muestra a continuación.

Perladora Minifuse:

Marca: Phillips

Modelo: PW 4017/20

Función del Equipo: Preparación de muestras en perlas.

Ilustración 5. Perladora Minifuse para fluorescencia de rayos x.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://bit.ly/2rGoDY7>

Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X:

Marca: Phillips

Modelo: MagiX Pro

⁶⁵ Arena Silíceá & Arquitectos SAS. Arenas. Colombia. Disponible en: <http://bit.ly/2saMkFW>

⁶⁶ CORDEIRO, Guilherme, *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. Brazil. 2008. Revista cement & concrete composites. Volumen 30. p. 417.

Función del Equipo: Análisis elemental cualitativo, semicuantitativo y cuantitativo de muestras sólidas y líquidas

Ilustración 6. Espectrómetro de fluorescencia de rayos x.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://bit.ly/2rGoDY7>

5.10.3. Elaboración de probetas de mortero

Todos los equipos usados y procedimientos desarrollados para las mezclas de pastas de cemento y las probetas de mortero cumplen con lo establecido en la norma NTC 112⁶⁷ para mezclas mecánicas.

5.10.3.1. Amasadora

Está compuesta principalmente por:

- **Mezcladora:** Mezcladora mecánica accionada eléctricamente, de tipo epicíclico, el cual le imparte a la paleta un movimiento de rotación y planetario simultáneamente. Tiene tres velocidades controladas por medio mecánico. La mezcladora usada se muestra en la ilustración 7.

⁶⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Método para mezcla mecánica de pasta de cemento y mortero. NTC 112. Bogotá D.C. 1998.

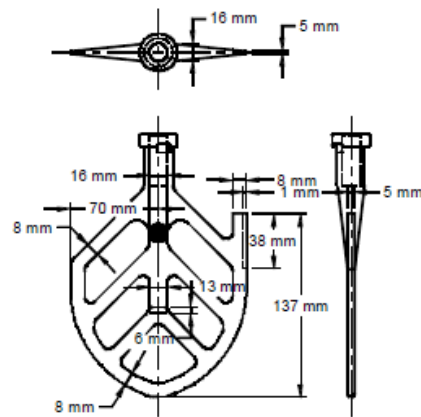
Ilustración 7. Mezcladora mecánica del Laboratorio de materiales de la Universidad La Gran Colombia.



Fuente: Autor.

- **Paleta mezcladora:** De acero inoxidable, fácilmente removible y sus dimensiones cumplen con el diseño dado por la norma NTC 112, como lo indica la ilustración 8. La mezcladora utilizada se muestra en la ilustración 9.

Ilustración 8. Dimensiones de la paleta mezcladora.



Fuente: Norma Técnica Colombiana 112.

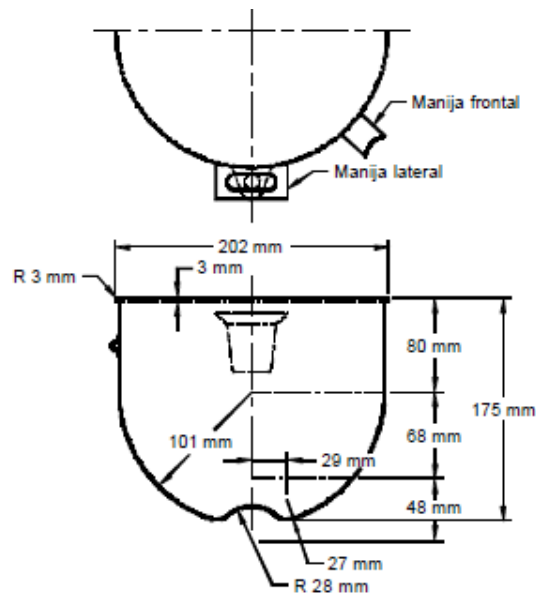
Ilustración 9. Paleta mezcladora del Laboratorio de Materiales de La Universidad La Gran Colombia.



Fuente: Autor.

- **Recipiente de mezcla:** De acero inoxidable, removible y con capacidad nominal de 4.73 L, cumple con las dimensiones dadas por la norma NTC 112, como se muestra en la ilustración 10. El recipiente de mezcla usado en el presente proyecto se muestra en la ilustración 11.

Ilustración 10. Dimensiones del recipiente de mezcla.



Fuente: Norma Técnica Colombiana 112.

Ilustración 11. Recipiente de mezcla del Laboratorio de materiales de La Universidad La Gran Colombia.



Fuente: Autor.

5.10.3.2. Moldes compresión

Para el ensayo de compresión simple de morteros se utilizó dos tipos de moldes debido a la poca disponibilidad de los moldes del laboratorio de materiales de La Universidad La Gran Colombia. **A)** El primer tipo de moldes son moldes de 3 compartimientos, metálicos y con dos partes separables, que hacen parte del laboratorio de materiales de la Universidad La Gran Colombia. **B)** El segundo tipo de moldes son moldes de acrílico de 6 milímetros de espesor, con 12 compartimientos cuya base es separable. Todos los moldes generaban probetas de mortero de 5*5*5 centímetros.

5.10.3.3. Moldes flexión

Para el ensayo de flexión en morteros se usó moldes en acrílico con 6 milímetros de espesor, de 3 compartimientos y cuya base es separable. Los moldes generaban probetas de mortero de 14*4*4 centímetros.

5.10.3.4. Mezclado de pasta de cemento

Para la realización de mezclas de pasta de cemento, el procedimiento de amasado es indicado por la norma NTC 112⁶⁸, y se muestra a continuación:

- Se coloca la paleta mezcladora en el recipiente de mezcla seco en la posición de trabajo.
- Se vierte toda el agua de amasado en el recipiente.
- Se agrega el cemento al agua y se deja reposar 30 segundos mientras absorbe el agua.
- Se mezcla durante 30 segundos a velocidad lenta (140 r/min).

⁶⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Método para mezcla mecánica de pasta de cemento y mortero. NTC 112. Bogotá D.C. 1998. p. 4

- Se detiene la mezcladora durante 15 segundos mientras se arrastra el mortero adherido a la pared del recipiente de mezcla hacia el fondo con el raspador.
- Se mezcla durante 60 segundos a velocidad rápida (285 r/min).

5.10.3.5. Mezclado de probetas de mortero

Antes de realizar el mezclado del mortero se prepararon los moldes con una capa fina de vaselina en todas las caras del espacio donde se va a rellenar con mortero.

Para la realización de las mezclas de mortero tanto para ensayos a compresión como a flexión, y tanto para mortero convencional como para mortero modificado con la CBCA se usó el siguiente procedimiento, indicado por la norma NTC 112⁶⁹.

- Se coloca la paleta mezcladora y el recipiente de mezclado seco en posición de trabajo.
- Se vierte toda el agua de amasado en el recipiente.
- Se agrega el cemento al agua y se mezcla durante 30 segundos a velocidad baja (140 r/min).
- Se agrega lentamente la totalidad de la arena, en un periodo de 30 segundos, mientras se mezcla a velocidad baja.
- Se detiene la mezcladora, se cambia a la velocidad rápida (285 r/min) durante 30 segundos.
- Se detiene la mezcladora y se deja reposar el mortero durante 90 segundos. Durante los primeros 15 segundos se arrastra hacia el fondo, con el raspador, el mortero adherido a la pared del recipiente, durante el resto del intervalo del recipiente se tapa.
- Se mezcla durante 60 segundos a velocidad rápida (285 r/min).
- En caso de que el mortero requiera un nuevo periodo de mezclado, el material adherido a la pared del recipiente debe ser rápidamente arrastrado hacia el fondo con la espátula, antes de iniciar el mezclado adicional.

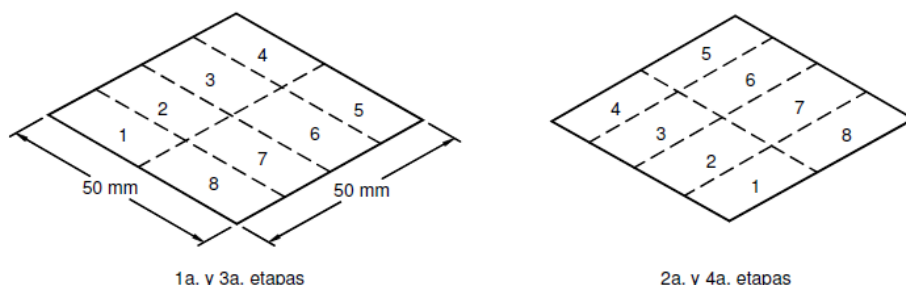
5.10.3.6. Apisonado de probetas para compresión

Una vez finalizado el procedimiento de mezclado, se procedió inmediatamente a llenar los moldes con la mezcla de mortero, para su compactación se realizó mediante dos capas, en la primera capa se llenó todos los compartimientos a la mitad y se apisonó uno por uno, todos los compartimientos mediante 32 golpes en 4 etapas de 8 golpes en toda la superficie. En cada etapa se apisonó siguiendo una dirección perpendicular a los golpes de la etapa anterior. Al apisonar todos los compartimientos con la primea capa, se procede a llenar con

⁶⁹ Ibid. p. 4

la segunda capa todos los compartimientos y se apisona como la primera capa. El procedimiento de apisonado se muestra en la ilustración 12.

Ilustración 12. Procedimiento de apisonado para compresión.



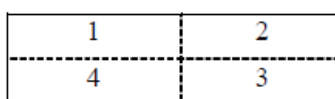
Fuente: Norma Técnica Colombiana 220.

El apisonador para compresión está hecho de goma impermeable con una base de 2*1 centímetros. Al finalizar la compactación de las dos capas, debe quedar un exceso de mortero en la superficie el cual se enraza con un palustre hasta obtener una superficie lisa.

5.10.3.7. Apisonado de probetas para flexión

La compactación para las probetas a flexión se realizó mediante dos capas, en la primera capa se llenó todos los compartimientos a la mitad y se apisonó uno por uno, todos los compartimientos mediante 16 golpes en 4 etapas de 4 golpes en toda la superficie. En cada etapa se apisonó siguiendo una dirección perpendicular a los golpes de la etapa anterior. Al apisonar todos los compartimientos con la primera capa, se procede a llenar con la segunda capa todos los compartimientos y se apisona como la primera capa. El procedimiento de apisonado se muestra en la ilustración 13.

Ilustración 13. Procedimiento de apisonado para flexión.



Fuente: Norma IVIAS E 324.

El apisonador para flexión está hecho de goma impermeable con una base de 8*2 centímetros. Al finalizar la compactación de las dos capas, debe quedar un exceso de mortero en la superficie el cual se enraza con un palustre hasta obtener una superficie lisa.

