

**ANÁLISIS DE PROPIEDADES MECANICAS DE MATERIALES SOSTENIBLES
PARA LA CONTRUCCIONEN MORTEROS DE CEMENTOS CON ADITIVOS DE
ÓXIDOS DE BIOCHAR.**

**LUIS ALBERTO MEJIA VEGA
ANDRES RICARDO CUITIVA MADRID**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2022**

**ANÁLISIS DE PROPIEDADES MECANICAS DE MATERIALES SOSTENIBLES
PARA LA CONTRUCCIONEN MORTEROS DE CEMENTOS CON ADITIVOS DE
ÓXIDOS DE BIOCHAR.**

**LUIS ALBERTO MEJIA VEGA
ANDRES RICARDO CUITIVA MADRID**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

**Director
Diego Alejandro Camargo Trillos
Ph.D. M.Sc.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2022**

DEDICATORIA

A Dios, por la vida, por dotarme sabiduría y darme la capacidad de afrontar un nuevo reto el cual se está por culminar como una carrera universitaria para dar un paso más en este interminable camino del aprendizaje. A mis padres quienes son los que me han dado la motivación, a mi hijo, que es que me dio la fuerza de salir adelante para brindarle un mejor futuro, porque la educación comienza en casa y quien soy se lo debo a ellos. Cada logro alcanzado es por y para ustedes: Alberto del Cristo Mejía Ramos, Yasmith del Rosario Vega Vergara y Elián David Mejia Berona; los cuales son los ángeles de mi vida. A mis amigos, que fueron apoyo y compañía en cada dificultad, con quienes crecí personal y profesionalmente, e hicieron de este camino una experiencia inolvidable.

Luis Mejia

Agradezco a Dios por darme la vida y agradezco a mi madre gloria Inés Madrid Guevara por permitirme tener una educación y una formación como profesional y como persona, agradezco también a mis hermanos Gerardo Andrés Cuitiva Madrid y Carlos Daniel Cuitiva Madrid por siempre estar a mi lado y apoyarme en este largo procesos, mis amigos, que fueron apoyo y compañía en cada dificultad, con quienes crecí personal, e hicieron de este camino una experiencia para recordar toda la vida.

Andrés Ricardo Cuitiva Madrid

Agradecemos a la Universidad Pontificia Bolivariana por abrirnos las puertas y brindarnos una formación integral, por ser centro de enseñanza y darnos las herramientas necesarias para materializar este proyecto.

A nuestro director el Ingeniero Diego Camargo quien más que un director fue nuestro compañero, trabajando constantemente en equipo y brindándonos sus experiencias y conocimientos.

De manera especial queremos agradecer al laboratorista Fabio Enrique Hoyos Romero quien siempre estuvo dispuesto a colaborarnos en la elaboración de las probetas y ensayos de laboratorio compartiendo su conocimiento y experiencia.

De manera especial queremos agradecer al laboratorista Fabio Enrique Hoyos Romero quien siempre estuvo dispuesto a colaborarnos en la elaboración de las probetas y ensayos de laboratorio compartiendo su conocimiento y experiencia.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo general..... 16
1.1.2	Objetivos específicos..... 16
2. MARCO TEORICO	17
2.2 Morteros 17
2.3 Cemento portland 17
2.4 Materiales puzolánicos 18
2.5 Curado de morteros 19
2.6 Propiedades mecánicas de los morteros 19
2.6.1 Resistencia a la compresión	19
2.6.2 El módulo de ruptura a flexión	20
2.7 Óxidos de Biochar 20
3. ESTADO DEL ARTE	21
3.1 Antecedentes Internacionales 21
3.2 Antecedentes Nacionales 26
3.3 Antecedentes Regionales 32
4. METODOLOGIA	36
4.1 Etapa 1	38
4.1.1 formulación de morteros	38
4.2 Etapa 2 – adaptación de la máquina universal de ensayos	38

4.3 Etapa 3 – medición de propiedades mecánicas	38
4.4 Etapa 4 – análisis de propiedades mecánicas de formulación óptima de morteros con la adición de óxidos biogénicos.	39
4.4.1 Preparación de los dos tipos de óxidos para la formulación de morteros.	39
4.5 Formulación de morteros.....	40
4.8.1 Especificaciones técnicas de equipos utilizados.	42
4.5.1 Diseño de molde	43
4.6 Fundición de probetas.....	44
4.6.1Curado de probetas en agua destilada.....	45
4.6.2Caracterización de probetas.....	45
4.6.3 Montaje de método	46
4.6.4 Módulo de ruptura a flexión	47
4.6.5caracterización de materiales.....	48
Arena Ottawa c778	48
4.6.6Características físicas y químicas de los óxidos y cemento.	48
5. RESULTADOS GENERALES	50
5.1 Formulación de morteros.....	50
5.2Análisis de propiedades mecánicas.....	53
5.3Resistencia a compresión de patrones.....	56
5.4Módulo de ruptura	57
5.5Resultados del módulo de ruptura de óxidos tipo C.....	60
5.5.1Resultados óxidos tipo AAA(OT-AAA)	62
5.5.2Resultados del módulo de ruptura de óxidos tipo AAA	63

5.5.3	Comparación de óxidos y patrones.	64
5.5.4	Comparación de óxidos AAA y óxidos tipo C a compresión.	65
5.5.6	Comparación de óxidos tipo AAA y óxidos tipo C en módulo de ruptura	65
5.6	comparación de óxidos y patrones.	66
5.6.1	Resistencia a compresión de óxidos tipo C, óxidos tipo AAA y patrón.	66
5.6.2	Módulo de ruptura de óxidos tipo C, óxidos tipo AAA y patrón.	67
6	CONCLUSIONES.	69
7	TRABAJOS FUTUROS	70
8	BIBLIOGRAFIA.	71
9	ANEXO - ARTICULO	

TABLAS DE FIGURAS

Figura 1. Resistencia a la compresión del hormigón Fuente: (Bheel et al., 2019)	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Fuente: Cáceres y Quispe, (2018)	25
Figura 3. Esfuerzo vs Días de fraguado Fuente: (Wilson Javier et al., 2019).....	30
Figura 4. Fuente: (Angulo & Viera, 2019).....	34
Figura 5. Fuente: elaboración propia, 2022.....	37
Figura 6. curvas de óxidos tipo C a 90 días (a) compresión y (b) flexión	55
Figura 7. Curvas de óxidos tipo AAA a 90 días (a) compresión y (b) flexión.....	56
Figura 8. Resistencia a compresión de patrones a 90 días de curado.....	57
Figura 9. Módulo de ruptura de patrones para diferentes días de curado.....	58
Figura 10. Resultados de resistencia compresión de óxidos tipo C	60
Figura 11. Módulo de ruptura de óxidos tipo C a diferentes días de curado y su desviación promedio.	61
Figura 12. Resistencias a compresión de óxidos AAA y su desviación estándar..	63
Figura 13. Módulo de ruptura de óxidos AAA y su desviación promedio	64
Figura 14. Comparación de óxidos tipo AAA y óxidos tipo C a diferentes días de curados, con sus desviaciones promedios.....	65
Figura 15. Módulos de ruptura de óxidos AAA y óxidos tipo C a diferentes días de curados, con sus desviaciones promedio.....	66
Figura 16. Comparación de óxidos y patrones sometidos a compresión.	67
Figura 17. Comparación de óxidos y patrones sometidos a flexión.	68

ILUSTRACIONES

Ilustración 1 óxido tipo C	39
Ilustración 2 Mufla	40
Ilustración 3 Molido de oxido	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 4 Arena Ottawa	41
Ilustración 5 Cemento Portland	41
Ilustración 6 Probeta de medición de agua	41
Ilustración 7 Oxido tipo C	42
Ilustración 8 Diseño de molde	44
Ilustración 9 Compactador	44
Ilustración 10 curado de muestra	45
Ilustración 11 Muestra a compresión.....	45
Ilustración 12 Muestra a flexión.....	46
Ilustración 13 montaje a compresión.....	52

ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de resistencia a compresión 46

Ecuación 2. Ecuación de resistencia a flexión..... 47

TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. <i>Compuestos utilizados en la elaboración del cemento portland.</i>	18
Tabla 2. Fuente: (Rodríguez Sanches & Tibabuzo Jiménez, 2019)	29
Tabla 3. Fuente: (Angulo & Viera, 2019)	33
Tabla 4. Preparación de los óxidos para formulación de morteros.....	40
Tabla 5. Materiales utilizados para la formulación de probetas con los dos tipos de óxidos.....	42
Tabla 6. Especificaciones técnicas maquina universal.....	43
Tabla 7. Especificaciones técnicas de la mufla.	43
Tabla 8. Diseño de molde nuevo para ensayos a flexión y Compactador de probetas	44
Tabla 9. Medidas y normas de probetas evaluadas.	46
Tabla 10. Composición Química de la Arena Ottawa.....	48
Tabla 11. Relación agua /cemento y oxido / cemento optimizadas.....	51
Tabla 12. Numero de probetas ensayadas por día para cada tipo de patrón y de tipos de óxidos.	53
Tabla 13. Resultados del módulo de ruptura de patrones.....	59
Tabla 14. Resultados a compresión óxidos tipo C, a diferentes días de curados.	59
Tabla 15. resultados del módulo de ruptura a flexión para diferentes días de curado.	61
Tabla 16. Resistencia a compresión del óxido AAA a diferentes días de curados.....	62
Tabla 17. módulo de ruptura del óxido AAA a diferentes días de curado.....	64

RESUMEN

Para la formulación de morteros sostenibles, es prioritario realizar evaluación de materiales ya sean, completamente nuevos o mixtos, con el fin de encontrar si pueden cumplir las mismas funciones mecánicas para, la industria de la construcción y demás áreas de una economía global, con un menor impacto ambiental local e internacional. Los materiales biogénicos como biochar y óxidos han tomado un mayor interés en los últimos años, ya que son subproductos de fuentes renovables como la biomasa. En este trabajo, se evaluó el efecto de la sustitución de cemento con óxido de biochar sobre la resistencia a la compresión y flexión de morteros. Para la evaluación de propiedades mecánicas, se adaptó el método en la maquina universal de ensayos MTS exceed modelo E45 a partir de las normas Sociedad Americana para técnica y materiales ASTM C109, la cual, fue aprobada en el año 2014, para resistencia a la compresión y C78 para la resistencia a flexión. Se realizaron diferentes seguimientos a la maquina universal de ensayo, para llegar a los parámetros requeridos por las normas que consta de realizar pruebas a flexión y así observar el módulo de elasticidad del material. Tres muestras de mortero fueron evaluadas, una muestra patrón sin sustitución de cemento y dos muestras con adición de óxidos de biochar de un con un 25%, las resistencias a compresión y flexión fueron evaluadas a tres tiempos de curado, 7, 28 y 90 días, con análisis mecánico por triplicado. En las probetas de patrón a compresión se obtuvo carga promedio de 53.93 Mpa, posteriormente se realizaron los ensayos de los patrones a flexión de los cuales se obtuvieron una carga promedio de 2.205 Mpa.

Palabras clave:

morteros, cemento, biochar, propiedades mecánicas, sostén

Abstract

For the formulation of sustainable mortars, it is a priority to evaluate materials, whether completely new or mixed, in order to find out if they can fulfill the same mechanical functions for the construction industry and other areas of a global economy, with less impact. local and international environmental Biogenic materials such as biochar and oxides have gained increased interest in recent years, since they are by-products of renewable sources such as biomass. In this work, the effect of replacing cement with biochar oxide on the compressive and flexural strength of mortars was evaluated. For the evaluation of mechanical properties, the method was adapted in the MTS exceed model E45 universal testing machine based on the ASTM C109 standards for compressive strength and C78 for flexural strength. The respective calibration of the machine was carried out according to the parameters required by the standards. Three mortar samples were evaluated, a standard sample without cement substitution and two samples with the addition of 25% biochar oxides. The compressive and flexural strengths were evaluated at three curing times, 7, 28 and 90 days. With mechanical analysis in triplicate. In the compression pattern specimens, an average load of 53.93 Mpa was obtained, later the flexural pattern tests were carried out, from which an average load of 2.205 Mpa was obtained

1. INTRODUCCIÓN

Son muchos los países en el mundo que, a través de los años, han venido realizando estudios e investigaciones enfocados en la búsqueda de nuevos materiales, que se conviertan en potenciales alternativas para mitigar el impacto ambiental generado por las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y, en el reemplazo de materias primas agotadas paulatinamente por la imparable explotación de los recursos naturales, y el crecimiento exponencial de las ciudades alrededor del mundo. Colombia no es la excepción, y hace algunos años ha estado acreditando proyectos encaminados en el desarrollo y aplicabilidad de nuevos materiales, que puedan cambiar el modo de vida de las personas.

Ahora bien, el cemento ha sido el elemento conglomerante más utilizado en la fabricación de morteros y concretos para los procesos de construcción; su fabricación se ha considerado, una de las industrias con un alto nivel de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial, con un 5% a 7% de emisiones globales (Traversa et al., 2013); además de su alto costo, gasto elevado de energía, agotamiento de los recursos naturales y su difícil reciclamiento (Khan et al., 2017).

Por otra parte, una de las problemáticas de gran interés que se presenta a nivel global, es la disposición y el manejo inadecuado de los residuos producidos por las actividades agroindustriales. La producción de arroz es considerada como una de las actividades agrícolas más importante del mundo, y la industria que genera los más altos volúmenes de residuos, siendo la cascarilla un 20% (aproximadamente) del total de la producción de arroz (Bernal Vargas & Carvajal Cano, 2019).

Para el 2020, Colombia hizo parte de los cinco principales productores de arroz en el continente americano, ocupando el cuarto puesto con un volumen del 7,8% de la producción de 37,6 millones de toneladas (Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ) y Fondo Nacional del Arroz (FNA), 2021). A nivel regional, Córdoba posee varias zonas productoras de arroz, siendo el corregimiento de La Doctrina en Loricá, una de las más productivas de la región con una siembra aproximada de 828 hectáreas (ha) con un promedio de 5,1 ton/ha (FEDEARROZ, 2021)

La Pirolisis es el proceso que se utiliza para convertir la biomasa en combustibles alternativos, como: bioaceites, biocarbón y gases; mediante su calentamiento a temperaturas de 350°C a 650°C. Este proceso termoquímico, ha sido estudiado por muchos años, debido a su potencial y prometedor uso en la generación de material alternativo para la generación de energías renovables; además, de aportar al cuidado del medio ambiente (Urien Pinedo, 2013).