5.10.3.8. Curado compresión

A las 24 horas luego del mezclado el mortero, se sacaron todos los cubos de mortero de los moldes. Debido a que se realizó dos procedimientos de curado, **A)** el primer curado se realizó en ambientes, es decir, después de sacar las probetas de los moldes, se dejaron

expuestas al ambiente sobre una superficie no absorbente, durante los días de curado necesarios para cada falla. **B)** El segundo curado se realizó sumergido en agua. Después de sacar las probetas de los moldes, se sumergieron en agua hasta la edad de curado de cada falla.

5.10.3.9. Curado flexión:

A las 24 horas luego del mezclado del mortero, se sacaron todas las viguetas de los moldes y se dejaron expuestas al ambiente sobre una superficie no absorbente, durante los días de curado necesarios para cada falla. Para el ensayo de flexión sólo se realizó curado en ambiente.

5.10.4. Resistencia mecánica

5.10.4.1. Compresión simple

Para el ensayo de compresión simple se utilizó una prensa hidráulica del laboratorio de materiales de la Universidad La Gran Colombia. En la ilustración 14 se muestra el centrado de la probeta de mortero y en la ilustración 15 se muestra la prensa usada para el ensayo de compresión en mortero.

Ilustración 14. Centrado de la probeta ensayo compresión simple.



Fuente: Autor.

Ilustración 15. Máquina universal ensayo compresión simple.



Fuente: Autor

5.10.4.2. Flexión

Para el ensayo a flexión se utilizó la máquina universal usada en el ensayo a compresión y se le adaptó una base de dos apoyos sobre la cual se ubica la vigueta, la carga se aplica en la mitad de la luz de la vigueta, como se muestra en la ilustración 16.

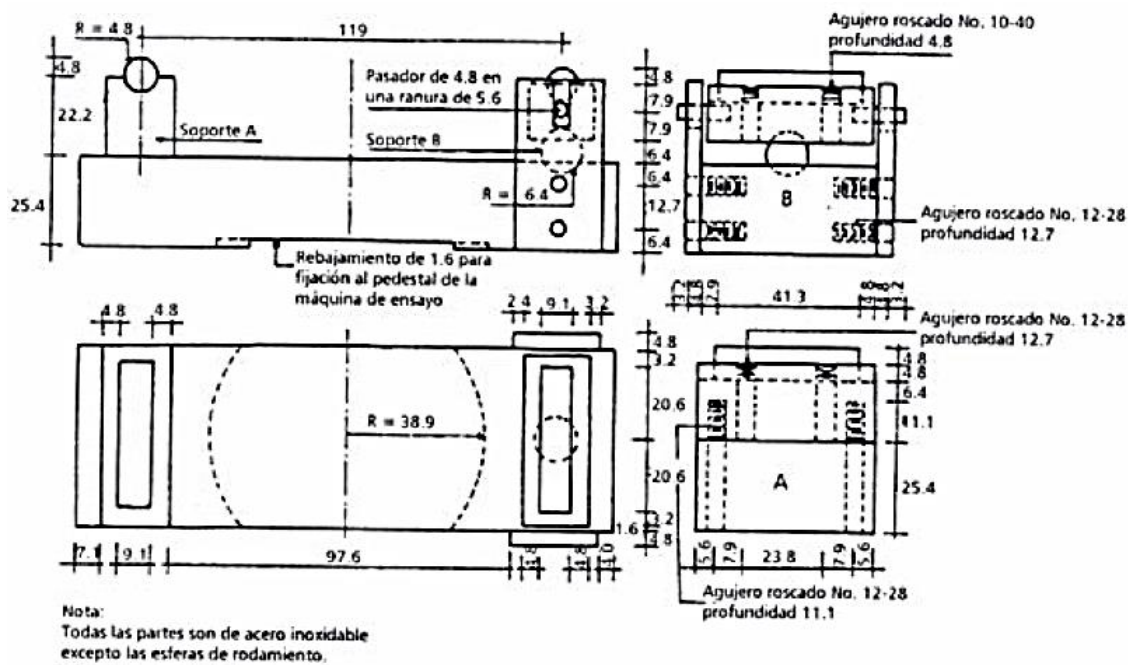
Ilustración 16. Montaje ensayo de flexión.



Fuente: autor

Para el montaje y ejecución del ensayo de flexión en viguetas de mortero se siguieron las especificaciones dadas por la norma INVIAS 324, la cual especifica la separación entre apoyos como se muestra en la ilustración 17.

Ilustración 17. Especificaciones de la base y apoyos para ensayo de flexión en mortero.



Fuente: Norma INVIAS 324.

La norma INVIAS 324 especifica que la separación entre los apoyos de la viga de mortero es de 119 milímetros, y la carga debe aplicarse en el centro de la luz, la carga en la superficie debe adaptarse de tal forma que la prensa hidráulica haga una carga sobre la viga de mortero con un área similar a la de los apoyos. El montaje realizado para determinar la resistencia a la flexión de las muestras estudiadas se muestra en la ilustración 18.

Ilustración 18. Montaje de viga de mortero para ensayo de flexión en morteros.



Fuente: Autor.

5.10.5. Consistencia normal y tiempos de fraguado

Para el ensayo de consistencia normal, se utilizó el aparato de Vicat con émbolo en lugar de aguja, el cual se muestra en la ilustración 19. Para el ensayo de tiempos de fraguado, se utilizó el mismo aparato de Vicat, cambiando el émbolo por aguja. El aparato de Vicat usado cumple con las especificaciones de la norma NTC 110.

Ilustración 19. Aparato de Vicat de la universidad La Gran Colombia.



Fuente: Autor.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. RESULTADOS DE LA CBCA

6.1.1. Fluorescencia de rayos x

Se realizó el ensayo de fluorescencia de rayos x en la Universidad Nacional de Colombia, con el objetivo de determinar la composición química de componentes inorgánicos de la ceniza de bagazo de caña de azúcar, y de esta forma determinar su carácter óptimo como material puzolánico. El ensayo se realizó en una muestra de CBCA pasa tamiz #200, los resultados del ensayo de fluorescencia de rayos x se resumen en la tabla 17.

Tabla 17. Caracterización química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar mediante el ensayo de fluorescencia de rayos x.

Nombre Elemento	Elemento y/o compuesto	Composición CBCA (% en peso)
Silicio	SiO ₂	76,57%
aluminio	Al ₂ O ₃	9,62%
Hierro	Fe ₂ O ₃	5,07%
Calcio	CaO	2,60%
Potasio	K ₂ O	1,79%
Magnesio	MgO	1,50%
Sodio	Na ₂ O	1,10%
Fosforo	P ₂ O ₅	0,74%
Titanio	TiO ₂	0,73%
Azufre	SO ₃	0,17%
Manganeso	MnO	0,09%
Bario	Ba	0,05%
Cloro	Cl	0,03%
Estroncio	Sr	0,02%
Zirconio	Zr	0,02%
Cromo	Cr	163 ppm
Vanadio	V	160 ppm
Zinc	Zn	101 ppm
Rubidio	Rb	33 ppm
Itrio	Y	23 ppm

Fuente: Universidad Nacional de Colombia. Laboratorio de Fluorescencia de rayos x.

Los resultados obtenidos por el ensayo muestran que la CBCA está compuesta más del 90% por los óxidos de Silicio, Aluminio y hierro (77%, 10% y 5% respectivamente),

teniendo en cuenta que según la norma NTC 3493, una ceniza puzolánica de clase F debe presentar un contenido mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ del 70%, la muestra de CBCA usada en el desarrollo de la presente investigación, es una puzolana tipo F y su comportamiento con cemento portland será óptimo. Además, la muestra de ceniza se encuentra en el rango de los resultados de composición química obtenidos por los antecedentes consultados, el cual se resume en la tabla 18. Por esta razón, la ceniza de caña de azúcar obtenida de la región azucarera del Valle del Cauca Colombiano tiene una composición química óptima para ser usada como material puzolánico.

Tabla 18. Rango de la composición química de la CBCA según antecedentes.

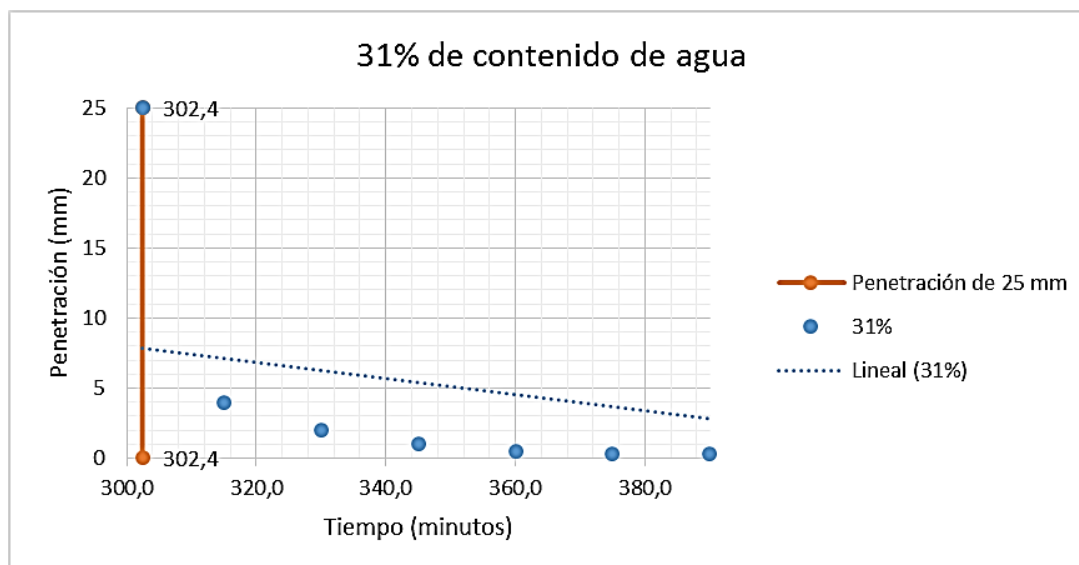
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
	%	%	%
Máximo valor	83	26,9	23,3
Mínimo valor	50,6	1,5	0,9
promedio	67,4	8,2	5,2

Fuente: Compilado de varias fuentes consultadas por el autor.