En concordancia con lo expuesto, esta investigación enfoca su atención en la evaluación de una nueva alternativa que permita la sustitución parcial del cemento, por material sostenible con similares propiedades mecánicas y que pueda ser usado en la aplicación de morteros resistentes y al mismo tiempo, ofrezca beneficios al cuidado del medio ambiente. Se presenta, entonces, la oportunidad de utilizar un compuesto obtenido del proceso de pirolisis de la cascarilla de arroz y a su vez, del colado de la ceniza producida de ese proceso termoquímico (Óxido de Biochar); además, de estudiar su comportamiento mecánico luego de ser mezclado con cemento, agua y arena para la fabricación de morteros.

En este contexto, el buen uso de este material en las obras civiles puede generar una disminución tanto, en la contaminación del medio ambiente al tratar con

responsabilidad los residuos sólidos agroindustriales, como las emisiones de CO₂ en la fabricación de cemento. Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar las propiedades mecánicas de morteros fabricados con adición de óxido de Biochar, permitiendo obtener información que visualice la viabilidad de utilizar en la construcción, un aditivo natural sostenible que se encuentra en muchas zonas del país.

2. OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades mecánicas de morteros formulados con sustitución de cemento por agente puzolánico biogénicos.

2.1.2 Objetivos específicos

Implementar una metodología de análisis de propiedades mecánicas resistencia compresión y módulo de ruptura de morteros en maquina Universal Universal MTS 300 KN según normas internacionales de la norma ISO7500-1 del año2007.

Desarrollar un diseño experimental para la evaluar el efecto de la sustitución de cemento por óxidos biogénicos, el tipo de óxido y la relación/agua cemento en la formulación de morteros.

Evaluar las propiedades mecánicas resistencia compresión y módulo de ruptura de la formulación de mortero con la sustitución de los óxidos biogénicos.

3. MARCO TEORICO

En esta sección, se abordarán conceptos y definiciones que serán de uso recurrente durante el desarrollo de la presente investigación; tales como, características de los morteros y concretos, propiedades mecánicas, materiales puzolánicos, resistencia a la compresión, y flexión, módulo de ruptura y oxido de biochar.

3.2 Morteros

El mortero es la mezcla de diferentes componentes como el agua, cemento y arena, que sirve como aglutinante para darle rigidez a las estructuras de uso en la mampostería, tales como pañetes, pegas y rellenos, cumpliendo así una función estructural. (Salamanca-Correa, 2001)

3.3 Cemento portland

Son cementos hidráulicos compuestos principalmente silicatos de calcio hidráulicos, estos se fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. El Clinker, la materia prima para producir cemento, se alimenta a los molinos de cemento junto con mineral de yeso, el cual actúa como regulador de fraguado. La molienda conjunta de estos materiales produce el cemento. Debido a su semejanza con una caliza natural que se explotaba en la isla portland, Inglaterra, se denominó cemento portland.

Compuesto	Formula	Limites aproximados (%)
Óxido de calcio "Cal"	CaO	60 a 67
Dióxido de sílice "Sílice"	SiO ₂	17 a 25
Óxido de aluminio "Alúmina"	Al ₂ O ₃	3 a 8
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	0.5 a 6
Óxido de magnesio	MgO	0.5 a 4
Alcalis	Na ₂ O, K ₂ O	0.3 a 1.2
Trióxido de azufre	SO ₃	2 a 3.5

Tabla1. *Compuestos utilizados en la elaboración del cemento portland.*

Tomado del concreto fundamentos y nuevas tecnologías (Matallana, 2019).

3.4 Materiales puzolánicos

Los materiales puzolánicos son considerados silíceos o silíceos y aluminosos que en sí mismos poseen poco valor cementante, al ser separados finamente y mezclados con materiales cementantes en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar compuestos que posean características cementantes (ASTM C125).

Los materiales puzolánicos pueden ser tipos naturales o artificiales según la fuente de donde sean extraídos. Los materiales puzolánicos naturales no necesitan de tratamientos especiales para desarrollar las características que propician su uso como material cementante, se encuentran principalmente en materiales con origen volcánico. Por otro lado, los materiales puzolánicos artificiales se obtienen como productos de actividades industriales y agrícolas, como subproductos de procesos,

se destacan las cenizas volantes, las escorias de alto horno y las cenizas de cáscara de arroz. (Páez-Zuleta & Vélez-Vieira, 2019)

3.5 Curado de morteros

El curado de morteros es un proceso que ayuda a mantener condiciones de humedad y temperatura, para que continúe el proceso de hidratación del cemento, de esta forma el mortero adquiera las resistencias requeridas. Los métodos de curado se basan en mantener el agua de mezclado o reducir la pérdida de agua, entre las técnicas más utilizadas se encuentran la inmersión y el rociado. (Páez-Zuleta & Vélez-Vieira, 2019)

3.6 Propiedades mecánicas de los morteros

Cuando el mortero alcanza el estado de endurecimiento, presenta una serie de características y propiedades adquiridas durante procesos fisicoquímicos, que se dan durante la mezcla, fundición y curado; las cuales, se desarrollan con el tiempo, hasta determinadas edades de curación. Entre estas propiedades se encuentran las propiedades mecánicas, térmicas y químicas. El concreto presenta una alta resistencia a los esfuerzos de compresión y muy poca a los de tracción, razón por la cual, la resistencia a la compresión simple es la propiedad a la que se le da mayor importancia (Borja Quintanilla & Rea Castillo, 2015).

3.6.1 Resistencia a la compresión

Esta es la capacidad del concreto, para soportar cargas de compresión axial por unidad de área y se expresa en unidades de fuerza, comúnmente utilizadas como Mpa, psi o kg/cm². La resistencia a la compresión del hormigón convencional se evalúa principalmente después de 28 días (resistencia de diseño), pero puede evaluar en otros momentos (Páez-Zuleta & Vélez-Vieira, 2019)

Los siguientes factores afectan la resistencia del concreto: relación agua-cemento (A/C), tipo de cemento, agregado (grano, textura y tamaño máximo), tiempo de curado, edad del concreto y resistencia.

3.6.2 El módulo de ruptura a flexión

Generalmente especificado de acuerdo con la norma ASTM C78, la cual fue aprobada en el año 2014. Este método se utiliza, para determinar la resistencia a la flexión del hormigón con vigas individuales cargadas en el medio. El valor de la resistencia a la flexión es útil en el cálculo y diseño de losas de pavimento.

3.7 Óxidos de Biochar

La pirolisis es un controlado de biomasa a alta temperatura produce un material poroso sólido, con una composición mineral definida con un alto contenido de carbono. Este material se denomina, biocarbón y sus principales propiedades son un alto valor de área superficial y un gran volumen de poros, que depende de la temperatura y la composición de la materia prima de pirolisis. Además de estas propiedades, el biocarbón tiene una alta eficiencia de intercambio catiónico,

lo que le permite retener agua, nutrientes y bacterias durante mucho tiempo (Gul et al., 2015).

4. ESTADO DEL ARTE

El óxido de Biochar, es un subproducto de la conversión termoquímica de la biomasa sólida residual. A través de los años, se han venido realizando estudios a nivel global, acerca de su potencial participación en el ámbito de la construcción. Por consiguiente, es de sumo interés, citar algunas de las investigaciones relacionados con el objeto de este trabajo; las cuales fueron organizadas de la siguiente manera:

4.1 Antecedentes Internacionales

La primera investigación referenciada internacionalmente se titula, *effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary portland cement on pervious concrete* (efecto de la ceniza de carbón y ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento portland ordinario en el concreto permeable), apoyado por la universidad nacional de Taiwán y el ministerio de ciencia y tecnología, China (2021).(Lo et al., 2021). Los autores estudiaron, la forma de reutilizar los tipos de cenizas producidas de la conversión térmica del carbón y de la cascarilla de arroz, en reemplazo parcial del cemento Portland ordinario para la elaboración de concreto permeable. El propósito de este estudio fue analizar el comportamiento físico y químico de la reutilización de las cenizas a temperaturas

de sinterización, por sustitución parcial simple (ceniza de cascarilla de arroz (CCA) o cenizas producidas del carbón (CC)) y compuesta (mezcla de CC y CCA), del cemento Portland ordinario.

Para la metodología, se sinterizaron o compactaron, muestras simples de CCA a temperaturas de 550°C y 900°C; mientras que las muestras compuestas de las otras cenizas se sinterizaron a 1100°C. Las muestras contenían el 30% de ceniza del volumen total. Las pruebas arrojaron un efecto sinérgico en cuanto a la resistencia a la compresión de la sustitución compuesta y del reemplazo parcial simple de CCA, de las cuales se obtuvieron mayores resistencias a la compresión que el grupo de referencia. La permeabilidad al agua estuvo oscilando entre 0,101 y 0.313 cm/seg y las concentraciones de partículas de metal liberadas estuvieron conforme a los estándares requeridos en Taiwán.

La segunda investigación internacional lleva como título, Cuantificación de la resistencia mecánica de morteros de cemento al añadir cenizas de cascara de arroz ricas en nano partículas de sílice, desarrollada por la Universidad Nacional de Formosa y la Universidad de Buenos Aires, Argentina (2019). Los autores (Orrabalis et al., 2019) ,hicieron referencia en la preparación de morteros de cemento a partir de la utilización de cascarilla de arroz y ceniza con altos niveles de dióxido de silicio (SiO_2). El objetivo de esta investigación radicó en el análisis de la composición estructural de los materiales ya mencionados, así como el comportamiento de las propiedades mecánicas de los morteros fabricados bajo su influencia.

La metodología propuesta hace referencia a la fabricación de morteros de concreto utilizando adiciones de cascarilla de arroz lavada con agua destilada, ceniza lavada con ácido clorhídrico (HCL) hasta obtener un pH neutro y, ceniza cruda. Como resultado, se obtienen morteros de cemento de menor densidad con relación al concreto normal y, con una resistencia aceptable en aplicaciones de baja resistencia a la compresión. También se pudo apreciar, que la dosificación empleada con ceniza tratada con HCL, obtuvo mejores resultados tanto en la densidad, como en la resistencia a la compresión.

El tercer estudio internacional referenciado, se titula Use of rice husk ash as cementitious material in concrete (Uso de ceniza de cascarilla de arroz como material cementoso en concreto), desarrollada en la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Mehran, Pakistán (2019). (Bheel et al., 2019) con la intención de reducir el costo en la elaboración de concreto, desarrollaron esta investigación con el propósito de evaluar la posibilidad de sustituir parcialmente, el cemento por la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), en la elaboración de concreto; determinando la fluidez de la mezcla fresca y las propiedades mecánicas de la muestra endurecida.

Para llevar a cabo la investigación, se elaboraron 90 muestras (45 cubos y 45 cilíndricas) con dosificación de CCA al 0%, 5%, 10%, 15% y 20% en peso; las cuales fueron curadas en 7, 14 y 28 días, con el fin de que adquirieran una resistencia de 28 N/mm². Las muestras de concreto fueron probadas finalmente, en una máquina de prueba universal. Los resultados encontrados, mostraron que la fluidez disminuye a medida que aumenta la dosificación de CCA. De igual manera, se

observó un aumento de 11.8% de la resistencia a la compresión (ver figura 1) y un 7.31% de resistencia a la tracción; con una dosis en la muestra del 10% de CCA y un curado de 28 días.

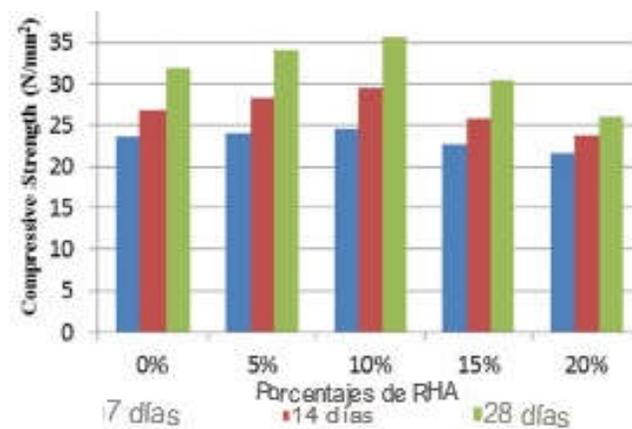


figura 1. Resistencia a la compresión del

hormigón Fuente: (Bheel et al., 2019)

Otra investigación internacional con interesante evidencia, se titula *Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento*, avalada y desarrollada por la Universidad del Altiplano de Puno, Perú (2018). (Huaquisto Cáceres & Belizario Quispe, 2018) utilizaron la ceniza volante (CV) que resultaba del tratamiento térmico del carbón para la generación de electricidad, la cual fue adicionada al cemento como mezcla para la elaboración de concreto empleado en diferentes construcciones. La idea de los investigadores era encontrar una dosificación para la mezcla de cemento y ceniza volante, con la cual no se disminuyera la resistencia del concreto y aportara a la mitigación del impacto ambiental.

Para la metodología, se fabricaron piezas de concreto normal, mezclado con ceniza volante al 2.5%, 5.0%, 10% y 15% de adición; con un seguimiento de 7, 14, 28 y 90 días. Con los resultados obtenidos concluyeron, que la sustitución de cemento por cenizas volantes debe ser menor al 10%, ya que, al aumentar la dosificación, la resistencia del concreto disminuye, como se muestra en la figura 2. Esta investigación fue referenciada con el propósito, de observar el comportamiento de otros materiales con alto contenido de sílice, similares a la ceniza de cascarilla de arroz.

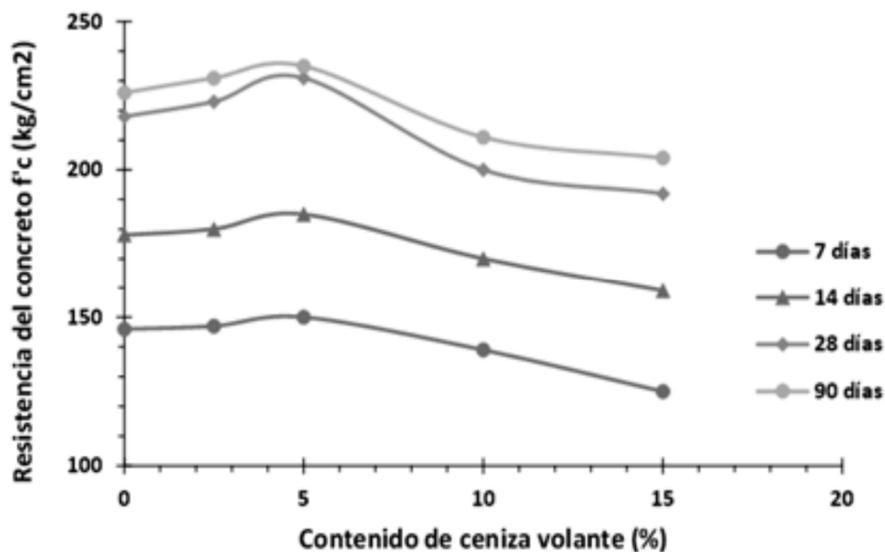


Figura 1. Fuente: Cáceres y Quispe, (2018)

De igual manera, se tiene referenciado un quinto estudio internacional, el cual se titula *Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry (Uso suplementario de ceniza de cáscara de arroz (CCA) como material cementoso en la industria del hormigón)*, de la Universidad Estatal de Arkansas, Estados Unidos (2018). (Ahsan & Hossain, 2018) al ver la disminución de

ceniza volante producida en las plantas de carbón de Arkansas, enfocaron su atención en la utilización de CCA, como material de sustitución parcial del cemento Portland; una alternativa de mejora de las propiedades mecánicas del concreto, por su alto contenido de sílice.