6.1.2. Consistencia normal y tiempos de fraguado

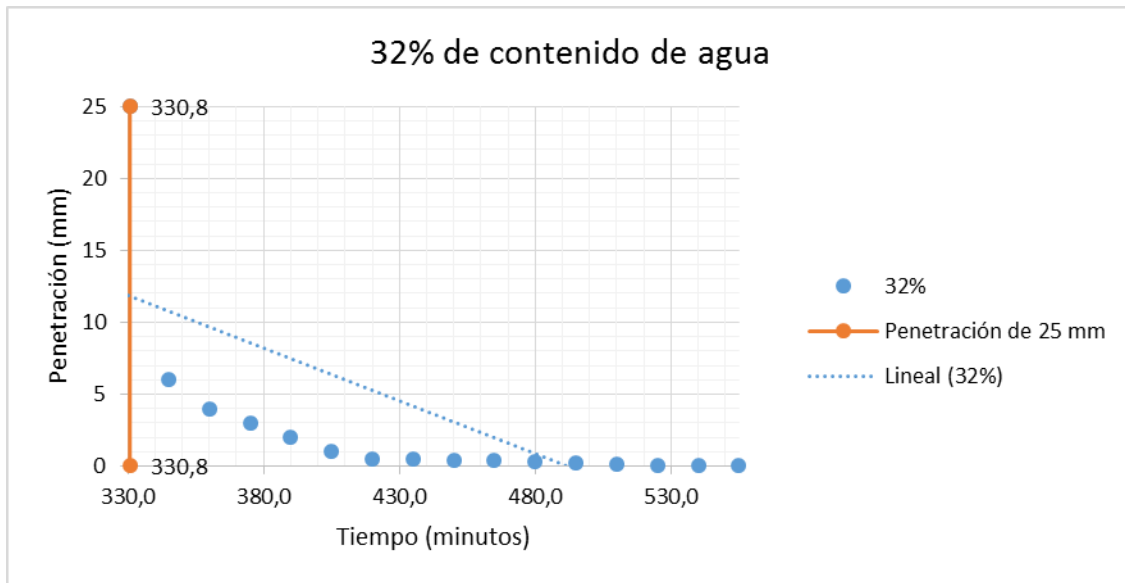
Para el ensayo de consistencia normal, se encontró que la muestra de pasta de cemento con una sustitución del 15% de cemento por CBCA, presenta su consistencia normal entre el 31% y 32% de contenido de humedad, con estos dos valores de humedad, se realizó el ensayo de tiempos de fraguado, los resultados se muestran en las gráficas 3 y 4.

Gráfica 3. Penetración de la aguja Vicat vs tiempo de fraguado con 31% de humedad.



Fuente: Autor.

Gráfica 4. Penetración de la aguja Vicat vs tiempo de fraguado con 32% de humedad.



Fuente: autor

Según la norma NTC 118⁷⁰, en una mezcla de pasta de cemento hidráulico el tiempo de fraguado inicial es el tiempo requerido para que la aguja de Vicat penetre 25 milímetros, y el tiempo de fraguado final es el tiempo requerido para que la aguja de Vicat no deje muestra visible sobre la muestra. Los resultados de tiempo de fraguado inicial y final de las muestras estudiadas y los valores indicados por la norma se resumen en la tabla 19.

Tabla 19. Tiempo de fraguado inicial y final de la norma y de las muestras estudiadas.

		Tiempos de fraguado			
		inicial	final	inicial	final
		Horas			
Norma	máx	0,82	3,08	%	%
	mín	3,45	5,20		
Consistencia normal	31%	5,04	8,25	236%	199%
	32%	5,51	9,25	258%	223%

Fuente: Autor.

⁷⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Determinación de tiempos de fraguado de cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat. NTC 118. Bogotá D.C. 2004.

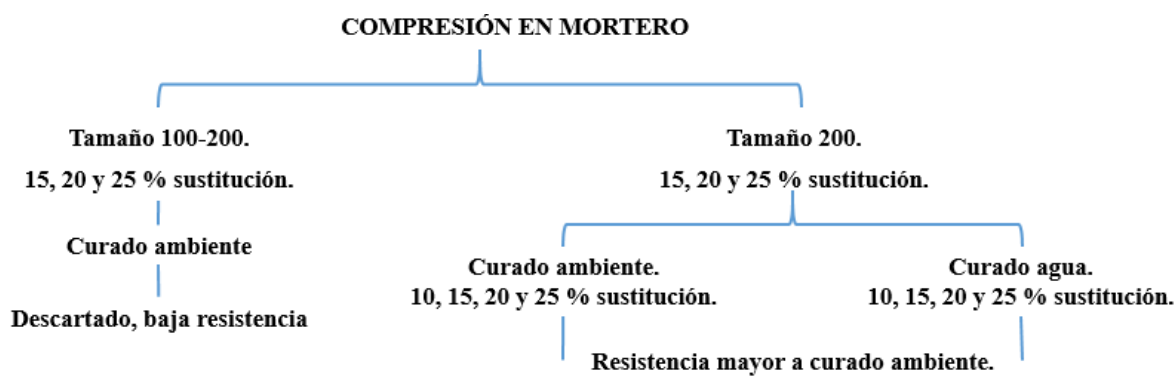
Los resultados de tiempos de fraguado evidencian que las muestras con humedades de 31% y 32% con sustitución del 15% de CBCA, presentan tiempos de fraguado inicial y final mucho más demorados que los indicados en la norma para cemento hidráulico, específicamente las muestras con 31% y 32% de humedad presentan un tiempo de fraguado inicial 95 y 123 minutos más demorados que los especificados por la norma, es decir que el tiempo de fraguado inicial es de 230% con respecto al convencional y el tiempo de fraguado final es de 78 y 138 minutos más demorados que los especificados por la norma, es decir del 200% con respecto al convencional.

Los resultados de tiempos de fraguado aplicados a una pasta de cemento con sustitución del 15% evidencian que para mezclas de mortero con sustitución de cemento por CBCA, el tiempo de curado va a ser mucho mayor, este es un parámetro muy importante ya que en los trabajos de ingeniería civil, se requiere que las mezclas de mortero y concreto presenten su curado en cortos periodos de tiempo para que puedan asumir las cargas para las que fueron diseñados, por esta razón las muestras de mortero con sustitución de cemento por CBCA presenta un problema por requerir tanto tiempo para su endurecimiento.

6.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTERO

Para el ensayo de resistencia a la compresión simple en cubos de mortero de 5*5*5 cm, se varió el porcentaje de sustitución de cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar, el tamaño de partícula de la CBCA y el tipo de curado. Los ensayos se realizaron como se resume en la ilustración 20.

Ilustración 20. Fases de desarrollo del ensayo de compresión.



Fuente: Autor.

6.2.1. Resistencia a la compresión según tamaño de CBCA

En primer lugar se realizó el ensayo de compresión para muestras con dos tamaños distintos de partícula de CBCA, los cuales son entre tamiz #100 y #200 (T#100-#200) y pasa tamiz #200 (T#200). Para ambos tamaños se usó porcentajes de sustitución de cemento por CBCA de 15%, 20% y 25% en las mezclas de mortero. A todas las probetas de esta fase se les realizó curado en ambiente. Los resultados obtenidos para todas las muestras evaluadas se muestran en la tabla 20 y se muestran graficados en la gráfica 5.

Tabla 20. Resultados de esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para tamaños T#100-#200 y T#200, porcentajes de sustitución de 15%, 20% y 25% de sustitución y curado ambiente.

			Muestra						
			1	2	3	Promed			
Reemplazo	Día	Tamaño CBCA	Carga compresión				Área	Esfuerzo	% sobre
%		# tamiz	KN	KN	KN	KN	m2	MPA	estándar
15%	3	100-200	29,2	26,3	24,4	26,6	0,0025	10,7	87%
	7	100-200	38,1	35,0	38,2	37,1	0,0025	14,8	86%
	14	100-200	50,0	49,7	44,7	48,1	0,0025	19,2	104%
	28	100-200	50,6	50,3	50,7	50,5	0,0025	20,2	98%
15%	3	200	27,9	29,9	35,0	30,9	0,0025	12,4	101%
	7	200	46,2	49,9	47,4	47,8	0,0025	19,1	110%
	14	200	44,1	45,9	49,9	46,7	0,0025	18,7	101%
	28	200	49,8	60,8	61,5	57,4	0,0025	22,9	111%
20%	3	100-200	17,0	15,5	21,6	18,0	0,0025	7,2	59%
	7	100-200	44,3	44,3	37,9	42,1	0,0025	16,9	97%
	14	100-200	45,0	46,9	25,7	39,2	0,0025	15,7	85%
	28	100-200					0,0025		
20%	3	200	26,5	30,8	25,8	27,7	0,0025	11,1	90%
	7	200	48,2	46,9	44,1	46,4	0,0025	18,6	107%
	14	200	48,2	48,7	40,1	45,7	0,0025	18,3	99%
	28	200					0,0025		
25%	3	100-200	20,7	18,8	19,5	19,6	0,0025	7,9	64%
	7	100-200	30,1	26,6	24,2	27,0	0,0025	10,8	62%
	14	100-200	27,8	35,9	38,9	34,2	0,0025	13,7	74%
	28	100-200					0,0025		
25%	3	200	20,1	21,8	20,7	20,9	0,0025	8,3	68%
	7	200	40,8	24,4	30,8	32,0	0,0025	12,8	74%
	14	200	35,5	40,1	34,5	36,7	0,0025	14,7	80%
	28	200							
0%	3	-	34,81	30,66	26,81	30,76	0,0025	12,3	100%
	7	-	40,87	45,70	43,49	43,35	0,0025	17,3	100%
	14	-					0,0025	18,5	100%
	28	-	50,19	51,20	53,50	51,63	0,0025	20,7	100%

Fuente: Autor

El cálculo de la resistencia a la compresión de todas las muestras de mortero, consistió en obtener tres valores de la carga con la que falla la muestra de mortero, obteniendo un valor promedio entre estos tres valores, como se ve en la ecuación 1.

Ecuación 1. Resistencia a la compresión promedio de las muestras de mortero.

$$P_{prom}(KN) = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}$$

En donde:

- P_{prom} : Esfuerzo compresión promedio en muestras de mortero (KN)
- P : Carca a la compresión (KN)

El valor promedio de la resistencia a la compresión obtenido, se divide entre el área de la sección transversal de la probeta de mortero, la cual es constante para todas las muestras ($5\text{cm} \times 5\text{cm} = 25\text{cm}^2 = 0.0025\text{m}^2$), y de esta forma se obtiene el esfuerzo a compresión de las muestras de mortero. El cálculo se muestra en la ecuación 2.