La metodología usada por los autores fue comparar los análisis de propiedades mecánicas de la CCA, con dosis similares de cenizas volantes clase C (CFA) de la industria local. La dosificación empleada fue del 10% y 20% en peso de cemento Portland ordinario ASTM tipo I, en tamaños de 44, 150 y 600 μm . Las pruebas se realizaron con el fin de determinar las propiedades de la mezcla fresca de concreto y las condiciones mecánicas del hormigón endurecido. Se utilizó el método ANOVA para visualizar las diferencias de las pruebas realizadas a los dos materiales sustitutos. Los mejores resultados se dieron en las muestras más finas y en la dosis de 10%, tanto para las CFA, como para las CCA.

Son innumerables las investigaciones a nivel mundial relacionadas con el estudio de las propiedades mecánicas, realizados en muestras de morteros y concretos elaborados con dosificaciones de cenizas de cascarilla de arroz, como material de sustitución o de reemplazo parcial del cemento; todos ellos, con conclusiones similares, en las cuales concuerdan que los mejores resultados se obtienen con dosis pequeñas de cenizas de cascarilla de arroz y granulometría fina.

4.2 Antecedentes Nacionales

A nivel nacional, se encontró la monografía investigativa titulada, *Evaluación de la resistencia del concreto con reemplazo del agregado fino por ceniza de cascarilla de arroz*, desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Piloto de Colombia en Girardot, Colombia (2019). Algunas investigaciones se han enfocado en la búsqueda de nuevos elementos o materiales, que ayuden a mejorar las propiedades físico-mecánicas del concreto hidráulico para aplicación en pavimento rígido. (Devia & Valencia, 2019). Evaluaron el efecto que tendría el sustituir el agregado fino del concreto (arena), por ceniza de cascarilla de arroz (CCA); midiendo la resistencia de 6 vigas, con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días.

Para la realización de esta investigación, se desarrolló una metodología experimental en la que se compararon los resultados obtenidos de pruebas realizadas a 6 vigas de concreto, 3 sin sustitución del agregado fino como elemento de control y, 3 con un reemplazo del 20% por CCA obtenida de un proceso térmico a 500°C en un horno de barro con su respectivo tamizado; con un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días; respectivamente. Al analizar las pruebas realizadas a las 6 vigas, los autores concluyeron que no hay viabilidad en la sustitución del 20% del agregado fino por CCA; debido a que las propiedades evaluadas, no cumplieron con las expectativas de mejorar la resistencia del concreto hidráulico.

Un segundo antecedente a nivel nacional, se tiene el proyecto de investigación titulado *Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico*, de la Universidad Santo Tomás en Villavicencio, Colombia (2019). (Rodríguez Sánchez & Tibabuzo Jiménez, 2019) para la realización de

su trabajo, plantearon la posibilidad de usar ceniza de cascarilla de arroz (CCA), producido en las industrias arroceras de los Llanos Orientales, como reemplazo de una porción del cemento usado en la preparación de mezclas de concreto hidráulico; con el fin de evaluar algunas de sus propiedades físicas y mecánicas.

La metodología se basó, en la realización de ensayos experimentales realizados a muestras con diferentes tiempos de curado (7, 14 y 28 días), con el fin de analizar y comparar el comportamiento físico-mecánico del concreto hidráulico en condiciones normales y con porcentajes suplementados de CCA del 3%, 5%, 10% y 15%. Los análisis realizados por las investigadoras muestran unos resultados satisfactorios para los 3 tiempos de curado probados, donde la muestra con reemplazo del 10% por CCA, supera la resistencia de la muestra de control. Las otras dosificaciones de reemplazo mostraron resistencias por debajo del valor de referencia, siendo la del 15% la de menor comportamiento por su capacidad de absorción de agua; tal como se muestra en la tabla 2.

Descripción de la muestra	Días de curado	Resistencia promedio	
		PSI	Mpa
Diseño de mezcla sin ceniza	7	1857	13,0
	14	2488	15,9
	28	3074	21,5
Diseño de mezcla con 3% de ceniza	7	1268	8,9
	14	1852	12,9
	28	2932	20,5
Diseño de mezcla con 5% de ceniza	7	1066	7,5
	14	1930	13,5
	28	2972	20,8
Diseño de mezcla con 10% de ceniza	7	2000	14
	14	2537	17,7
	28	3286	23
Diseño de mezcla con 15% de ceniza	7	766	5,4
	14	1700	11,9
	28	1957	13,7

Tabla 2. Fuente: (Rodríguez Sánchez & Tibabuzo Jiménez, 2019)

Como tercer antecedente nacional, se referencia un artículo titulado Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de cubos de mortero utilizando cenizas de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento, desarrollado por el semillero de investigación Guadua y Bahareque de la Universidad Sur colombiana en el Huila, Colombia (2019). Para esta investigación, (Wilson Javier et al., 2019) usaron la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), producida en la incineración de residuos obtenidos de la industria arrocera Roa, Flor Huila, como sustituto parcial del cemento en la elaboración de morteros cúbicos, con el propósito de evaluar el cambio en las propiedades físicas y mecánicas que se puedan presentar.

El desarrollo de la metodología se dividió en 2 fases, la caracterización física de la CCA junto con otros agregados (arena) y, la realización de pruebas de esfuerzo a compresión a los cubos de morteros fundidos; con porcentaje de CCA del 10%, 15%, 20% y 25%, en tiempos de fraguado de 7, 14 y 25 días. De los resultados

obtenidos, se hallaron esfuerzos por debajo del valor de diseño (21 Mpa), siendo la mezcla con el 10% de CCA la que más se acercó, con un valor de 11.38 Mpa en un tiempo de fraguado de 28 días; como se muestra en la figura 3. Los investigadores concluyeron, que el uso de CCA como reemplazo parcial de cemento, no tiene viabilidad en proyectos estructurales; sin embargo, por su baja densidad, es aplicable en obras civiles livianas.

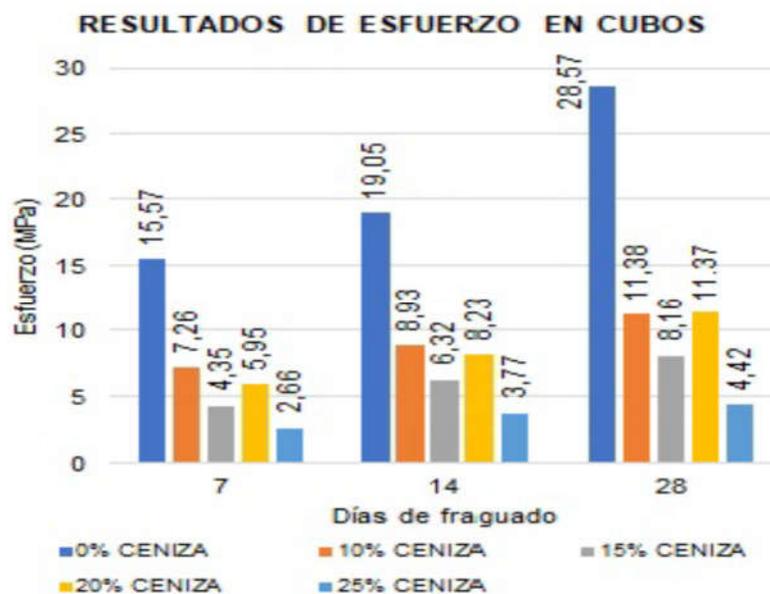


Figura 2. Esfuerzo vs Días de fraguado Fuente: (Wilson Javier et al., 2019)

La siguiente investigación, lleva como título, Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla de arroz, financiada por la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en Bogotá, Colombia (2017). Debido al alto nivel de contaminación derivado de la producción de cemento, Camargo e Higuera (2017), proponen analizar las propiedades mecánicas y físico químicas de prototipos de concreto hidráulico mezclado con ceniza de cascarilla de arroz; esto, con el ideal de encontrar un

material con propiedades mecánicas similares a las del concreto hidráulico usado en pavimento rígido.

Para este proyecto, se desarrollaron ensayos para determinar el comportamiento de las características del concreto hidráulico, al sustituir el cemento por el 5%, 15% y 30% de CCA; teniendo como referencias de control, la norma para ensayos de concretos hidráulicos para pavimentos de INVIAS 2013. De la caracterización realizada, se pudo verificar el alto contenido de sílice en la CCA y su granulometría, tanto fina como gruesa, cumplen con los parámetros requeridos. En cuanto a la resistencia a la compresión, se determinó que la muestra con porcentaje de sustitución del 5% y tiempo de curado de 28 días, obtuvo una resistencia similar a la muestra de control y 0.7 Mpa por encima de la resistencia de diseño. Las muestras con porcentajes de mayor sustitución presentaron valores por debajo de la resistencia de control y de diseño, por lo que no es viable su utilización para la aplicación estudiada.

De igual manera se referencia el estudio titulado, *La ceniza de cascarilla de arroz y su efecto en adhesivos tipo mortero*, llevado a cabo en la Universidad Libre de Bogotá (2016). Novoa, Becerra y Vásquez (2016), analizan el alto contenido de sílice en la composición de la cascarilla de arroz y, enfocan su estudio en la caracterización de la ceniza producida del proceso de conversión termoquímica de este residuo sólido, como aditivo para la fabricación de morteros en la instalación de baldosas cerámicas. Se analizan entonces, las propiedades fisicoquímicas del

conglomerado y las propiedades mecánicas de fluidez y resistencia a la tracción de los morteros.

La investigación fue realizada en dos fases, la ejecución de pruebas físicas y químicas para la búsqueda de las características de la ceniza obtenida de la cascarilla de arroz, y la determinación de la absorción de agua en la arena y baldosas utilizadas. En la siguiente fase, se preparan las muestras para realizar los ensayos mecánicos de adherencia para 10 minutos. Al llevar a cabo la metodología propuesta y el análisis de los resultados obtenidos, se observa que las muestras de los morteros que utilizaron ceniza de cascarilla de arroz en su fabricación tuvieron mejores resultados en las propiedades mecánicas; sin embargo, ese aumento en la resistencia a la atracción, resultó menor al compararlo con el de referencia, excepto la muestra M5 que obtuvo resultados similares. En la caracterización de los materiales, se obtuvo que la ceniza de la cascarilla de arroz es menos densa, por lo que las muestras de morteros son las ligeras.

4.3 Antecedentes Regionales.

El primer estudio regional referenciado, se titula *Evaluación del efecto de la ceniza de cascarilla de arroz en la resistencia a la compresión de concretos simples*, trabajo de grado desarrollado en la Universidad de Córdoba en Montería, Colombia (2019).

Angulo y Viera (2019), aprovecharon la ceniza generada en la incineración (a 760°C) de cascarilla de arroz de una industria arrocera de la zona, para sustituir una parte del volumen de cemento tipo I y, evaluar los cambios en la resistencia a la compresión del concreto simple resultante de la mezcla.

Para el desarrollo de la investigación, se realizaron pruebas de laboratorio y ensayos mecánicos, con el fin de determinar la caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), la densidad de las muestras (Ver tabla 3) y la resistencia a la compresión del concreto simple, elaborado con porcentajes de CCA del 10%, 20% y 30%; con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días. En la caracterización de la CCA, se determinó un 89.20% de óxido de sílice, 25.4% de sílice amorfa y un tamaño de 155.28 μm máximo de la partícula. En cuanto a la resistencia a la compresión, los valores obtenidos en las muestras de control fueron similares a los de diseño (17.23 Mpa). Las muestras con porcentajes de adición de CCA dieron medidas muy por debajo del valor de diseño, siendo la de 10% la que más se acercó; tal como se muestra en la figura 3.

Muestra	Densidad teórica (gr/cm^3)	Densidad obtenida (gr/cm^3)	Fuente bibliográfica
1	2.06	X	Mehta (1992)
2	2.10	X	Bui et al. (2005)
3	2.15	X	Pedro E. (2015)
4	X	2.11	Autores (2019)

Tabla 3. Fuente: (Angulo & Viera, 2019)

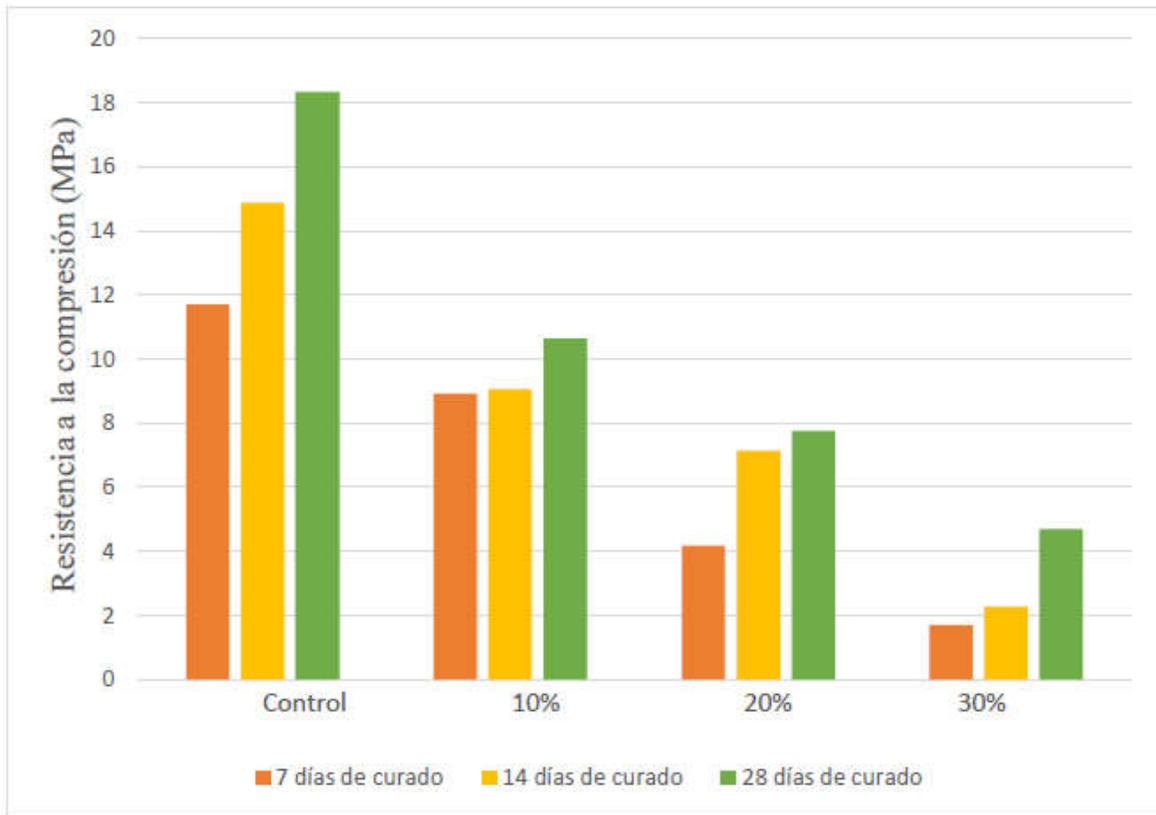


Figura 3. Fuente: (Angulo & Viera, 2019)

Otra investigación a nivel regional, se titula Análisis de la influencia de los óxidos de Biochar de cascarilla de arroz obtenidos por oxidación y gasificación de biomasa como agentes puzolánicos en la formulación de morteros y concretos hidráulicos, inscrita en la línea de investigación de Materiales de Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería, Colombia (2019). Los autores (Páez-Zuleta & Vélez-Vieira, 2019) proponen el uso de óxido de Biochar (OB) de cascarilla de arroz, como reemplazo de una parte del cemento Portland, en la elaboración de morteros y concretos hidráulicos; con el propósito de analizar el comportamiento de sus propiedades físicas como material sustituto del cemento.