Ecuación 2. Esfuerzo a la compresión de muestras de mortero.

$$Esf_{comp} (MPa) = \frac{P_{prom}}{0.0025 (m^2)}$$

En donde:

- Esf_{comp} : Esfuerzo de compresión (MPa)
- $0.0025 (m^2)$: Área de la sección transversal de la probeta, es igual para todas las muestras del ensayo a compresión.

El porcentaje sobre el valor estándar, es el valor de esfuerzo de compresión obtenido por la muestra de mortero modificado, dividido en el valor de esfuerzo de compresión obtenido por la muestra de mortero convencional, de esta forma se muestra la variación de la resistencia a la compresión de las muestras de mortero modificado comparadas con la muestra de mortero convencional. El cálculo se muestra en la ecuación 3.

Ecuación 3. % de esfuerzo de compresión del mortero modificado con respecto al mortero convencional.

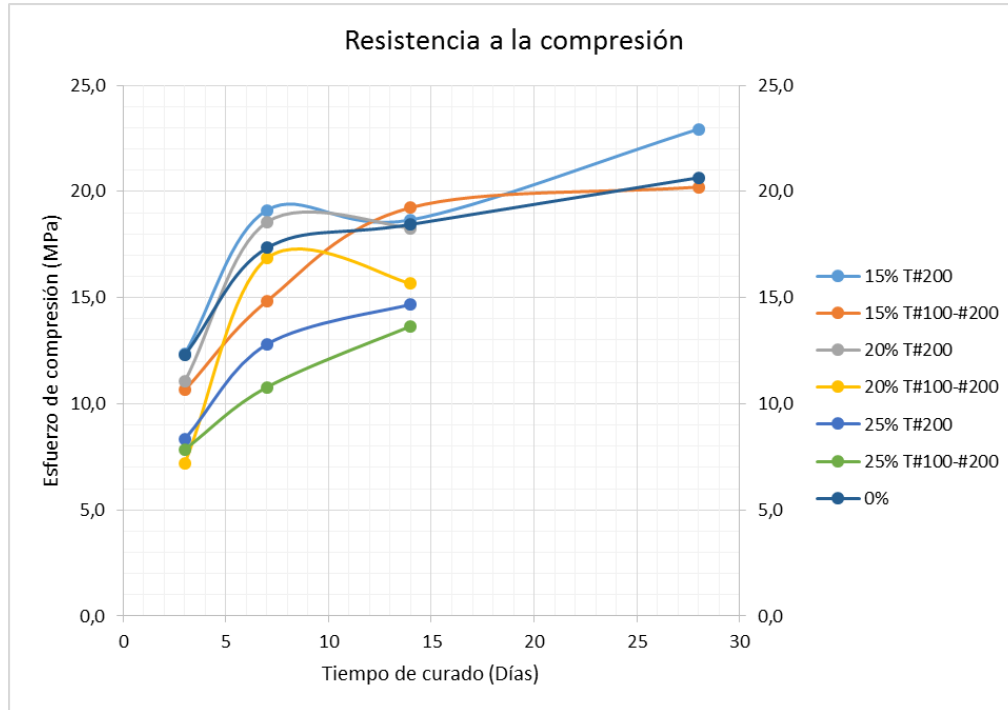
$$\% \text{ sobre estandar} = \frac{Esf_{comp} \text{ modificado}}{Esf_{comp} \text{ convencional}}$$

En donde:

- % sobre estándar: % de resistencia del mortero modificado con respecto al convencional (%).

- Esf comp modificado: Esfuerzo de compresión en muestras de mortero modificado (MPa).
- Esf comp convencional: Esfuerzo de compresión en muestras de mortero convencional (MPa).

Gráfica 5. Esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para tamaños T#100-#200 y T#200, porcentajes de sustitución de 15%, 20% y 25% de sustitución y curado ambiente.



Fuente: Autor

Los resultados de esta fase muestran que el porcentaje de sustitución de 25% con los dos tamaños de CBCA usados, presenta la menor resistencia a la compresión de todas las sustituciones y comparado con el mortero convencional, alcanza el 74% y 80% de la resistencia a los 14 días de curado para los tamaños T#100-#200 y T#200 respectivamente.

El porcentaje de sustitución del 15% es el que ha presentado la mayor resistencia a la compresión entre todos los porcentajes de sustitución usados. Comparado con el mortero convencional, la sustitución del 15% alcanza una resistencia a los 28 días de curado de 98% para tamaño y 111% para los tamaños T#100-#200 y T#200 respectivamente. La muestra con sustitución de 15% y tamaño T#200 es la única que ha sobrepasado la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, aun así hay muestras que presentaron valores muy

cercanos a los alcanzados por el mortero convencional, como se muestra en la tabla anterior.

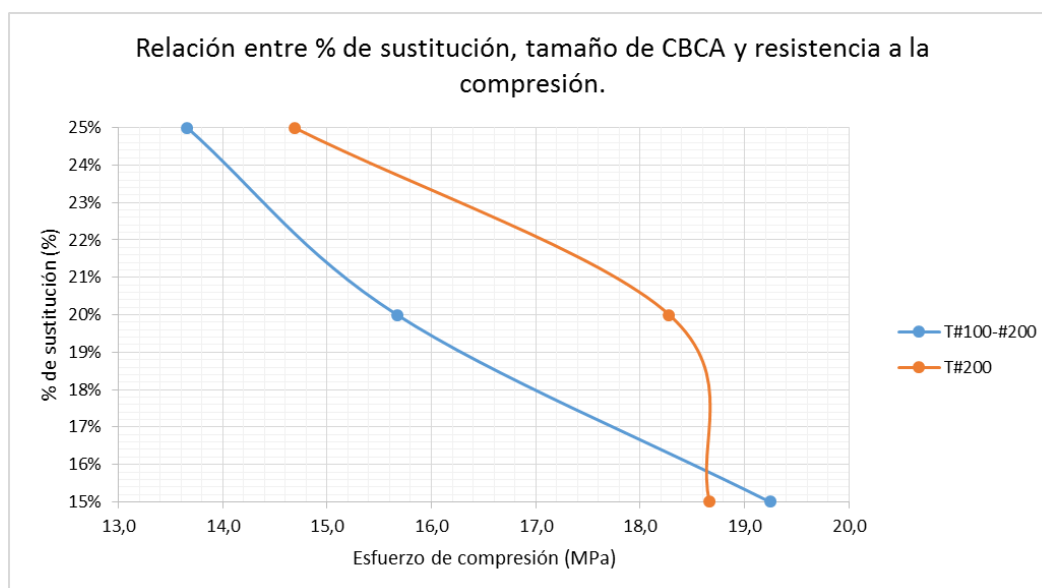
Para analizar la relación entre el porcentaje de sustitución, el tamaño de CBCA y la resistencia a la compresión en esta fase, se grafica el % de sustitución vs el esfuerzo de compresión obtenidos para 14 días de curado ambiente para los dos tamaños de CBCA usados, los valores a graficados se muestran en la tabla 21 y la relación se muestra en la gráfica 6.

Tabla 21. Valores de relación entre % de sustitución, tamaño de CBCA y resistencia a la compresión.

Sustitución	Tamaño	Esfuerzo
%	µm	14 d
15%	150	19,2
20%	150	15,7
25%	150	13,7
15%	75	18,7
20%	75	18,3
25%	75	14,7

Fuente: Autor.

Gráfica 6. Relación entre % de sustitución, tamaño de CBCA y resistencia a la compresión.



Fuente: Autor.

Como se puede ver en la gráfica 6, a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por CBCA, la resistencia a la compresión del mortero disminuye. En cuanto al tamaño de CBCA, a menor tamaño de partícula se obtiene mayor resistencia a la compresión. A nivel general entre los dos tamaños de partícula de CBCA, la resistencia a la compresión es mayor en las muestras con tamaño #200 que en las muestras con tamaño T#100-#200 T#100-#200.

6.2.2. Resistencia a la compresión según tipo de curado

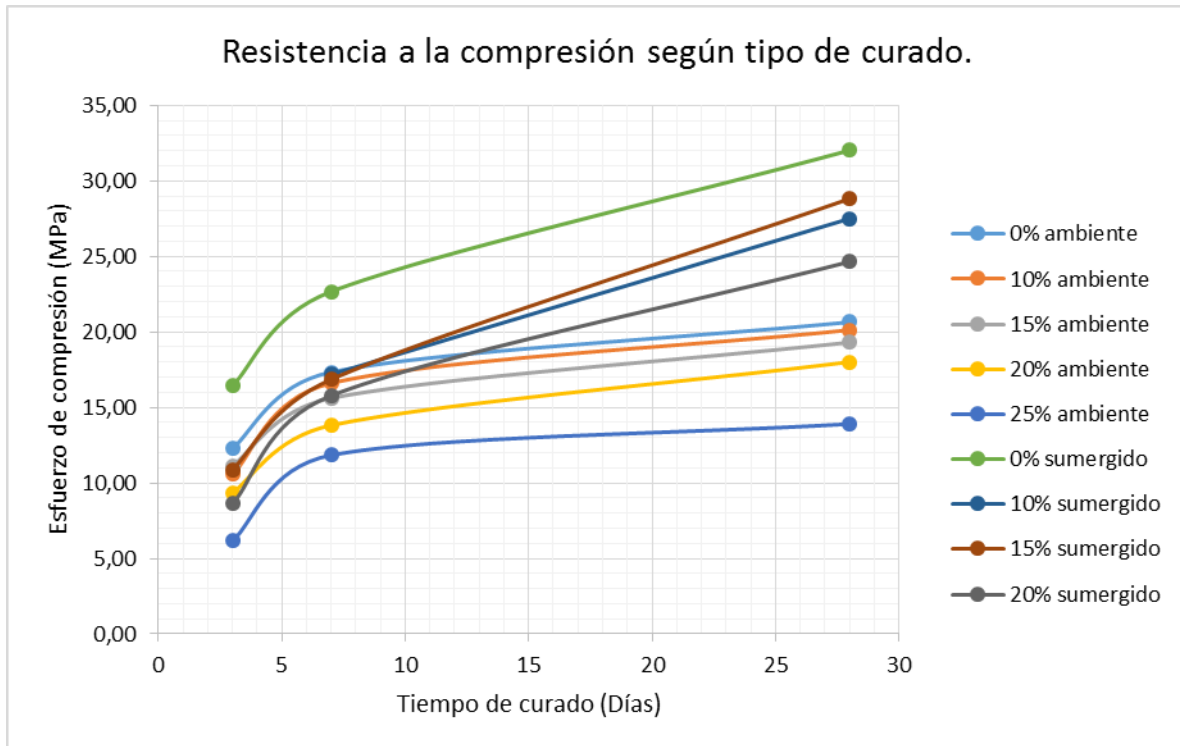
Debido a los resultados en la fase anterior, se descartó las muestras con tamaño de ceniza T#100-#200 porque eran inferiores a los del tamaño T#200. En la segunda fase, se realizaron muestras de mortero para el tamaño T#200 para el cual se usaron porcentajes de sustitución del 10%, 15%, 20% y 25% con curado ambiente y otras con 3, 7 y 28 días de curado ambiente y sumergido en agua, para determinar la variación de la resistencia según el tipo de curado. Los resultados del ensayo de compresión de todas las muestras se resumen en la tabla 22 y se muestran en la gráfica 7.

Tabla 22. Valores esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para sustituciones de 10% 15%, 20% y 25%, tamaño T#200 y curado ambiente y sumergido.

				Muestra						
				1	2	3	Promedio			
Sustit	Día	Tamaño CBCA	curado	Carga compresión				Área	Esfuerzo	% sobre
%		# tamiz		KN	KN	KN	KN	m2	MPA	estandar
0%	3	-	Ambiente	34,81	30,66	26,81	30,76	0,0025	12,30	100%
	7	-		40,87	45,70	43,49	43,35	0,0025	17,34	100%
	28	-		50,19	51,20	53,50	51,63	0,0025	20,65	100%
10%	3	200	Ambiente	25,60	28,84	24,84	26,43	0,0025	10,57	86%
	7	200		44,93	33,65	45,99	41,52	0,0025	16,61	96%
	28	200		55,70	45,34	49,96	50,33	0,0025	20,13	97%
15%	3	200	Ambiente	28,13	27,71	27,78	27,87	0,0025	11,15	91%
	7	200		37,56	31,97	47,61	39,05	0,0025	15,62	90%
	28	200		43,15	49,16	52,50	48,27	0,0025	19,31	93%
20%	3	200	Ambiente	23,13	25,29	21,70	23,37	0,0025	9,35	76%
	7	200		39,95	28,42	35,27	34,55	0,0025	13,82	80%
	28	200		45,00	45,05		45,03	0,0025	18,01	87%
25%	3	200	Ambiente	16,70	15,84	13,66	15,40	0,0025	6,16	50%
	7	200		34,28	28,55	26,00	29,61	0,0025	11,84	68%
	28	200		34,49	35,88	33,97	34,78	0,0025	13,91	67%
0%	3	-	Agua	38,36	38,86	46,12	41,11	0,0025	16,45	100%
	7	-		46,46	55,10	68,50	56,69	0,0025	22,67	100%
	28	-		83,30	80,40	76,50	80,07	0,0025	32,03	100%
10%	3	200	Agua					0,0025		
	7	200		45,14	37,34	46,42	42,97	0,0025	17,19	76%
	28	200		66,70	71,10	68,50	68,77	0,0025	27,51	86%
15%	3	200	Agua	25,52	28,66	27,51	27,23	0,0025	10,89	66%
	7	200		42,81	39,78	43,87	42,15	0,0025	16,86	74%
	28	200		68,20	74,40	73,60	72,07	0,0025	28,83	90%
20%	3	200	Agua	22,78	20,55	21,25	21,53	0,0025	8,61	52%
	7	200		38,54	38,39	41,43	39,45	0,0025	15,78	70%
	28	200		69,40	56,50	59,00	61,63	0,0025	24,65	77%

Fuente: Autor.

Gráfica 7. Esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para sustituciones de 10% 15%, 20% y 25%, tamaño T#200 y curado ambiente y sumergido.

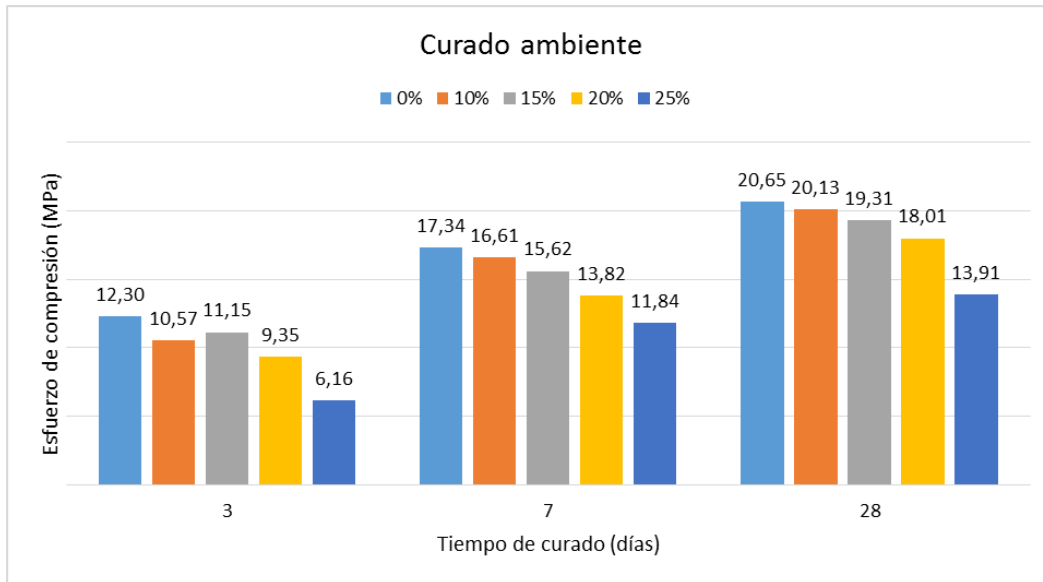


Fuente: Autor.

En los resultados de esta fase, se puede ver que la muestra que obtuvo mayor resistencia a la compresión es la de mortero convencional con curado en agua. La muestra con 15% de sustitución y curado en agua alcanzó una resistencia del 90% de la convencional, y la muestra con 10% de sustitución y curado en agua tuvo una resistencia del 86% de la convencional. Las muestras que obtuvieron la menor resistencia son la de 25% de sustitución con curado ambiente con 67% de la resistencia del mortero convencional curado en ambiente y la muestra con 20% de sustitución con curado ambiente que obtuvo 87% de la resistencia del mortero convencional con curado en ambiente.

Para ver los resultados con más detalle según cada tipo de curado, se muestra en la gráfica 8 los resultados de esfuerzo a compresión para todas las muestras con curado ambiente y en la gráfica 9 los resultados de esfuerzo a compresión para todas las muestras con curado sumergido.

Gráfica 8. Esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para sustituciones de 10% 15%, 20% y 25%, tamaño T#200 y curado ambiente.



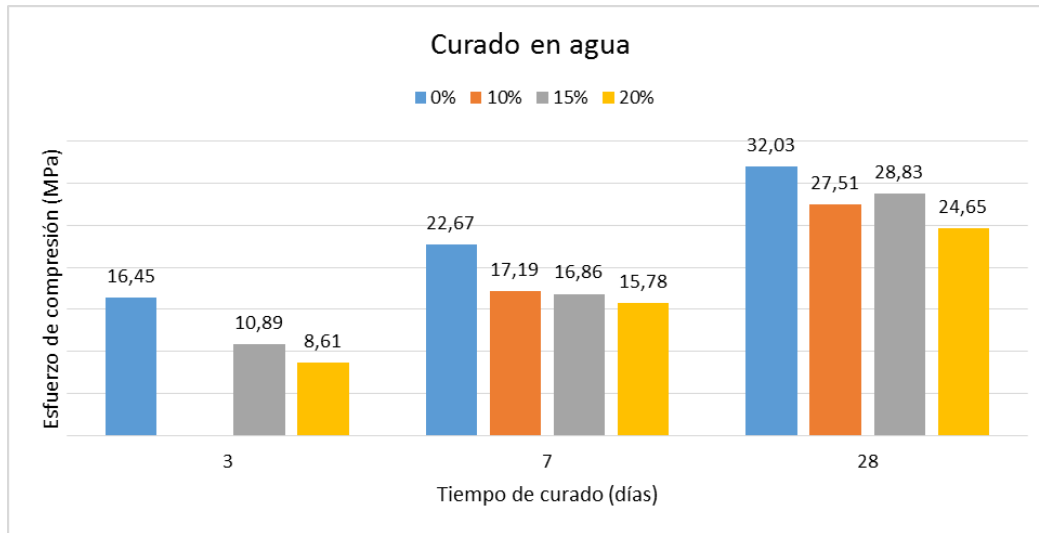
Fuente: Autor.

Como se puede ver en la gráfica 8, los porcentajes de sustitución con curado en ambiente que presentan mayor resistencia a la compresión son los de 10% y 15% de sustitución, obteniendo ambos valores muy cercanos entre sí y muy cercanos al valor del mortero convencional con 97% y 93% de la resistencia del mortero convencional a los 28 días de curado ambiente, respectivamente.

La muestra con porcentaje de sustitución de 25% de sustitución, es la que presenta menor resistencia a la compresión de todas las muestras con curado ambiente, dicha resistencia es de 14 MPa, este valor no cumple con el valor de resistencia mínimo dado por Sández de Guzan⁷¹ para morteros de pega para mampostería reforzada (PM y PL) el cual es de 17.2 MPa, pero sí cumple con el segundo tipo de mortero para mampostería simple (S) cuyo valor es de 12.4 MPa. Sin embargo, los demás porcentajes de sustitución con curado ambiente cumplen con los requerimientos mecánicos para morteros de mampostería reforzada, la cual es la máxima especificación para morteros en Colombia.

⁷¹ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Op. Cit. p. 117

Gráfica 9. Esfuerzo de compresión vs tiempo de curado para sustituciones de 10% 15%, 20% y 25%, tamaño T#200 y curado sumergido.



Fuente: Autor.

En la gráfica 9, se muestran los resultados de resistencia a la compresión para muestras con curado sumergido. Como se puede ver, de nuevo los porcentajes que presentan mayor resistencia a la compresión son los de 10% y 15%, presentando 86% y 90% de la resistencia a la compresión del mortero convencional.

De los porcentajes de sustitución usados con curado sumergido, el del 20% es el que presenta la menor resistencia a la compresión, presentando 77% de la resistencia a la compresión del mortero convencional. La muestra con menor resistencia de 20% de sustitución, cumple con los requerimientos mecánicos dados por Sánchez de Guzmán para morteros de pega para mampostería reforzada, y debido a que esta es la máxima especificación de morteros en Colombia, todas las muestras usadas con curado sumergido, pueden ser usadas para todos los requerimientos de mortero en Colombia.