Con la realización del proyecto, se determinó la caracterización de 2 tipos de OB (OB-C y OB-D), obtenidos bajo condiciones de temperaturas diferentes. Para la ejecución de las pruebas, se tuvieron en cuenta parámetros como: la relación agua/cemento (A/C), óxido de biochar/cemento (OB/C) y las propiedades físicas fundamentales determinadas bajo el parámetro del área superficial específica BET (A_{BET}); utilizados en 3 tratamientos distintos. A partir de las pruebas experimentales y los valores pronosticados del modelo, se observó un cambio positivo en la resistencia a la compresión de los morteros con adición de OB-C, para los tiempos de curado de 7 y 28 días. Las condiciones óptimas consideradas para la obtención de dichos resultados son: relación de OB/C de 1/4 y A/C de 0.688, con un A_{BET} de 72.286 m²/g correspondiente al OB-C. Se observó también, que el A_{BET} más alto, favoreció en el mejoramiento de la resistencia a la compresión; ya que, se tuvo en cuenta la absorción de agua de las partículas de OB.

Se encontraron y analizaron otras investigaciones a nivel regional que utilizaban óxido de Biochar de cascarilla de arroz como material sustituto cementoso; sin embargo, la elaboración de los morteros y concretos de pruebas, contenían otros materiales de reemplazo, lo que implicaba no tener una información clara de las ventajas y desventajas del uso del óxido de Biochar.

Con las investigaciones analizadas a nivel nacional y regional, se observa un alto nivel de interés por la utilización de ceniza de cascarilla de arroz como material de sustitución parcial del cemento, para la elaboración de morteros y concretos hidráulicos. Es cierto, que los mejores resultados se obtienen con porcentajes de

reemplazo de CCA del 5% y 10%, con tiempo de curado óptimo de 28 días. En general, son muchos los aspectos y parámetros, además de los estudiados, a tener en cuenta al momento de utilizar el óxido de Biochar como reemplazo parcial de cemento; tales como: la temperatura de obtención de la ceniza, el tamizado, el tratamiento de limpieza, proporción de agua.

5. METODOLOGIA

La metodología de este estudio se basa en el método científico experimental, cuya aplicación incluye una serie de pasos como la observación, formulación de problemas, formación de hipótesis, planificación experimental, experimentación, análisis de resultados, conclusiones y redactar informes escritos. Estos métodos permiten identificar, medir y controlar las variables de interés para el estudio, los resultados obtenidos se caracterizan por la receptibilidad y reproducibilidad.

Las principales actividades para el desarrollo de este estudio en la fase piloto y fases posteriores corresponden al uso de ensayos preliminares para determinar la viabilidad del estudio, selección y caracterización de los materiales utilizados, diseñar el ensayo, desarrollar el método, realizar los ensayos de resistencia a la compresión, analizar los resultados y redactar las conclusiones pertinentes. Para ello, se han definido tres etapas, las cuales son expuestas en la figura 5 detalles de la metodología.

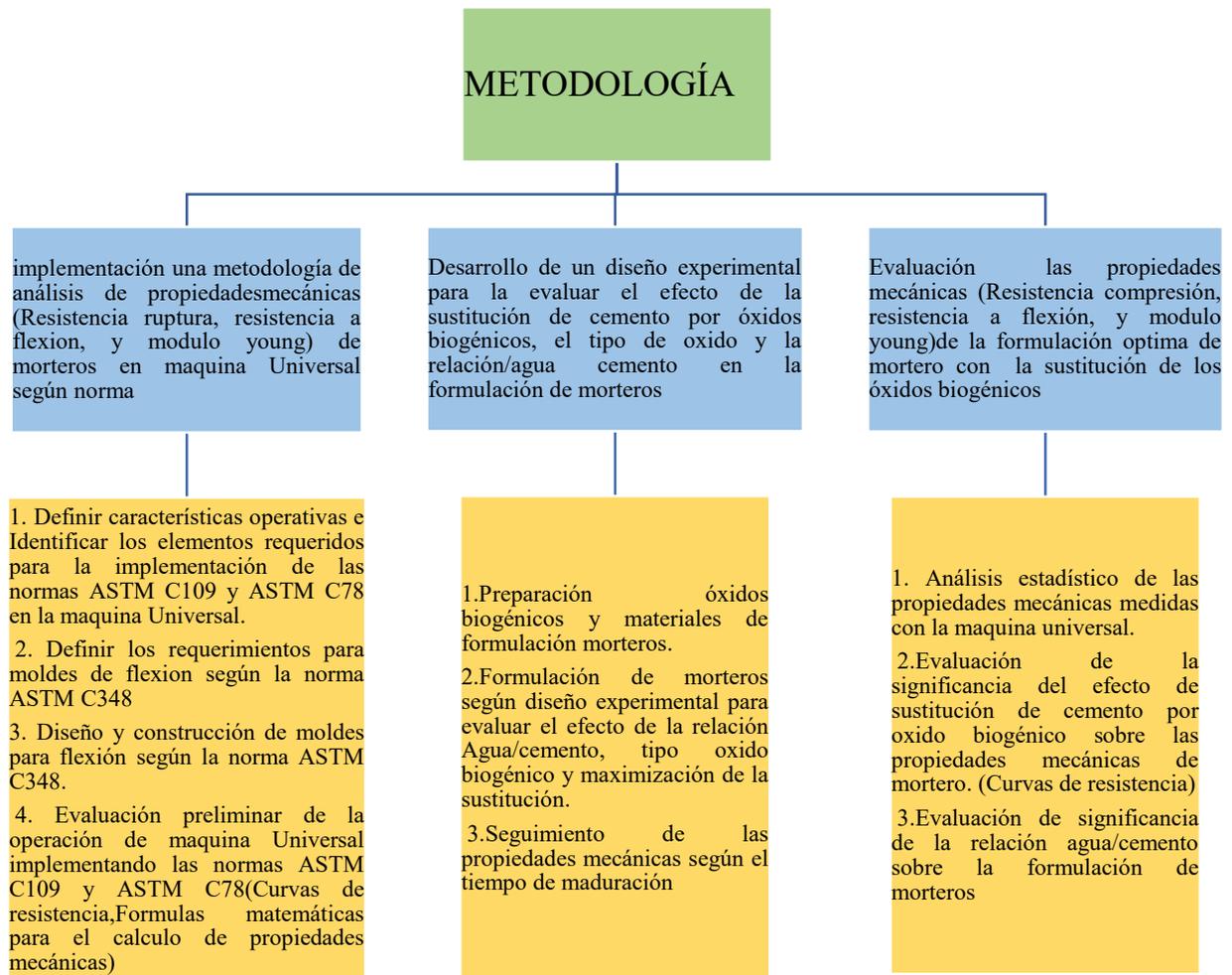


Figura 4. Fuente: elaboración propia, 2022

5.1 Etapa 1

5.1.1 formulación de morteros

Se procederá a la formulación y preparación de la mezcla, esta formulación se realizó con una sustitución del 20 % de cemento por óxidos de biochar, específicamente dos tipos de óxido, tipo C y tipo AAA, siguiendo la optimización de la mezcla obtenida por (Páez-Zuleta & Vélez-Vieira, 2019)

5.2 Etapa 2 – adaptación de la máquina universal de ensayos

Se procederá a realizar las pruebas, para la adaptación del método en la máquina universal, la cual tiene una capacidad de fuerza de 6600 lbf, marca mts 300kn y MTS exceed modelo E45 a partir de las normas Sociedad Americana para técnica y materiales ASTM C109, la cual, fue aprobada en el año 2014, para resistencia a la compresión y C78. Los ensayos para compresión están regidos por la norma ASTM C109 y para los ensayos a flexión regidos por la norma ASTM C78. También se tendrá en cuenta la norma ASTM C348, de la cual se obtiene el diseño para la fabricación de los moldes y posteriormente realización y fundición de las probetas a flexión. Después, de la respectiva elaboración de los moldes se pasa a la formulación de las probetas para los ensayos a compresión y a flexión.

5.3 Etapa 3 – medición de propiedades mecánicas

En esta etapa, se realiza el proceso de curado en tres diferentes lapsos de tiempo, el primero sería a 7 días, el segundo correspondería a 28 días, y el tercero a 90 días, en donde se observa el curado en agua destilada en recipientes cerrados. Esto nos permite evaluar la evolución de las propiedades mecánicas, para finalmente alcanzar la resistencia, comprensión y flexión del desarrollo del material.

5.4 Etapa 4 – análisis de propiedades mecánicas de formulación óptima de morteros con la adición de óxidos biogénicos.

Se procederá a realizar los cálculos y organizar los datos evaluando estadísticos básicos como promedios y desviaciones de la resistencia de compresión y flexión, que permitan demostrar la significancia del efecto de sustitución óxidos biogénicos y la relación agua/ cemento en el mortero.

5.4.1 Preparación de los dos tipos de óxidos para la formulación de morteros.

Obtención de óxido de biochar.
Este proceso se lleva a cabo mediante el proceso de la pirolisis en el gasificados de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL MONTERIA

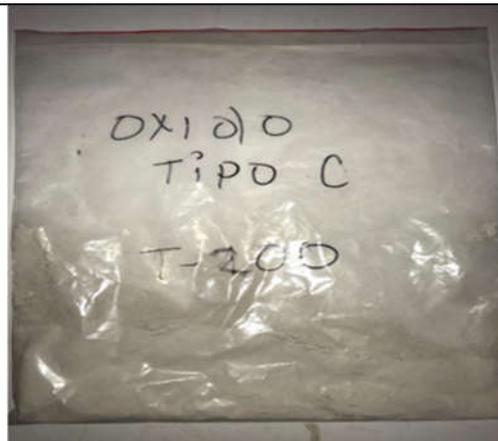


Ilustración 1 óxido tipo C

Secado del óxido de biochar.
Este proceso se realiza por medio de una mufla, en esta se coloca el óxido de biochar a una temperatura de 110° C, durante aproximadamente 2 horas.



Ilustración 2 Mufla

Molienda del óxido de biochar.
Aquí se procede a realizar la molienda del óxido de biochar, por medio de un molino manual con una frecuencia de 10 HZ, durante aproximadamente 15 minutos.



Ilustración 3 Molino.

Tabla 4. Preparación de los óxidos para formulación de morteros.

5.5 Formulaci3n de morteros.

Se procede a realizar la mezcla de acuerdo con la optimizaci3n para cada tipo de 3xidos y patrones a evaluar; se realizar3 con 4 materiales principales de la mezcla de la formulaci3n.

Arena de Ottawa

El agregado fino corresponde a arena de Ottawa "US Silica" gradada.

Se utiliza en la preparación de morteros para ensayos de cementos hidráulicos.

Peso: 50 lb (22.68 kg).

Gradada según normas ASTM C87, C109, C348, C359, C593, C778.



Ilustración 3 Arena Ottawa

Cemento portland.

Se utilizó cemento Portland Tipo I producido por la empresa Argos (Cemento Gris de Uso General), las especificaciones de este tipo de cemento cumplen con la norma NTC 121.



Ilustración 4 Cemento Portland

Agua destilada.

El agua de mezclado es destilada obtenida a partir del agua potable suministrada por la empresa Veolia Aguas de Montería S.A. E.S.P.



Ilustración 5 Probeta de medición de agua

Óxidos de biochar.

Los óxidos de biochar se obtuvieron a partir de la oxidación de biochar de cascarilla de arroz en una mufla a temperaturas entre 350 °C y 750 °C durante un tiempo mínimo de 12 horas, como se describió en la ilustración (7) este tratamiento se realizó en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería, la materia prima proviene de las industrias arroceras del departamento de Córdoba.

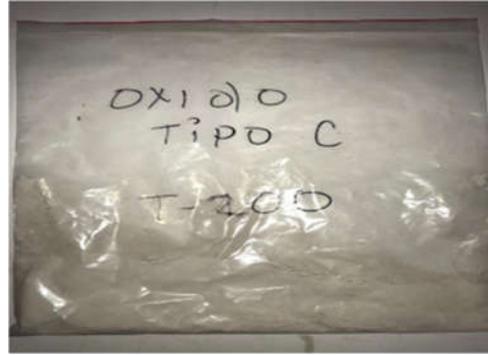


Ilustración 6 Oxido tipo C

Tabla 5. Materiales utilizados para la formulación de probetas con los dos tipos de óxidos.

5.8.1 Especificaciones técnicas de equipos utilizados.

Serie	Unidades	E45
Modelo	---	E45.105, E45.105E; E45.305, E45.305E
Capacidad máxima de fuerza nominal	KN	100/300
Opciones de capacidad de fuerza	N, KN	50kN, 100kN, 200kN, 300kN
Rango de fuerza	---	0.4%-100% FS
Precisión de fuerza	---	±0.5% de la visualización
Rango de medición de tensión	---	0.2% ~ 100% FS
Precisión de tensión	---	ISO 9513 Class 0.5 and Class 1
Tipo de marco	De pie/de mesa	de pie
Zonas de prueba (simple/doble)	Único / Doble	Único / Doble
Velocidad máxima de prueba	mm/min	500/250
Velocidad mínima de prueba	mm/min	0.001

Resolución de posición	mm	0.000041
Requisitos de energía	V AC	220V±10% ; 2200W/7600 W
Longitud estándar	mm	1050/1100
Longitud extendida	mm	1350/1400
Espacio entre columnas	mm	600/580
Longitud estándar	mm	2133 x 1230 x 870/ 2360 x 1215 x 960
Longitud extendida	mm	2433 x 1230 x 870/ 2760 x 1215 x 960
Longitud estándar	kg	1400/1700
Longitud extendida	kg	1480/1795

Tabla 6. Especificaciones técnicas maquina universal.

Modelo	Capacidad	Dimensiones internas	Temperatura máxima	Conexión eléctrica
MM3	3 L	15x15x15 cm	1200°C	110V/220V
MM4	4 L	16x16x16 cm	1200°C	110V/220V
MM5	5 L	17x17x17 cm	1200°C	110V/220V
MM10	10.6 L	25x17x25 cm	1200°C	110V/220V
MM12	12.4 L	28x17x26 cm	1200°C	220V
MM15	15.18 L	33x23x20 cm	1200°C	220V
MM18	18.3 L	32x22x26 cm	1200°C	220V

Tabla 7. Especificaciones técnicas de la mufia.

5.5.1 Diseño de molde

Se realizó el diseño del molde con aluminio de alta densidad, para tener un acabo superficial homogéneo, este molde consta de 3 piezas, es importante resaltar que se tuvo en cuenta que el diseño fuera de fácil desarmado y armado, este molde consta de medidas de 40mm x 40mm x 160mm, requeridas por la norma ASTM C348 para este tipo de ensayos, así mismo, se utilizó el compactador de probetas, para eliminar las burbujas de aire comprimidas en las probetas y para que no quedará con espacios vacíos.



Ilustración 7 Diseño de molde



Ilustración 8 Compactador

Tabla 8. Diseño de molde nuevo para ensayos a flexión y Compactador de probetas

5.6 Fundición de probetas.

Aquí, se procede a verter la mezcla formulada en los moldes de las probetas. Después, de llenar el molde se realiza el compactado de las probetas para evitar cavidades de aires. Esto se realiza por medio de un compactador con medida 22mm

de espesor por 82 mm de ancho por 40 mm de alto, y se adaptó tomando como referencia la norma Sociedad Americana para técnica y materiales ASTM C348, la cual, nos permitió el diseño del molde para las probetas.

5.6.1 Curado de probetas en agua destilada.



Ilustración 9 curado de muestra

Procedemos al curado de las probetas en agua destilada con recipientes cerrados donde se tendrán 3 muestras por cada fecha de análisis escogidas de curado 7, 28 y 90 días.

5.6.2 Caracterización de probetas.

Probetas para ensayos a compresión.

Medidas: 50 mm x 50 mm x 50 mm.

Norma: ASTM C109.



Ilustración 10 Muestra a compresión

<p>Probetas para ensayos a flexión.</p> <p>Medidas :40 mm x 40 mm x160 mm.</p> <p>Norma: ASTM C78.</p>	 <p>Ilustración 11 Muestra a flexión</p>
---	---

Tabla 9. Medidas y normas de probetas evaluadas.

5.6.3 Montaje de método

Resistencia a compresión - el cálculo se realizó según la norma ASTM C109, la máquina de ensayo con espacio suficiente entre la superficie de apoyo superior de la máquina y la superficie de apoyo inferior de la máquina para permitir el uso del dispositivo de prueba. Para ello, se tomó la variable cuantitativa con una frecuencia de 500Hz y una velocidad de avance de 0.00001 Seg. La carga aplicada a la muestra es de 61,0 %. Si la carga aplicada por el compresor se indica en el dial. El dial debe tener una escala legible de al menos 0,1% de la carga completa. Donde se tendrá en cuenta el esfuerzo máximo de la curva reportada por el equipo MTS exceed modelo E45, la cual se divide por el área transversal de la probeta.

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Ecuación 1.Ecuacion de resistencia a compresión

f_m : resistencia a compresión [Mpa]

P: carga máxima aplicada [lbf]

A: área sección transversal de probeta, [mm²]

5.6.4 Módulo de ruptura a flexión

Se calculó según la norma ASTM C78, Para la medición del módulo de ruptura se implementó una prueba de flexión a tres puntos, ya que era, con lo que se contaba en el momento del ensayo, y se adaptó a la norma, por lo que fue necesario calibrar el equipo MTS exceed modelo E45, para que se cargarán las muestras de forma continua y sin tirones. La carga se aplicó a un ritmo constante, con una velocidad que aumentó continuamente la tensión máxima en la superficie de carga entre 0,9 Mpa/min y 1,2 Mpa/min [125 psi]. pulgada/min y 175 psi pulgada/min, hasta que ocurrió una ruptura de la probeta. Donde se pudo medir el valor de la carga máxima y se evaluó el módulo de ruptura como se presenta en la siguiente ecuación.

$$R = \frac{3P}{bd^2}$$

Ecuación 2. Ecuación de resistencia a flexión

R= módulo de ruptura, Mpa [psi],

P= carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo [lbf],

b= anchura media de la muestra, mm [in.].

d= profundidad media de la muestra, mm [in.].

5.6.5 caracterización de materiales.

5.6.5.1 Arena Ottawa c778

La arena Ottawa es distribuida por la planta de Ottawa Illinois de U.S. Sílice Company. Es una arena normalizada de acuerdo con lo recomendado en la norma ASTM C778; es utilizada en el estudio de características de materiales granulares. Esta arena posee partículas redondeadas y sub -redondeadas de color gris compuestas por mineral de cuarzo. ((Sanchez Ludwing David Universidad Distrital Francisco Jose Caldas Facultad Tecnológica, 2016))

Elemento	%	Elemento	%
SiO ₂	99.7	MgO	<0.01
Fe ₂ O ₃	0.02	Na ₂ O	<0.01
Al ₂ O ₃	0.06	K ₂ O	<0.01
TiO ₂	0.012	CaO	<0.01

Tabla 10. Composición Química de la Arena Ottawa.

Fuente: U.S. Sílice Company.

5.6.6 Características físicas y químicas de los óxidos y cemento.

El biocarbón se obtuvo en reactores autotérmicos de tiro descendente en un sistema de dos plantas piloto, WBG-30 (Lab. Energías renovables UPB), con una capacidad de procesamiento de 60 kg h⁻¹ para RH. Los detalles técnicos han sido

descritos en trabajos previos (Gomez-Vazquez et al., 2022). La temperatura de operación se controló manejando la relación equivalente (ER) de aire en el reactor de tiro descendente entre 0,2 y 0,27.

Los biocharres fueron sometidos a lixiviación ácida en un equipo de laboratorio de reflujo. La concentración de ácido y la temperatura de oxidación se ajustaron para obtener un área superficial específica BET del óxido biogénico.

Medidas de difracción de rayos X se realizaron para estimar la composición química de óxidos y cemento. Siguiendo el proceso mencionado, isotermas de adsorción de N₂ (-196 °C) fueron medidas en los materiales en un Nova3000 de Quanta Chrome

utilizando alrededor de 0,1 g de una muestra desgasificada a 110 °C al vacío (aprox. 10⁻⁴ bar) durante la noche. Las isotermas de adsorción de N₂ se analizaron mediante la ecuación BET que arrojó el área superficial A_{BET}. Se aplicó el Dubinin-Radushkevich (DR) a las isotermas de N₂ para determinar el volumen de microporos W₀ y meso poros V_{meso}. La tabla 8 resume las propiedades físicas y químicas de los materiales cementantes y puzolánicos.

OXIDOS	OT-C	OT-AAA	PORTLAND I
Propiedades Químicas			
Si (% at.)	24.155	51.39	8.56
O (% at.)	54.955	47.559	35.9
Al (% at.)	0.535	-	2.55
K (% at.)	0.545	-	0.37
Mg (% at.)	0.115	-	0.76
Mn	-	-	0.03
Fe			2.76
Na			0.15
Ti			0.17
Cl			0.03
C (% at.)	19.695	2.9	-
Humedad (%)	4.05	10.58	**
Pérdida al fuego (%)	11.67	3.33	**
Propiedades Físicas			
A _{BET} (m ² /g)	72.286	135.344	1,324
W _{0-N2} (cm ³ /g)	0.035	0.05	0,001
V _{meso} (cm ³ /g)	0.008	0.17	0,005

Tabla 9. Propiedades físicas y químicas de materiales de formulación

6. RESULTADOS GENERALES

6.1 Formulación de morteros.

Para la evaluación de propiedades mecánicas de mortero, se formularon tres, los cuales es importante mencionar que, para su fabricación, se utilizaron los mismos elementos tales como; arena Ottawa, agua y cemento. Los tres morteros patrones

de cemento base, corresponden a formulaciones que evalúan el efecto de la relación agua cemento sobre la resistencia mecánica, esta relación A/C fue evaluada en un rango entre 0.509 y 0.688 (Ver la tabla 10).

El efecto de los óxidos biogénicos sobre las propiedades mecánicas fue evaluado para relaciones O/C máxima y A/C optimizada según el trabajo de (Páez-Zuleta & Vélez-Vieira, 2019). Una relación peso a peso de O/C de 0.2 y A/C de 0.688 fueron utilizadas para la formulación de morteros con sustitución de oxido biogénicos. La relación de arena se mantuvo constante para todos los morteros con óxidos biogénicos. La tabla 10 presenta las relaciones y porcentajes en peso de las formulaciones implementadas.

TIPO DE OXIDO	A/C	O/C	Arena (%p/p)	Agua (%p/p)	Cemento (%p/p)	Óxidos (%p/p)
P1	0.688	0	62%	16%	23%	0
P2	0.509	0	65%	12%	23%	0
P3	0.645	0	63%	15%	23%	0
OT-C	0,688	0,20	64%	13%	19%	5%
O-AAA	0,688	0,20	64%	13%	19%	5%

Tabla 11. Relación agua /cemento y oxido / cemento optimizadas.

Se busca evaluar el efecto del tiempo de curado con el mejoramiento de las propiedades mecánicas para los ensayos de compresión y flexión respectivamente. También, se evidencia en la tabla 9, la ausencia de probetas para ensayos de

compresión de los patrones 1, 2 y 3; a 7 y 28 días de curado, debido a que no se contó con el número de moldes suficientes, para realizar las probetas por triplicado de los días de curado correspondientes, y/o no se contó con suficiente material de oxido. Se observa que, para las probetas de ensayos a flexión, falta probetas de oxido tipo AAA. Puesto que, se encuentra en cantidades limitadas por falta de producción en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería. Sin embargo, se pudo realizar el proceso de curado en tres diferentes lapsos de tiempo, el primero a 7 días, el segundo correspondería a 28 días, y el tercero a 90 días, en donde se observó el curado en agua destilada en recipientes cerrados. Esto permitió evaluar la evolución de las propiedades mecánicas, para finalmente alcanzar la resistencia, compresión y flexión del desarrollo del material.



Ilustración 12 montaje a compresión



Ilustración 14 montaje a flexión



Ilustración 15 Muestra mortero fallada en Máquina universal a compresión



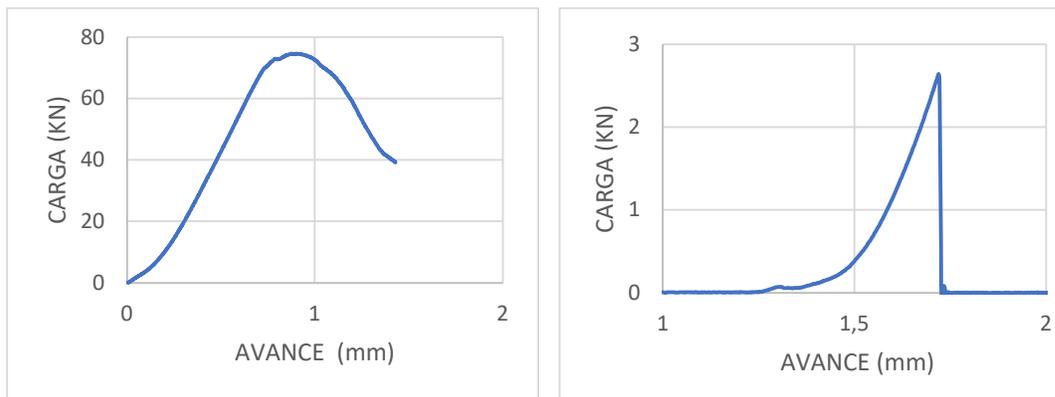
Ilustración 16 Muestra de mortero fallada en maquina universal a flexión

Muestra	Prueba					
	Compresión			Flexión		
	Número de probetas por días			Número de probetas por día		
	7	28	90	7	28	90
Patrón 1			3	3	3	3
Patrón 2			3	3	3	3
Patrón 3			3	3	3	3
OTC	3	3	6	3	3	6
AAA	3	3	3			3

Tabla 12. Numero de probetas ensayadas por día para cada tipo de patrón y de tipos de óxidos.

6.2 Análisis de propiedades mecánicas.

Siguiendo las normas, ASTM C109 Y ASTM C78 para análisis de resistencia a compresión y módulo de ruptura a flexión se obtuvieron las curvas de carga y avance para los morteros. Las cuales tiene una frecuencia de 500Hz y velocidad de 0.00001Seg. Cabe mencionar, que estos ensayos, se realizaron en diferentes lapsos de tiempos, comprendidos en 7, 28 y 90 días, pero con las mismas condiciones a compresión y a flexión. En la figura 6, se presentan las curvas para el patrón a 90 días de curado.



a)

b)

Figura 6. curvas de patrón a 90 días (a) compresión y (b) flexión

En la **figura 6 (a)** se observa el comportamiento del patrón de morteros sometidos a ensayos de compresión, alcanzando una fuerza máxima de 75 KN, evidenciándose en la curva su comportamiento plástico, que al pasar de este se produce el fallo de la probeta y comienzan a bajar sus valores. En la **figura 6 (b)** se observa la curva del patrón para ensayos a flexión, donde se evidencia el comportamiento cerámico del material, al obtener la carga máxima 2.8 KN de fuerza,

se ve el declive directo de la gráfica, esto evidenciando que al pasar su región plástica de inmediato se produce el fallo de la probeta a flexión.

En la figura 7, se presentan las curvas de carga y avance para el óxido tipo C a 90 días de curado. Para este nuevo material compuesto, se evidencia en la figura un comportamiento de fuerza de 57 KN, presentado por la muestra patrón de mortero a compresión y se aplica una fuerza de 2.4 KN, al material cerámico a flexión.