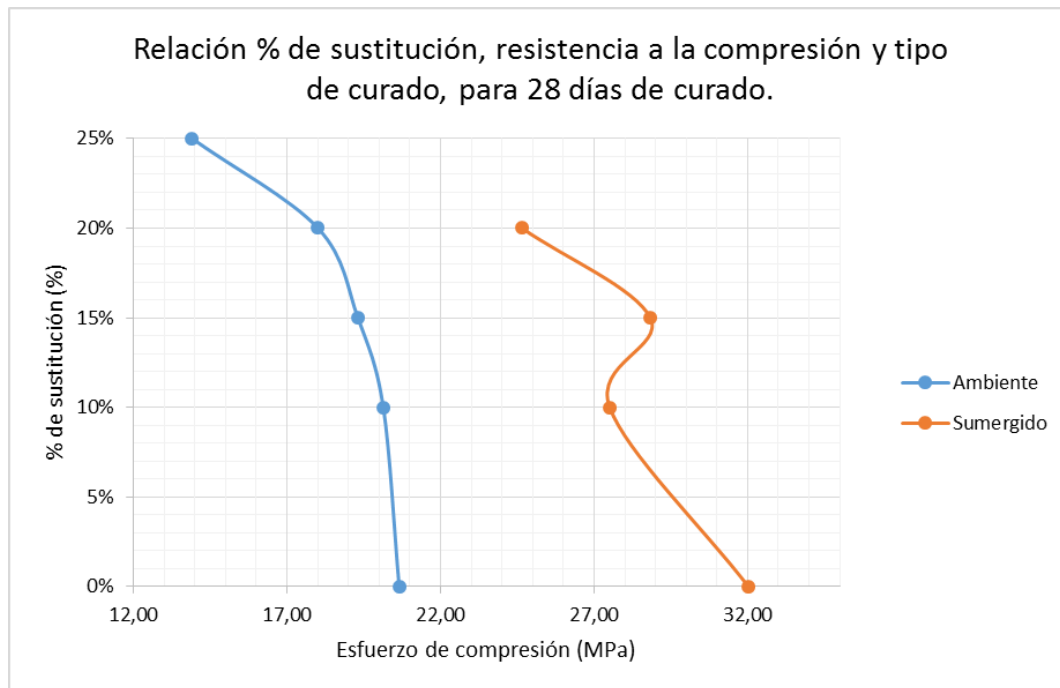
Para estudiar la relación entre el porcentaje de sustitución, el tipo de curado y la resistencia a la compresión de las muestras de mortero, se grafica el % de sustitución vs la resistencia a 28 días de curado para los dos tipos de curado. En la tabla 23 se resumen los resultados y se muestra la relación en la gráfica 10.

Tabla 23. Valores % de sustitución vs esfuerzo de compresión para 28 días de curado ambiente y sumergido.

Curado	% sustitución	Esfuerzo
	%	MPa
Ambiente	0%	20,65
	10%	20,13
	15%	19,31
	20%	18,01
	25%	13,91
Sumergido	0%	32,03
	10%	27,51
	15%	28,83
	20%	24,65

Fuente: Autor

Gráfica 10. % de sustitución vs esfuerzo de compresión para 28 días de curado ambiente y sumergido.



Fuente: Autor.

Como se puede ver en la gráfica 10, a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar, disminuye la resistencia a la compresión del mortero en los dos tipos de curado, lo cual coincide con los resultados de la fase anterior. Además se puede observar que las muestras con curado sumergido muestran

mayor resistencia a la compresión que las muestras con curado ambiente, esto se debe a que las partículas de material cementante reaccionan con el agua durante el tiempo de curado aumentando la resistencia.

En la gráfica 10 se puede ver que a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por CBCA, el valor de la resistencia a la compresión de muestras con curado en agua, se acerca más al valor de la resistencia a la compresión obtenida para muestras con curado en ambiente, es decir, que a medida que se reemplaza mayor cantidad de cemento por CBCA, el curado en agua es menos efectivo que el curado ambiente. En la tabla 24 se muestra la diferencia entre la resistencia con curado sumergido y la resistencia con curado ambiente.

Tabla 24. Comparación de la resistencia a la compresión entre curado sumergido y curado ambiente.

% sustitución	Tipo de curado		Diferencia
	Ambiente	Sumergido	
%	Mpa	Mpa	Mpa
0%	20,65	32,03	11,37
10%	20,13	27,51	7,37
15%	19,31	28,83	9,52
20%	18,01	24,65	6,64

Fuente: Autor.

En la tabla 23, se puede ver que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por CBCA en las muestras de mortero, el curado sumergido en agua presenta una menor resistencia, esto se debe a que a medida que aumenta el % de sustitución, hay menos cemento presente para reaccionar con el agua a través del tiempo de curado, ya que la CBCA no genera una reacción cementicia con el agua, debido a que es un material puzolánico.

6.3. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN MORTERO

El ensayo de resistencia a la flexión, a pesar de no ser una característica principal de los morteros, es un ensayo importante ya que combina esfuerzos de tracción y compresión. Los resultados obtenidos en el ensayo a flexión son significativamente más bajos que los obtenidos para el ensayo de compresión, debido a que en los morteros se requiere que resistan cargas que llegan de forma axial. La resistencia a la flexión se determina mediante

el valor del módulo de rotura, el cual es la relación entre la máxima carga que resiste a flexión y las dimensiones de base y altura de la sección transversal de la probeta.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por el ensayo de resistencia a la compresión en las muestras de mortero, se realizó el ensayo de resistencia a la flexión en muestras de mortero de 16 cm de longitud y sección transversal de 4*4 cm, con 28 días de curado ambiente, con tamaño de CBCA T#200 y con los porcentajes de sustitución que obtuvieron la mayor resistencia. Con el objetivo de comparar la resistencia a la flexión de las muestras de mortero modificado y las muestras de mortero convencional se grafica de resistencia a la flexión vs porcentaje de reemplazo. Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión se muestran en la tabla 25 y la relación se muestra en la gráfica 11.

Tabla 25. Resultados ensayo resistencia a la flexión para 28 días de curado ambiente.

Reemplazo	Día	Tamaño CBCA	curado	Muestra			Promedio	b	h	Luz (L)	Resist a flexión	% sobre estándar
				1	2	3						
%		# tamiz		KN	KN	KN	KN	cm	cm	cm	Mpa	
0%	28	T#200	Ambiente	1,18	1,33	1,28	2,76	4	4	11,9	7,73	100%
10%	28	T#200		1,21	1,48		2,84	4	4	11,9	7,95	103%
15%	28	T#200		1,23	1,51		2,87	4	4	11,9	8,02	104%
20%	28	T#200		1,19	1,40	1,53	2,87	4	4	11,9	8,03	104%

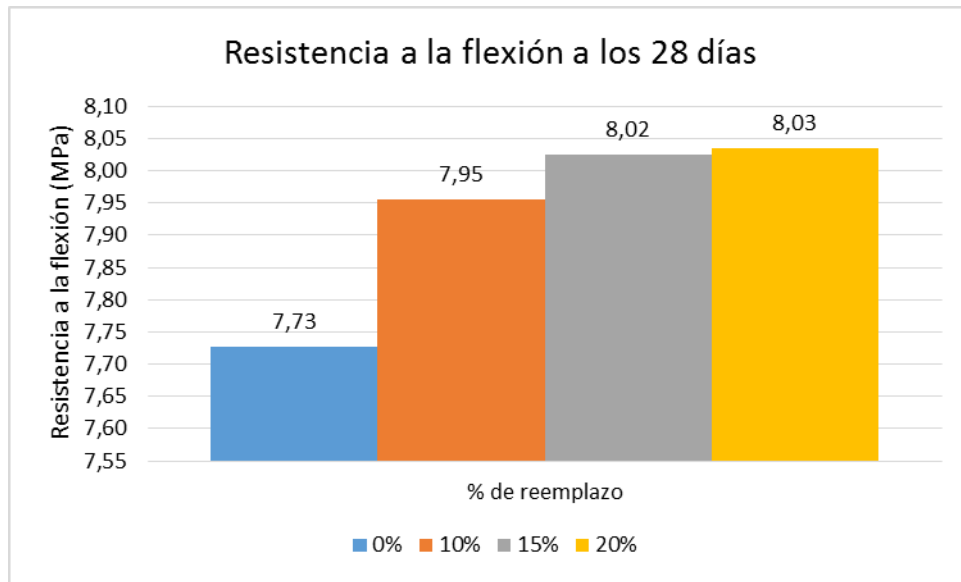
Fuente: Autor.

El esfuerzo de flexión en muestras de mortero, se calcula como lo menciona la norma INVIAS E 324, con la carga máxima de rotura obtenida a partir del promedio de 3 valores de carga de rotura en la misma muestra, como se muestra en la ecuación 4.

Ecuación 4. Esfuerzo de flexión en muestras de mortero.

$$\begin{aligned} \text{Esfuerzo de flexión en muestras de mortero (MPa)} &= \\ &= 0.0028 * \text{Carga de rotura promedio (N)} \end{aligned}$$

Gráfica 11. Esfuerzo de flexión para 28 días de curado ambiente vs % de reemplazo.



Fuente: Autor.

Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión a 28 días de curado ambiente, muestran que el mortero convencional tiene la menor resistencia a la flexión de las muestras estudiadas, las sustituciones del 15% y 20% tienen una resistencia del 104% de la alcanzada por el mortero convencional. Los resultados de este ensayo muestran que todas las muestras con los porcentajes de sustitución usados son óptimas para su uso a la flexión, debido a que superan la resistencia obtenida por el mortero convencional.

6.4. PORCENTAJE, TAMAÑO Y CURADO ÓPTIMO

Según los resultados obtenidos por los ensayos de compresión, se puede decir que a medida que se disminuye el tamaño de partícula de la CBCA, se mejora la resistencia a la compresión de las muestras de mortero. Este resultado coincide con el estudio de Bahurudeen⁷², el cual usó 8 tamaños de partícula de CBCA y concluyó que el tamaño de partícula de CBCA es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión de las muestras de mortero modificado.

⁷² BAHURUDEEN A y SANTHANAM Manu. Influence of different processing methods on the pozzolanic. India. 2015. Revista cement & concrete composites. Vol. 56. p. 32-45. p. 44

Específicamente en el presente estudio, el tamaño que presentó el mejor comportamiento de resistencia mecánica fue el de material que pasa el tamiz #200 (75 micras). Ya que los valores de resistencia obtenidos por este tamaño de partícula estuvieron muy cercanos a los del mortero convencional. Es necesario investigar el comportamiento mecánico de muestras de mortero con inferior tamaño de partícula de CBCA para determinar si la adición de la CBCA estudiada puede superar y en qué medida, la resistencia obtenida por el mortero convencional. Esto se sugiere debido a que en estudios como el de Bahurudeen, et al⁷³, se encontró en una muestra de mortero modificado con CBCA la diferencia de resistencia varía en 5 MPa cuando se usa una partícula de 45 micras con respecto a una de 75 micras.