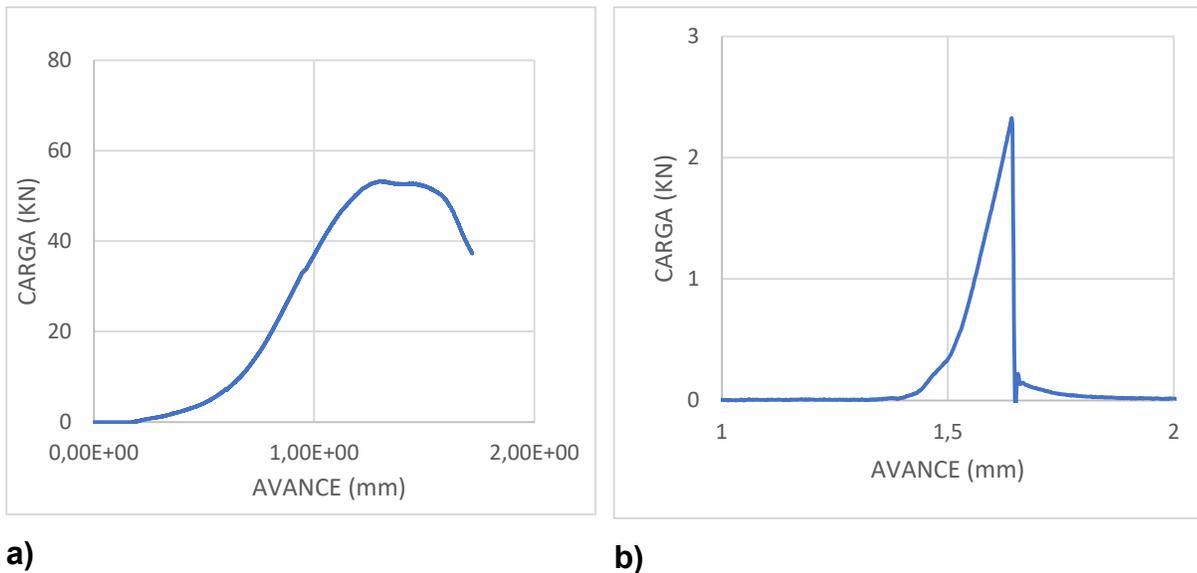
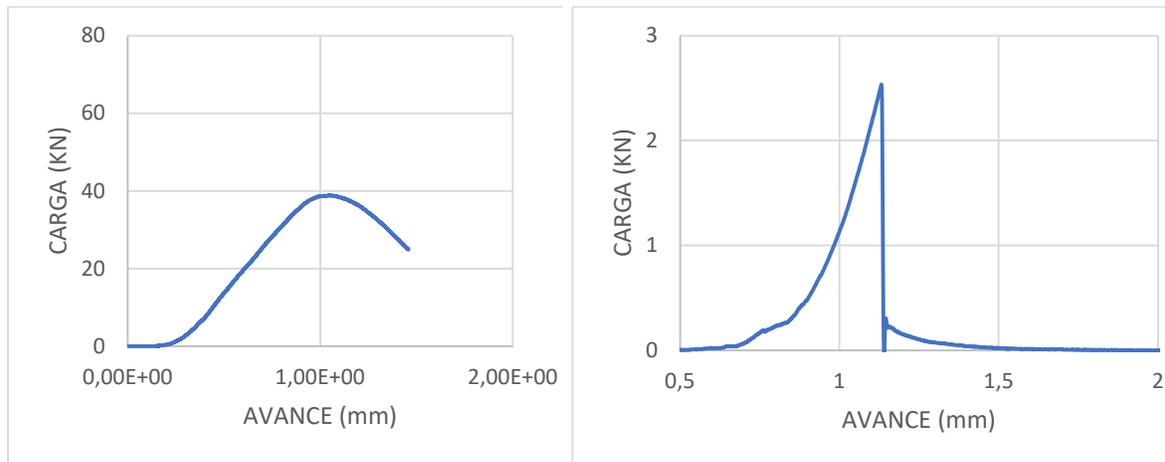


Figura 6. curvas de óxidos tipo C a 90 días (a) compresión y (b) flexión

Sin embargo, las curvas de avance de morteros con oxido tipo C, evidencia una ligera reducción de la carga máxima a compresión y flexión.

En la **figura 6** se presentan las curvas de carga y avance para los morteros con oxido tipo AAA a 90 días de curado. Las curvas muestran un comportamiento de 40

KN de fuerza de compresión en la muestra patrón de mortero, en plástico y con un comportamiento de 2.5 KN de fuerza cerámico a la flexión. Sin embargo, para la formulación de morteros con este patrón muestra una disminución significativa de la carga máxima.



a)

b)

Figura 7. Curvas de óxidos tipo AAA a 90 días (a) compresión y (b) flexión.

6.3 Resistencia a compresión de patrones.

En la figura 5 se presenta la resistencia compresión para 90 días de curado para los patrones de mortero 1, 2 Y 3 siguiendo la norma ASTM C109. Los resultados de resistencia de patrones evidencia no haber independencia estadística de los promedios para los patrones con la relación agua cemento en la compresión.



Figura 8. Resistencia a compresión de patrones a 90 días de curado.

Debido a la no independencia de las resistencias a la compresión con la relación A/C con la metodología propuesta, se representará la resistencia de patrón global como un promedio de los promedios de patrones con una resistencia media de 27.7 Mpa, y una varianza de ± 2.3 Mpa. Teniendo en cuenta, que no se tiene una aplicación específica para los morteros, se realiza la formulación para un mortero de 28 Mpa, es decir, que la resistencia media es aceptable.

6.4 Módulo de ruptura

En la figura 11 muestra las mediciones de módulo de ruptura para los patrones 1,2 y 3 a diferentes tiempos de curado siguiendo la norma ASTM C78. El resultado del módulo de ruptura evidencia el incremento del con la edad de curado, típico

comportamiento de morteros, sin embargo, no se presenta tendencia con la relación A/C, ni existe una independencia estadística respecto a la desviación estándar entre los tiempos de curado a 28 y 90 días. Con las pruebas experimentales el factor agua cemento no genera un efecto significativo en el rango evaluados para los morteros y la resistencia máxima a flexión se alcanza a tan solo 28 días.

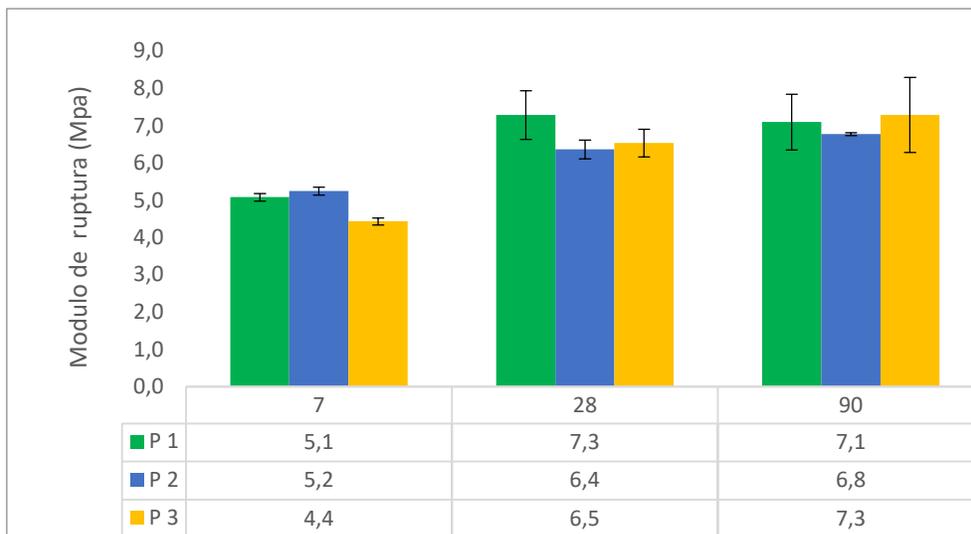


Figura 9. Módulo de ruptura de patrones para diferentes días de curado.

Para la comparación entre patrones y morteros con óxidos, se tomó el promedio obtenido para el módulo de ruptura a los distintos tiempos de curado, donde su resistencia máxima es alcanzada a los 90 días de curado. Por tal motivo, el valor referencia del módulo de ruptura a 7, 28 y 90 para el mortero patrón es resumido en la Tabla 12. Esto valores serán usados para obtener un punto de comparación con los morteros de óxidos tipo C Y óxidos AAA.

Días de curado	7	28	90
P 1	5.1	7.3	7.1

P 2	5.2	6.4	6.8
P 3	4.4	6.5	7.3
Promedio	4,9	6,7	7,1
Desviación	0,4	0,5	0,3

Tabla 13. Resultados del módulo de ruptura de patrones

Los resultados a compresión de óxidos tipo C (OT-C) como se evidencia en la tabla 13, se presentan los valores medidos para los ensayos a compresión en morteros de oxido tipo C a 7, 28 y 90 días de curado.

DIAS DE CURADO	OT-C 1	OT-C 2	OT-C 3	MEDIA	DESVIACION
7	11,0	15,0	16,7	14,2	2,9
28	25,4	19,1	22,9	22,4	3,2
90	30,7	31,2	27,1	29,7	2,2

Tabla 14. Resultados a compresión óxidos tipo C, a diferentes días de curados.

En la figura 12, se ven reflejados los resultados promedio por cada día de curado respectivamente, también se evidencia la desviación al promedio obtenidos con los análisis experimentales.

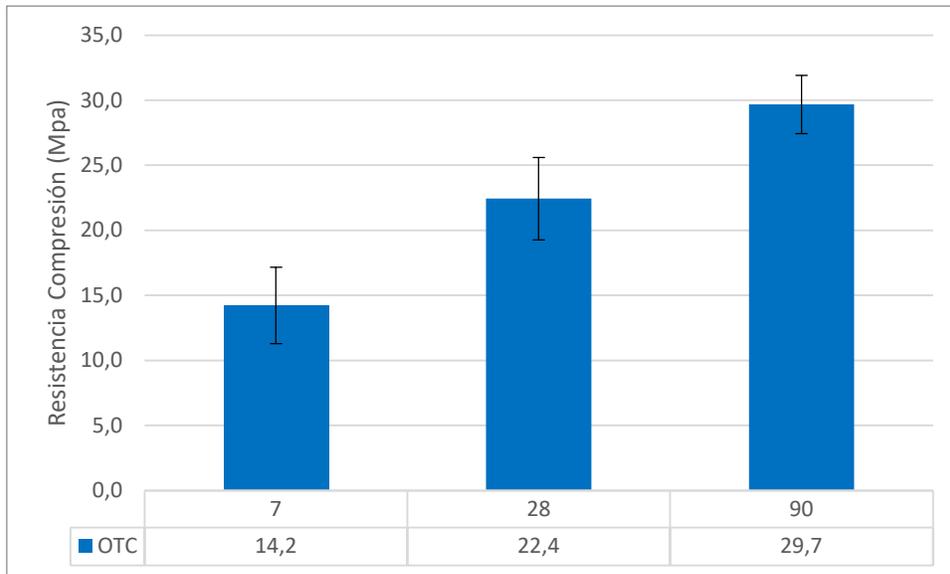


Figura 10. Resultados de resistencia compresión de óxidos tipo C

La resistencia a compresión incremento con la edad de curado, marcando una diferencia significativa entre las resistencias de 28 y 90 días. Por tanto, solo a 90 días se alcanzará una resistencia máxima de morteros con un valor promedio de 29.7 MPa.

6.5 Resultados del módulo de ruptura de óxidos tipo C.

Los resultados obtenidos, a módulo de ruptura a la flexión de moteros con óxidos tipo C (OT-C), son viables para la aplicación y construcción de morteros de cemento, puesto, que se comporta a buenas condiciones para las pruebas de ensayo a 7,28 y 90 día de curado, estos son resumidos en la Tabla 14, se presentan los valores medidos para los ensayos a flexión a tres puntos en morteros de oxido tipo C.

Días de curado	OT-C 1	OT-C 2	OT-C 3	MEDIA	DESVIACION
7	4,7	5,2	4,9	4,9	0,23
28	6,3	5,6	5,7	5,9	0,40
90	6,8	7,5	7,2	7,2	0,38

Tabla 15. resultados del módulo de ruptura a flexión para diferentes días de curado.

En la figura 13, se ven reflejados los resultados promedio por cada día de curado respectivamente, también de evidencia la desviación o el ruido que hace cada muestra en comparación con la otra.

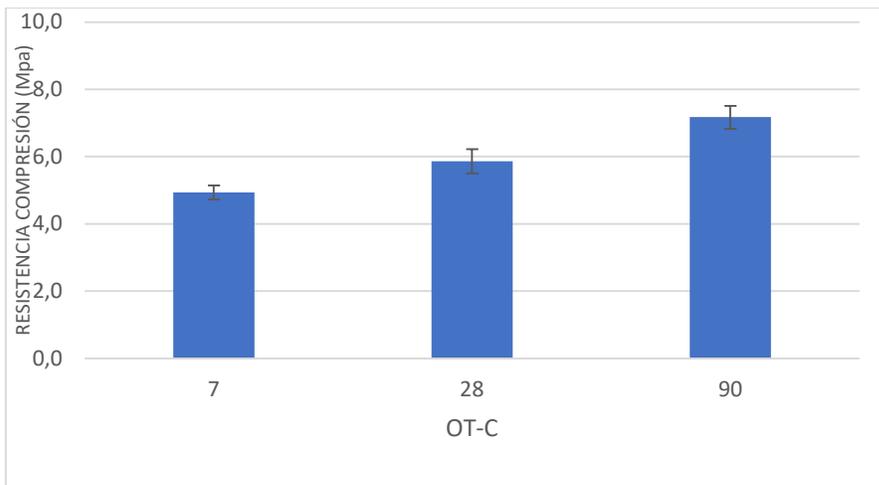


Figura11. Módulo de ruptura de óxidos tipo C a diferentes días de curado y su desviación promedio.

En la figura 12, se muestra que el módulo de ruptura incrementa hasta los 90 días, tiempo de alcanza su valor máximo de 7.2 MPa.

6.5.1 Resultados óxidos tipo AAA(OT-AAA)

Los resultados a compresión de óxidos tipo AAA (OT-AAA), si se encuentran viable, ya que este material se comporta a óptimas condiciones a la fabricación de los morteros.

Como resumen, en la tabla 13, se presentan los valores medidos para los ensayos a compresión en morteros de oxido tipo C a 7, 28 y 90 días de curado.

Días de curado	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Media	Desviación
7	9,0215	10,176	10,850	10,02	0,92
28	12,375	12,242	13,334	12,65	0,60
90	13,965	13,066	13,303	13,44	0,47

Tabla 16. Resistencia a compresión del óxido AAA a diferentes días de curados.