En cuanto al porcentaje de sustitución, es necesario mencionar que en los antecedentes consultados, el porcentaje de sustitución con la mayor resistencia a la compresión variaba de un estudio a otro y esto se debe en gran medida a la composición química de la CBCA, pero a nivel general, el porcentaje de sustitución óptimo de los estudios consultados se encuentra entre el 5% y el 30% de sustitución de CBCA por cemento.

Según los resultados obtenidos a compresión y flexión, el porcentaje de sustitución que da a la mezcla de mortero la mayor resistencia, se encuentra entre 10% y 15% de sustitución, ya que fueron las muestras que presentaron la mayor resistencia en todos los ensayos, tanto de compresión como de flexión, con valores muy cercanos entre sí. Esos resultados coinciden con el rango de porcentajes de sustitución encontrado en los estudios consultados como antecedentes que se menciona anteriormente.

Los resultados de resistencia a la compresión, en los que se usó dos tipos de curado, muestran que se obtienen mayores valores de resistencia a la compresión cuando se realiza el curado de la muestra sumergido en agua, comparado con las muestras que se curaban expuestas al ambiente. También es necesario tener en cuenta que a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por CBCA, el valor de resistencia a la compresión con curado en agua, se acerca más al valor que se obtiene con curado de las muestras en ambiente, así que el curado en agua es cada vez menos efectivo.

⁷³ Ibid. p. 41

7. CONCLUSIONES

- La composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar muestra que la suma de los óxidos de silicio y aluminio es de 86%, esta composición está por encima del requerimiento de la norma NTC 3493 para puzolanas, Desde el punto de vista químico este material tiene un buen índice de reactividad puzolánica con cemento portland y por lo tanto puede ser usado tanto en mezclas de mortero como en mezclas de concreto, ya sea como adición o como sustituto parcial.
- La resistencia a la compresión es inversamente proporcional al tamaño de la CBCA y al porcentaje de sustitución de CBCA por cemento portland. Las muestras de mortero modificado con CBCA mejoraron la resistencia a la flexión en todos los porcentajes de sustitución usados.
- El porcentaje de sustitución de ceniza de bagazo de caña de azúcar por cemento portland que confiere la mayor resistencia a una mezcla de mortero, es la sustitución del 10% en peso del cemento, que alcanzó una resistencia a la compresión del 97% de la alcanzada por el mortero convencional. Es importante destacar que la sustitución del 15% alcanzó una resistencia a la compresión del 93% de la alcanzada por el mortero convencional. Ambos porcentajes de sustitución alcanzaron resistencia a la flexión del 103% y 104% de la alcanzada por el mortero convencional, respectivamente. El tamaño de CBCA que confirió la mayor resistencia a la compresión a las muestras de mortero es el tamaño pasa tamiz #200.
- Las muestras de mortero con sustituciones de cemento por CBCA de 10%, 15% y 20% tanto con curado en ambiente como con curado en agua, tienen una resistencia mayor a 17.5 Mega pascuales. Por lo tanto morteros con sustitución de hasta un 20% de cemento por CBCA, pueden ser usados para morteros de pega para mampostería reforzada, que es la máxima especificación requerida por el reglamento Colombiano. Los morteros con sustituciones de 25% de cemento por CBCA pueden ser usados como morteros de pega para mampostería simple de tipo S, que es la segunda especificación para morteros de pega simple en Colombia. La resistencia a la flexión obtenida para muestras de mortero con sustituciones de cemento por CBCA del 10%, 15% y 20% presentan valores superiores a los obtenidos por una mezcla de mortero convencional, lo que muestra que sustituciones de cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar mejoran la resistencia a la flexión de una mezcla de mortero en sustituciones de hasta un 20%. En cuanto al tamaño de la

ceniza de bagazo de caña de azúcar es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión del mortero.

8. RECOMENDACIONES

- Debido a que las muestras de mortero con sustitución de cemento por CBCA presentan tiempos de fraguado muy superiores a los de mortero convencional, se recomienda utilizar aditivos que aceleren el tiempo de fraguado del mortero.
- Es importante que en mezclas de pasta de cemento o mortero, cuando se haga sustitución de cemento por CBCA, se mezcle previamente el cemento con la ceniza, ya que la ceniza suele quedar en el fondo y no se genera una buena interacción entre los materiales, afectando significativamente el comportamiento mecánico de la mezcla.
- Se recomienda determinar la densidad de la CBCA para confirmar que el tipo de CBCA con el que se está trabajando, tiene una densidad inferior a la del cemento portland y esto permitiría que los morteros y concretos con sustituciones de cemento por CBCA resistan igual que los materiales convencionales presentando un menor peso, lo cual es una gran ventaja para su uso como material de construcción.
- Se recomienda estudiar el comportamiento de sustitución de cemento por CBCA en mezclas de concreto.
- Para investigaciones posteriores sobre el material como sustituto del cemento tanto en mortero como en concreto, se recomienda hacer estudios de durabilidad para estudiar la variación de la resistencia ante agentes externos como agua salada, cloruros, acero de refuerzo, entre otros.
- Debido a que en el presente estudio no se logró superar la resistencia a la compresión en las muestras de mortero con sustitución de cemento por CBCA, se recomienda usar tamaños de grano de CBCA menores a 75 micras para determinar a qué valores de resistencia se logra obtener.
- El uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como sustituto parcial tanto de mortero como de concreto puede disminuir significativamente el costo de las construcciones y disminuir la contaminación que se genera en el proceso de clinkerización del cemento portland, por esta razón se recomienda incentivar la investigación de este material para reglamentar sus características y que cumpla los requerimientos para su uso en la industria de la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁGUILA, Idalberto y SOSA, Milena. Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. Venezuela. 2008. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. Vol. 23 (4).
- ALMEIDA, Fernando, *et al.* Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. Brazil. 2015. Revista construction and building materials. Vol. 82. p. 31-38.
- ALVAREZ MANTILLA, Hernando. Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Colombia. 2010. Universidad Industrial de Santander.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Especificación normalizada para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto. C 618. 2015.
- ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm y LAKE, Neal. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. Australia. 2016. Revista Construction and building materials. Vol. 128. p. 287-297.
- ASOCAÑA. El sector azucarero Colombiano en la actualidad. Documentos de interés. Colombia. Disponible en: www.asocaña.org.
- BAHURUDEEN, A, *et al.* Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers. India. 2014. Revista construction and building materials. Vol. 68. p. 465-475.
- BAHURUDEEN, A, *et al.* Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. India. 2015. Revista concrete & composites. Vol. 59. p. 77-88.
- BAHURUDEEN, A y SANTHANAM, Manu. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. India. 2015. Revista cement & concrete. Vol. 56. p. 32-45.
- BARAJAS, Carlos y OQUENDO, Diana. Estado del arte sobre la elaboración de mezclas de concreto con agregados no convencionales en américa para el periodo

2000-2010. Colombia. Universidad pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, 2011.

- CABRERA, S. y DÍAZ L. Evaluación del efecto de la adición de cenizas volantes producto de la incineración del bagazo de caña de azúcar en mezclas de concreto de bajas a medias resistencias como sustitución parcial del cemento. Caracas, Venezuela. 2010. Escuela de Ingeniería Civil.
- CAICEDO QUINAYÁS, Carlos Steven y MAURY RAMÍREZ, Aníbal Cesar. Diseño de un pavimento articulado con adoquines compuestos por reciclados de concreto como agregado fino y cenizas provenientes del bagazo de la caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento Portland. Colombia. Pontificia Universidad Javeriana, Cali. 2016.
- CAMARGO MACEDO, Pamela; PEREIRA, Adriana Maria; AKASAKI, Jorge Luis; FIORITI, Cesar Fabiano; PAYÁ, Jordi y PINHEIRO MELGES, José Luiz. Rendimiento de morteros producidos con la incorporación de ceniza de bagazo de caña de azúcar. 2014. Revista Ingeniería de construcción. Vol. 29. No. 2. p. 187-199.
- CARMONA DURÁN, Pablo. Evaluación mecánica de pastas de cemento modificadas con escoria de horno de arco eléctrico y ceniza de bagazo de caña de azúcar. México. Universidad Veracruzana. 2011.
- CHUSILP, Nuntachai; JATURAPITAKKUL, Chai y KIATTIKOMOL, Kraiwood. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. Tailandia. 2009. Revista Construction and building materials. Vol. 23. p. 3352-3358.
- CORDEIRO, Guilherme C.; Toledo, R.D., Fairbairn, E.M.R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. 2009. Revista Construction and Building Materials. Vol. 23 (10). p. 3301-3303.
- CORDEIRO, Guilherme, *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. Brazil. 2008. Revista cement and concrete composites. Vol. 30. p. 410-418.
- DURÁN HERRERA, Ninfa Piedad y VELÁSQUEZ AMADO, Norexy. Evaluación de la aptitud de concretos, reemplazando parcialmente el cemento portland por cenizas volantes y cenizas de bagazo de caña de azúcar. Colombia. 2016. Universidad Frascisto de Paula Santander, Ocaña.

- ESCALANTE GARCÍA, José Iván. Materiales alternativos al cemento pórtland. 2002. Revista Avance y perspectiva. Vol. 21. p. 79-91.
- ESPINOZA, Marlon. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. Ecuador. Universidad de Cuenca. 2015.
- FAIRBAIRN, E. M. R.; AMERICANO, B.; CORDEIRO, G. C.; THIAGO, P.; PAULA, A.; TOLEDO, R. D. y SILVOSO, M. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits. 2010. Revista Journal of Environmental. Vol. 91. No. 9. p. 1864-1871.
- FEDERACIÓN INTERAMÉRICANA DEL CEMENTO (FICEM). Informe estadístico 2013. 2013. Disponible en: www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf
- FRÍAS, M.; VILLAR, E. y SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. 2011. Revista Cement and Concrete Composites. Vol. 33 (4). p. 490-496.
- FRÍAS, M.; VILLAR, E. y VALENCIA, E. Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters. 2007. Revista Waste Management. Vol. 27 (4). p. 533-538.
- FUENTES MOLINA, Natalia; FRAGOZO TARIFA, Oscar Iván y VIZCAINO MENDOZA, Lisette. Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. 2015. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Vol. 25(2). p. 99-116.
- GANESAN, K; RAJAGOPAL, K y THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. India. 2007. Revista cement & concrete composites. Vol. 29. p. 515-524.
- GIRALDO ESCANDÓN, Camilo Ernesto, *et al.* Ceniza de bagazo de caña como aditivo al cemento Portland para la fabricación de elementos de construcción. Colombia. 2012. Acta agronómica. Vol. p. 77-78.
- GIRÓN TEGEDA, M. C. Evaluación de la posible contaminación del suelo y agua subterránea con elementos pesados por el uso de vinazas en el cultivo de la caña de azúcar. España. 2008. Universidad Politécnica de Cataluña.

- HENAO, Salomón; LIBREROS, Juan y RAMIREZ, Aníbal. Evaluación de la ceniza proveniente del bagazo de caña de azúcar como material cementante alternativo para la elaboración de morteros. Cali, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. 2015.
- HERNÁNDEZ JAÉN, Uriel. Comportamiento mecánico y físico del mortero a base de CBCA como árido en aplanados en muros. México. Universidad Veracruzana. 2011.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana. Bogotá D.C., Colombia.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Colombia. 2013.
- ISASMENDI, Cristián; PALAZZI, Silvia y ANAYA, Daniel. Mortero para mampostería sismoresistentes con aglomerantes hidráulicos y cenizas de bagazo de la caña de azúcar. Argentina. 2014. Universidad Nacional de Tucumán.
- JIMÉNEZ, V.G.; LEÓN, F.M.; MONTES, P.; GAONA, C. y CHACÓN, J.G. Influence of sugarcane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. 2013. Revista Construction and Building Materials. Vol. 40. p. 691-701.
- LOPEZ BARRIOS, Nelson y VALENCIA GUALDRON, Crystiam. Elaboración de paneles prefabricados para muros divisorios a partir de bagazo de caña de azúcar y cemento. Colombia. Universidad Industrial de Santander. 2006.
- LÓPEZ, M. y CASTRO, J. T. Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. 2010. Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 25. No. 3. p. 419-431.
- MALHOTRA, V. M.; METHA, P. K. Pozzolanitic and cementitious materials. Gordon and Breach Publishers. Ottawa, Canadá. 1996.
- MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F.; MIDDENDHORF, B.; BUDELMANN, H. y GEHRKE, M. Estudio de la reacción de hidratación de aglomerantes de cal puzolana fabricados en base a desechos de la industria azucarera. Informe resultado de trabajo de investigación. Cuba. 1997. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

- MA-TAY PINEL, Daniel. Valorización de cenizas de bagazo procedentes de Honduras: posibilidades de uso en matrices de cemento pórtland. España. Universidad Politécnica de Valencia. 2014.
- MEJÍA MARTINO, Marlon Esteban. Componentes alternativos para la producción de concreto en la construcción de vivienda ambientalmente sostenible. Colombia. 2011. Universidad EAFIT.
- MITSUUCHI TASHIMA, D. Mauro. Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vítreo (VCAS). España. Universidad Politécnica de Valencia. 2012.
- MORALES, E.V.; VILLAR, E.; FRÍAS, M.; SANTOS, S.F. y SAVASTANO, H. Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation. 2009. Revista Cement and Concrete Composites. Vol. 31 (1). p. 22-28.
- OSORIO, Jairo; VARÓN, Fredy y HERRERA, Jhonny. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. Colombia. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2007. Disponible en: www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/943/11634.
- OLIVEIRA DE PAULA, Marcos, *et al.* Ceniza de bagazo de caña de azúcar como material de sustitución parcial del cemento portland. Colombia. 2010. Revista Dyna. Vol 163. p. 47-54.
- PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; DÍAZ, L. y ORDÓÑEZ, L. M. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. 2002. Revista Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Vol. 77 (3). p. 321-325.
- PEREZ BLANCO, Jenny y RIBERO FRANCO, Raul. Evaluación de la capacidad cementante de la ceniza de caña y ceniza volante para suelos granulares limpios. Colombia. Universidad Industrial de Santander. 2008.
- POZO GARCÍA, Clara Pamela. El aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en la fabricación de bloques ecológicos para mampostería liviana. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2012. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1631>

- RAMÓN MARTÍNEZ, Alejandro. Estudio del sector cementero a nivel mundial. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2014.
- RIOS, Eduardo. El empleo de la ceniza del bagazo de la caña de azúcar como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración de concreto hidráulico. México. Universidad Veracruzana. 2011.
- ROSKOVIC, R. y BJEGOVIC, D. Role of mineral additions in reducing CO2 emission. 2005. Revista Cement and Concrete Research. Vol. 35. p. 974-978.
- RUIZ RODRÍGUEZ, Annel Jussarha. Resistencia a compresión del mortero cemento-arena incorporando ceniza de cáscara de arroz, afrecho de cebada y bagazo de caña de azúcar. Perú. 2015. Universidad Privada del Norte: Cajamarca.
- RUKZON, Sumrerng y CHINDAPRASIRT, Prinya. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. Tailandia. 2012. Revista materials and design. Vol. 34. p. 45-50.
- SALES, Almir y ARAÚJO LIMA, Sofia. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. Brazil. 2010. Departamento de Ingeniería Civil. Revista Waste Management. Vol. 30. p. 1114-1122.
- SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Tercera edición. Bogotá, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. 2001.
- SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B. y LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. 2011. Revista Journal of Environmental Management. Vol. 92. No. 10. p. 2774-2780.
- SUA-IAM, Gritsada y MAKUL, Natt. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. Tailandia. 2013. Revista Journal of cleaner production. Vol. 57. p. 308-319.
- SHAHNAZ, Phool, et al. Utilization of Bio materials as Pozzolanic material for partial replacement of Cement. Pakistán. 2016. Revista Journal of Chemistry and Materials Research. Vol. 5. p. 85-91.
- TORREZ, Rivas, *et al.* Valorización de la ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial del cemento portland. Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua. 2014. Revista científica NEXO, Vol. 27.

- TORRES AGREDO, J., *et al.* Caracterización de ceniza de bagazo de la caña de azúcar como material suplementario del cemento portland. Colombia. Revista Ingeniería e investigación. 2014. Vol. 34.
- TURANLI, L.; UZ, B. y BEKTAS, F. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. 2005. Revista Cement and Concrete Research. Vol. 35. No. 6. p. 1106-1111.
- UZAL, B. y TURANLI, L. Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. 2003. Revista Cement and Concrete Research. Vol. 33. No. 11. p. 1777-1781.
- VALENCIA, G.; MEJÍA DE GUTIERREZ, R.; BARRERA, J. y DELVASTO S. Estudio de durabilidad y corrosión en morteros armados adicionados con toba volcánica y ceniza de bagazo de caña de azúcar. Colombia. 2012. Revista de la construcción. Vol. 12. No. 22. p. 112-122.
- VIDAL, Diana; TORRES, Janneth y GONZALEZ, Luis. Ceniza de bagazo de caña para elaboración de materiales de construcción: estudio preliminar. Colombia. 2014. Revista de física. Vol. 48 E. p. 14-23.
- VIDAL Diana, TORRES Janneth, MEJÍA Ruby, GONZALES Luis. Estudio comparativo de cenizas de bagazo de caña como adición puzolánica. Revista Colombiana de Materiales. Medellín, Colombia. 2013.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados ensayo de Fluorescencia de rayos x aplicado a la ceniza de bagazo de caña de azúcar y realizado por la Universidad Nacional de Colombia.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
VICERRECTORÍA DE SEDE
DIRECCIÓN DE LABORATORIOS
LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Bogotá D.C., abril 06 de 2017

[XRF-062-17]

Señor
AMBAR LENNON BARON BELLO
Calle 186 No. 16 - 54
Teléfono: 3123934332
Bogotá - Colombia
Correo: lennonpxr@hotmail.com

Respetado Señor:

Me permito reportar el resultado semicuantitativo destructivo de una (01) muestra sólida en polvo (Ceniza gris), remitida por usted y codificada por este laboratorio como:

- XRF-5764 M- Ceniza Bagazo de Caña de Azúcar -Barón-

La muestra en polvo fue secada a 105°C por un periodo de 12 horas. Posteriormente mezclada con cera espectrométrica de la casa Merck en relación Muestra : Cera de 10:1; homogenizada por agitación, llevada a una prensa hidráulica a 120 kN por un minuto generando una pastilla prensada de 37mm de diámetro que fue medida en la aplicación SEMIQ-2016.

El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemiQ, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW - 2440 Philips (WDXRF) equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos.

La estabilidad del equipo es controlada diariamente mediante la medición de una muestra patrón.

[Página 1 de 2]
Elaboró: Wilson

Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1º, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_ceifbog@unal.edu.co

Patrimonio
de todos
los colombianos



El resultado obtenido en forma de elementos y de compuestos, se transcribe a continuación.

Universidad
Nacional
de Colombia

Nombre Elemento	Elemento y/o Compuesto	XRF-5764 M- Ceniza Bagazo de Caña de Azúcar - Barón - (% en peso)
Silicio	SiO ₂	76,57%
Aluminio	Al ₂ O ₃	9,62%
Hierro	Fe ₂ O ₃	5,07%
Calcio	CaO	2,46%
Potasio	K ₂ O	1,79%
Magnesio	MgO	1,50%
Sodio	Na ₂ O	1,10%
Fosforo	P ₂ O ₅	0,74%
Titanio	TiO ₂	0,73%
Azufre	SO ₃	0,17%
Manganeso	MnO	0,09%
Bario	Ba	0,05%
Cloro	Cl	0,03%
Estroncio	Sr	0,02%
Zirconio	Zr	0,02%
Cromo	Cr	163 ppm
Vanadio	V	160 ppm
Zinc	Zn	101 ppm
Rubidio	Rb	33 ppm
Itrio	Y	23 ppm

*Los Valores en negrilla son informativos

Nota: El resultado analítico presente, corresponde exclusivamente a la muestra recibida y no a otro material de la misma procedencia. El laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente informe. Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 30 días posteriores a la entrega de este informe. La contramuestra y los residuos de preparación serán almacenados por un periodo de 45 días. El laboratorio no se hace responsable de la disposición del material.

Nota de confidencialidad: El laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia se compromete a mantener en absoluta reserva los resultados obtenidos.

Cordialmente,


Ing. WILSON ROMERO M.
Profesional de Apoyo



[Página 2 de 2]
Elaboró: Wilson

Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1°, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_ceifbog@una.edu.co

Patrimonio
de todos
los colombianos