En la figura 11, se ven reflejados los resultados promedio comparados para cada día de curado. Se observa un incremento de la resistencia compresión con la evolución del tiempo de curado, también de evidencia la desviación o el ruido que hace cada muestra en comparación con la otra

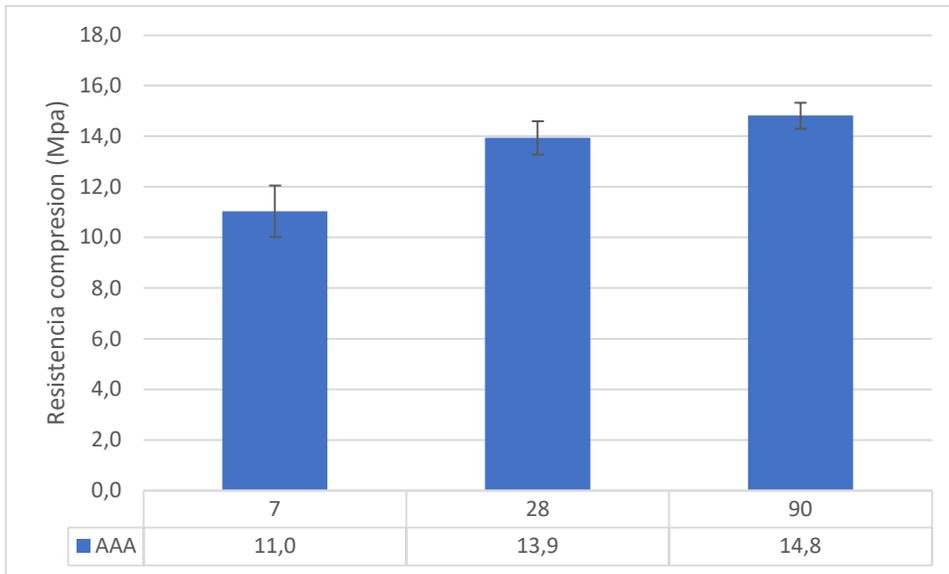


Figura12. Resistencias a compresión de óxidos AAA y su desviación estándar.

Sin embargo, en la figura 12 se evidencia que no hay una diferencia significativa con el valor promedio de 28 y 90 días, tal como se comportó la muestra patrón y morteros con oxido.

6.5.2 Resultados del módulo de ruptura de óxidos tipo AAA

Los resultados a flexión de óxidos tipo AAA, no se encuentran viables para la fabricación de los morteros de cementos, teniendo en cuenta, que el óxido no está en su estado optimizado para dicha fabricación y le faltan pruebas para validar su aplicación.

cómo se evidencia en la tabla 16, se presentan los valores medidos para los ensayos a compresión en morteros de oxido tipo AAA a 90 días de curado.

Días de curado	Patrón AAA 1	Patrón AAA 2	Patrón AAA 3	Media	Desviación
----------------	--------------	--------------	--------------	-------	------------

90	5,7	4,6	4,9	5,08	0,58
----	-----	-----	-----	------	------

Tabla 17. módulo de ruptura del óxido AAA a diferentes días de curado.

En la figura 12, se ven reflejados los resultados promedio por cada día de curado respectivamente, también de evidencia la desviación o el ruido que hace cada muestra.

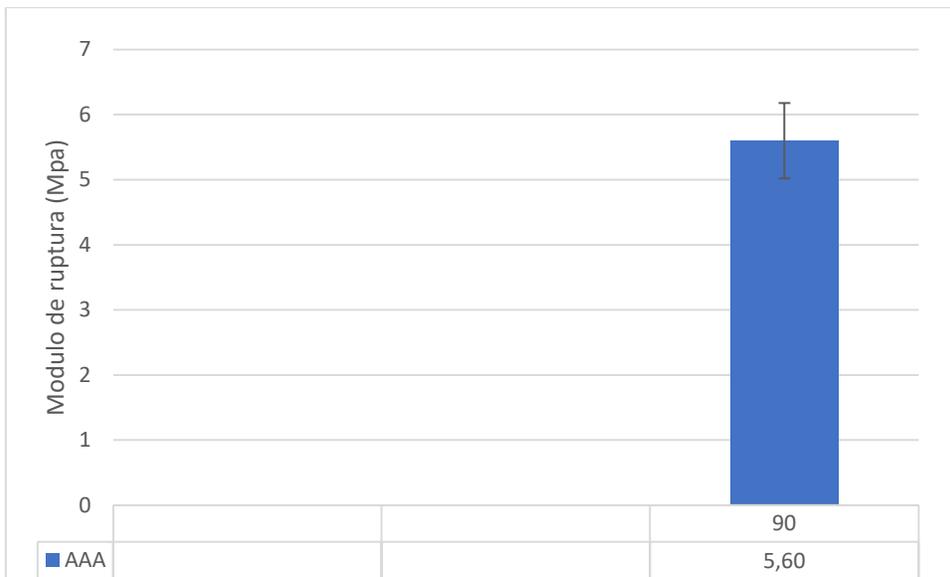


Figura13. Módulo de ruptura de óxidos AAA y su desviación promedio

En la figura 13, se ve reflejado que a 90 días de curado para el óxido tipo AAA alcanza una resistencia máxima promedio 5, 60 Mpa y una desviación de 0.58.

6.5.3 Comparación de óxidos y patrones.

En siguiente sección se realiza una evaluación comparativa de los resultados obtenidos para los morteros con oxido tipo C y AAA, así mismo la comparación entre morteros de oxido con las muestras patrón.

6.5.4 Comparación de óxidos AAA y óxidos tipo C a compresión.

En la figura 14 se demuestra que hay un efecto significativo del área superficial sobre la formulación de mortero, disminuyendo la resistencia posiblemente por la falta de optimización de la formulación para el óxido tipo AAA

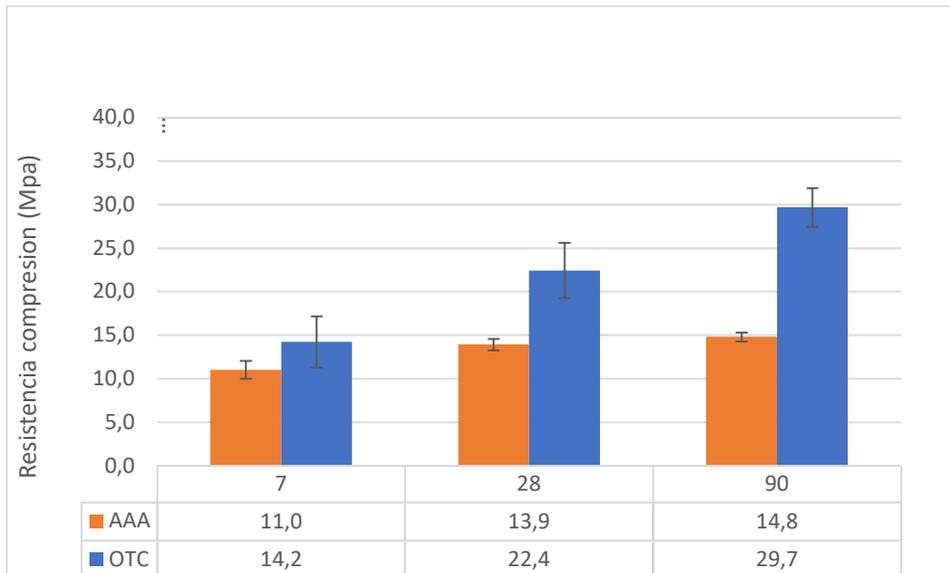


Figura14. Comparación de óxidos tipo AAA y óxidos tipo C a diferentes días de curados, con sus desviaciones promedios.

6.5.6 Comparación de óxidos tipo AAA y óxidos tipo C en módulo de ruptura

En la figura 14, se observa la comparación entre el óxido tipo AAA y óxido tipo C, el primero obtuvo una resistencia de 5,60 Mpa mientras que el segundo obtuvo una resistencia de 5,90 Mpa, en un tiempo de curado de 90 días. Como resultado, se pudo establecer una diferencia del 30% de resistencia en módulo de ruptura del óxido Tipo C y AAA determinando que el óxido tipo C tiene mejor resistencia.

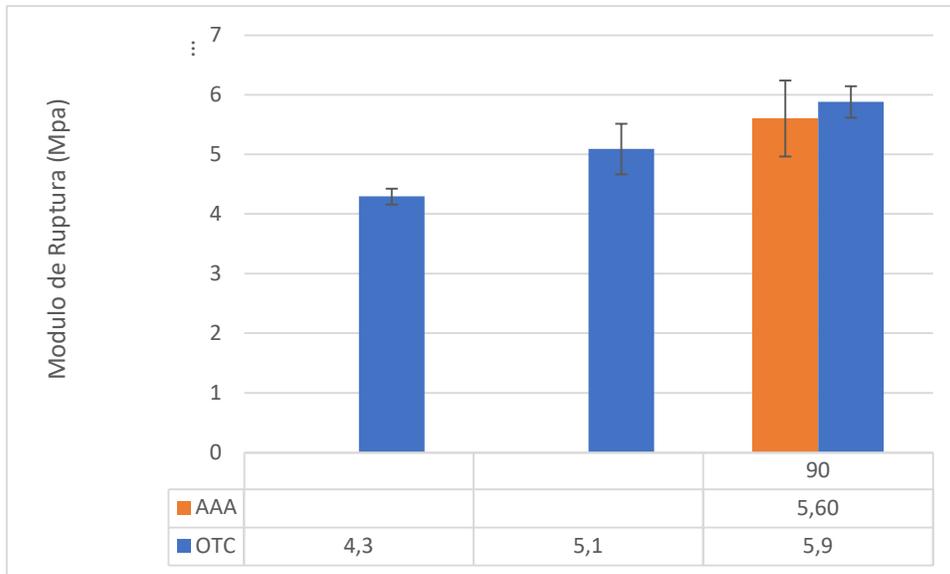


Figura15. Módulos de ruptura de óxidos AAA y óxidos tipo C a diferentes días de curados, con sus desviaciones promedio.

6.6 comparación de óxidos y patrones.

6.6.1 Resistencia a compresión de óxidos tipo C, óxidos tipo AAA y patrón.

En la figura 15, se presenta un análisis comparativo de las resistencias promedio a 7, 28 y 90 días de curado, donde, se refleja que a medida que pasa la edad de curado los morteros de óxidos van aumentando su resistencia, hasta alcanzar la máxima, en comparación con el patrón. Nótese que el óxido tipo C, fue el que más aumento su resistencia a compresión durante 90 días de curado, obteniendo una máxima promedio de 29,7 Mpa; también, se observa que su desviación en comparación con los otros días de curado produce un bajo nivel de ruido experimental.

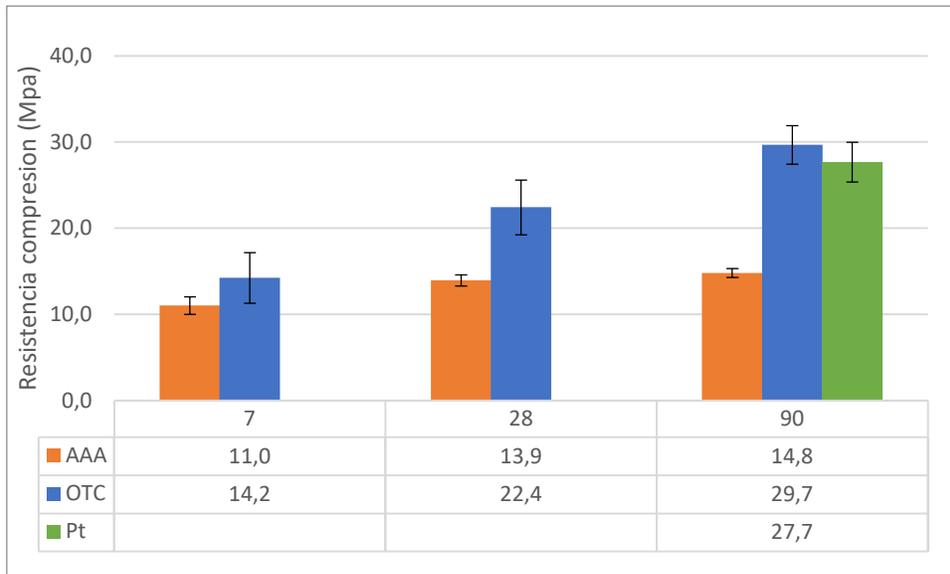


Figura16. Comparación de óxidos y patrones sometidos a compresión.

6.6.2Módulo de ruptura de óxidos tipo C, óxidos tipo AAA y patrón.

En la figura 16, las resistencias promedio a 7, 28 y 90 días de curado, donde se refleja que a medida que pasas la edad de curado los óxidos van aumentando su resistencia hasta alcanzar la máxima en comparación con el patrón. Nótese que el óxido tipo C fue el que más aumento su resistencia a compasión durante 90 días de curado, obteniendo una máxima promedio de 5,9Mpa; sin embargo, en esta propiedad mecánica los morteros con oxido no alcanzaron a superar el módulo de ruptura para la muestra patrón.

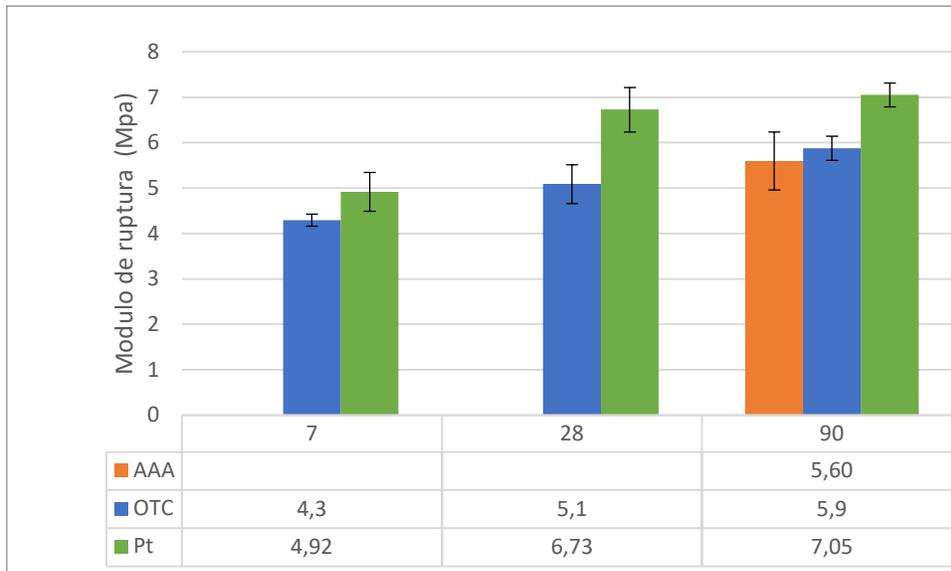


Figura17. Comparación de óxidos y patrones sometidos a flexión.

Una vez realizado los ensayos, se pudo evidenciar que el uso de óxido biogénico de biochar para la formulación de morteros, no es resistente al módulo a flexión, ya que este no se encuentra óptimo, sin embargo, este óxido si es resistente a compresión, pues se observó que sus propiedades permiten que se aplique a la fabricación de bloques, morteros, pañetes, y en placas de pavimento.

7. CONCLUSIONES.

Se evidencia claramente que, al comparar los dos tipos de óxidos y su optimización, el óxido tipo C presenta mejores características en sus propiedades mecánicas en comparación, con el óxido tipo AAA, esto es producto de la optimización de la relación agua cemento implementada en estudios previos.

Se validó experimentalmente, que el uso o aplicación del óxido tipo C, puede ser reemplazado en relación agua-cemento hasta un 20 % peso a peso, en la resistencia a la compresión en morteros. Es decir, que el cemento puede ser sustituido por el óxido tipo C en un 20%.

Se evidencia una optimización de la resistencia a compresión con la sustitución de 20% p/p de cemento por óxido tipo C, este proceso es favorable al módulo de ruptura, sin embargo, se reducen las propiedades mecánicas hasta 16.3%. Por lo tanto, se puede determinar que este mecanismo es válido para el uso de mortero a compresión.

8. TRABAJOS FUTUROS

- Busca desarrollar un estudio de optimización de la resistencia a flexión de morteros con sustitución de cemento por óxidos de biochar.
- Implementar estudios extendidos de evaluación de propiedades mecánicas como el módulo de Young de los morteros con sustitución de cemento por óxidos biogénico.
- Evaluar las características mecánicas y composiciones químicas microscópicas que permitan correlacionar las propiedades mecánicas obtenidas, con las distintas fases de cemento durante su evolución temporal de maduración.

8. BIBLIOGRAFIA.

- Ahsan, M. B., & Hossain, Z. (2018). Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry. *Construction and Building Materials*, 178, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.05.101>
- Angulo, O., & Viera, J. (2019). Evaluación del efecto de la ceniza de cascarilla de arroz en la resistencia a la compresión de concretos simples obed angulo zabala.
- Bernal Vargas, A., & Carvajal Cano, L. P. (2019). Evaluacion de un biocomposito elaborado con residuos agroindustriales del cultivo de arroz (cascarilla y tamo)y su potencial aplicacion en viviendas de interes social.
- Bheel, N., Abro, A. W., Shar, I. A., Dayo, A. . A., Shaikh, S., & Shaikh, Z. H. (2019). Use of Rice Husk Ash as Cementitious Material in Concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(3), 4209–4212. <https://doi.org/10.48084/etasr.2746>
- Borja Quintanilla, W. David., & Rea Castillo, J. Pablo. (2015). Análisis comparativo del módulo de rotura en vigas de hormigón simple y vigas reforzadas con fibra de carbono con una resistencia a la compresión de 28 mpa utilizando agregados del sector guayllabamba y cemento holcim tipo he.
- Devia, A., & Valencia, E. (2019). Evaluación de la resistencia del concreto con reemplazo del agregado fino por ceniza de cascarilla de arroz andrea devia guevara código 2110166 emilia valencia pabón código 21210361 universidad piloto de colombia seccional del alto magdalena facultad de ingeniería programa ingeniería civil girardot 2019.
- FEDEARROZ. (2021). *ARROZ*.
- Gomez-Vazquez, R., Camargo-Trillos, D., & Fernandez-ballesteros, E. (2022). Biogenic nanoporous oxides recovery from by-products of bioenergy production: Rice husks and corncob biochars. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106455. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106455>
- Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. In *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 206, pp. 46–59). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>
- Huaquisto Cáceres, S., & Belizario Quispe, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 20(2), 255–234. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- Khan, M. N. N., Jamil, M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., & Kaish, A. B. M. A. (2017). Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(1), 274–284. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0737-5>
- Lo, F. C., Lee, M. G., & Lo, S. L. (2021). Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122947>
- Orrabalis, C., Ledezma, A., Villalba, R., & García, R. M. (2019). Cuantificación de la resistencia mecánica de morteros de cemento al añadir cenizas de cascara de arroz ricas en nanopartículas de sílice quantification of the mechanical strength of cement mortars when added rice husk ash rich in silica nanoparticles.

- Páez-Zuleta, L., & Vélez-Vieira, L. (2019). Análisis de la influencia de los óxidos de biochar de cascarilla de arroz obtenidos por oxidación y gasificación de biomasa como agentes puzolánicos en la formulación de morteros y concretos hidráulicos.
- Rodriguez Sanches, A. M., & Tibabuzo Jimenez, M. P. (2019). Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico.
- Salamanca-Correa, R. (2001). *LaTecnologiaDeLosMorteros*.
- Sanchez Ludwing David Universidad Distrital Francisco Jose Caldas Facultad Tecnologica, C. de. (2016). Efecto de la redondez de la arena sobre el desgaste abrasivo a 3 cuerpos según la norma astm g65.
- Traversa, L. P., Iloro, F. H., & Benito, D. E. (2013). Determinación mediante ensayos térmicos del co 2 absorbido por morteros de cemento determination by thermal test of co 2 absorbed by cement mortars.
- Urien Pinedo, A. (2013). "Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual."
- Wilson Javier, E. E., Jose Luis, L. P., & Lucas Fernando, P. T. (2019). Evaluacion de las propiedades fisicomecanicas de cubos de mortero utilizando ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento. (vol. 4, issue 1).

8 ANEXO.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES SOSTENIBLES PARA LA CONSTRUCCIÓN EN MORTEROS CON ADITIVOS DE ÓXIDO DE BIOCHAR

LUIS ALBERTO MEJIA VEGA, (luis.mejiav@upb.edu.co)

ANDRES RICARDO CUTIVA MADRID, (andres.cuitivam@upb.edu.co)

Docentes: DIEGO ALEJANDRO CAMARGO TRILLOS,
(diego.camargo@upb.edu.co),

LUIS GUILLERMO RIVERO ALMANZA, (luis.riveros@upb.edu.co)
INGENIERIA MECANICA, INVESTIGACION, UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA seccional MONTERIA.

Resumen

Para la formulación de morteros sostenibles, es prioritario realizar evaluación de materiales ya sean completamente nuevos o mixtos, con el fin de encontrar si pueden cumplir las mismas funciones mecánicas para la industria de la construcción, y demás áreas de una economía global, con un menor impacto ambiental local e internacional. Los materiales biogénicos como biochar y óxidos han tomado un mayor interés en los últimos años, ya que son subproductos de fuentes renovables como la biomasa. En este trabajo se evaluó el efecto de la sustitución de cemento con óxido de biochar sobre la resistencia a la compresión y flexión de morteros. Para la evaluación de propiedades mecánicas, se

adaptó el método en la maquina universal de ensayos MTS exceed modelo E45 a partir de las normas ASTM C109 para resistencia a la compresión y C78 para la resistencia a flexión. Se realizó la respectiva calibración de la maquina acorde los parámetros requeridos por las normas. Tres muestras de mortero fueron evaluadas, una muestra patrón sin sustitución de cemento y dos muestras con adición de óxidos de biochar de un con un 25%, las resistencias a compresión y flexión fueron evaluadas a tres tiempos de curado, 7, 28 y 90 días, con análisis mecánico por triplicado. En las probetas de patrón a compresión se obtuvo carga promedio de 27.7 Mpa, posteriormente se realizaron los ensayos de los patrones a flexión de los cuales se obtuvieron una carga promedio de 7 Mpa.

Abstract:

For the formulation of sustainable mortars, it is a priority to carry out the evaluation of materials whether completely new or mixed, to find out if they can fulfill the same mechanical functions for the construction industry, and other areas of a global economy, with a lower local and international environmental impact. Biogenic materials such as biochar and oxides have taken a greater interest in recent years, as they are by-products of renewable sources such as biomass. In this work, the effect of replacing cement with biochar oxide on the resistance to compression and bending of mortars was evaluated. For the evaluation of mechanical properties, the method was adapted in the universal test machine MTS exceed model E45 from ASTM C109 standards for compressive strength and C78 for bending strength. The respective calibration of the machine was performed according to the parameters required by the standards. Three mortar samples were evaluated, one standard sample without cement substitution and two samples with

biochar oxide addition of 25%, compressive and bending resistances were evaluated at three curing times, 7, 28 and 90 days, with mechanical analysis in triplicate. The average load of 27.7 Mpa was obtained in the compression standard specimens, and then the bending pattern tests were performed, from which an average load of 7 Mpa was obtained.

Key words: (morteros, cemento, biochar, propiedades mecánicas, sostenibles)

INTRODUCCIÓN

Son muchos los países en el mundo que, a través de los años, han venido realizando estudios e investigaciones enfocados en la búsqueda de nuevos materiales, que se conviertan en potenciales alternativas para mitigar el impacto ambiental generado por las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y, en el reemplazo de materias primas agotadas paulatinamente por la imparable explotación de los recursos naturales, y el crecimiento exponencial de las ciudades alrededor del mundo. Colombia no es la excepción, y hace algunos años ha estado

acreditando proyectos encaminados en el desarrollo y aplicabilidad de nuevos materiales, que puedan cambiar el modo de vida de las personas.

Ahora bien, el cemento ha sido el elemento conglomerante más utilizado en la fabricación de morteros y concretos para los procesos de construcción; su fabricación se ha considerado, una de las industrias con un alto nivel de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial, con un 5% a 7% de emisiones globales (Traversa et al., 2013); además de su alto costo, gasto elevado de energía, agotamiento de los recursos naturales y su difícil reciclamiento (Khan et al., 2017).

Por otra parte, una de las problemáticas de gran interés que se presenta a nivel global, es la disposición y el manejo inadecuado de los residuos producidos por las actividades agroindustriales. La producción de arroz es considerada como una de las actividades agrícolas más importante del mundo, y la industria que genera los más altos volúmenes de residuos, siendo la cascarilla un 20% (aproximadamente) del total de la producción de arroz (Bernal Vargas & Carvajal Cano, 2019).

Para el 2020, Colombia hizo parte de los cinco principales productores de

arroz en el continente americano, ocupando el cuarto puesto con un volumen del 7,8% de la producción de 37,6 millones de toneladas (Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ) y Fondo Nacional del Arroz (FNA), 2021). A nivel regional, Córdoba posee varias zonas productoras de arroz, siendo el corregimiento de La Doctrina en Lorica, una de las más productivas de la región con una siembra aproximada de 828 hectáreas (ha) con un promedio de 5,1 ton/ha (FEDEARROZ, 2021)

La Pirolisis es el proceso que se utiliza para convertir la biomasa en combustibles alternativos, como: bioaceites, biocarbón y gases; mediante su calentamiento a temperaturas de 350°C a 650°C. Este proceso termoquímico, ha sido estudiado por muchos años, debido a su potencial y prometedor uso en la generación de material alternativo para la generación de energías renovables; además, de aportar al cuidado del medio ambiente (Urien Pinedo, 2013).

En concordancia con lo expuesto, esta investigación enfoca su atención en la evaluación de una nueva alternativa que permita la sustitución parcial del cemento, por material sostenible con similares propiedades mecánicas y que pueda ser

usado en la aplicación de morteros resistentes y al mismo tiempo, ofrezca beneficios al cuidado del medio ambiente. Se presenta, entonces, la oportunidad de utilizar un compuesto obtenido del proceso de pirolisis de la cascarilla de arroz y a su vez, del colado de la ceniza producida de ese proceso termoquímico (Óxido de Biochar); además, de estudiar su comportamiento mecánico luego de ser mezclado con cemento, agua y arena para la fabricación de morteros.

En este contexto, el buen uso de este material en las obras civiles puede generar una disminución tanto, en la contaminación del medio ambiente al tratar con responsabilidad los residuos sólidos agroindustriales, como las emisiones de CO₂ en la fabricación de cemento. Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar las propiedades mecánicas de morteros fabricados con adición de óxido de Biochar, permitiendo obtener información que visualice la viabilidad de utilizar en la construcción, un aditivo natural sostenible que se encuentra en muchas zonas del país.

METODOLOGIA

formulación de morteros

Se procederá a la formulación y preparación de la mezcla, esta formulación se realizó con una sustitución del 20 % de cemento por óxidos de biochar, específicamente dos tipos de óxido, tipo C y tipo AAA, siguiendo la optimización de la mezcla obtenida por (Páez-Zuleta & Vélez-Vieira, 2019)

adaptación de la máquina universal de ensayos

Se procederá a realizar las pruebas, para la adaptación del método en la máquina universal, la cual tiene una capacidad de fuerza de 6600 lbf, marca mts 300kn y MTS exceed modelo E45 a partir de las normas Sociedad Americana para técnica y materiales ASTM C109, la cual, fue aprobada en el año 2014, para resistencia a la compresión y C78. Los ensayos para compresión están regidos por la norma ASTM C109 y para los ensayos a flexión regidos por la norma ASTM C78.

Montaje de método

Resistencia a compresión - el cálculo se realizó según la norma ASTM C109, la máquina de ensayo con espacio suficiente entre la superficie de apoyo superior de la máquina y la superficie de apoyo inferior de la máquina para permitir el uso del dispositivo de prueba. Para ello, se tomó la variable cuantitativa con una frecuencia de 500Hz y una velocidad de avance de 0.00001 Seg. La carga aplicada a la muestra es de 61,0 %. Si la carga aplicada por el compresor se indica en el dial. El dial debe tener una escala legible de al menos 0,1% de la carga completa. Donde se tendrá en cuenta el esfuerzo máximo de la curva reportada por el equipo MTS exceed modelo E45, la cual se divide por el área transversal de la probeta.

$$fm = \frac{P}{A}$$

Ecuación 1. resistencia a compresión

fm: resistencia a compresión [Mpa]

P: carga máxima aplicada [lbf]

A: área sección transversal de probeta, [mm²]

Módulo de ruptura a flexión

Se calculó según la norma ASTM C78, Para la medición del módulo de ruptura se implementó una prueba de flexión a tres puntos, ya que era, con lo que se contaba en el momento del ensayo, y se adaptó a la norma, por lo que fue necesario calibrar el equipo MTS exceed modelo E45, para que se cargarán las muestras de forma continua y sin tirones. La carga se aplicó a un ritmo constante, con una velocidad que aumentó continuamente la tensión máxima en la superficie de carga entre 0,9 Mpa/min y 1,2 Mpa/min [125 psi]. pulgada/min y 175 psi pulgada/min, hasta que ocurrió una ruptura de la probeta. Donde se pudo medir el valor de la carga máxima y se evaluó el módulo de ruptura como se presenta en la siguiente ecuación.

$$R = \frac{3P}{bd^2}$$

Ecuación 2. resistencia a flexión

R= módulo de ruptura, Mpa [psi],

P= carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo lbf],

b= anchura media de la muestra, mm [in.].

d= profundidad media de la muestra, mm [in.].

caracterización de materiales.

Arena Ottawa c778

La arena Ottawa es distribuida por la planta de Ottawa Illinois de U.S. Silice Company. Es una arena normalizada de acuerdo con lo recomendado en la norma ASTM C778; es utilizada en el estudio de características de materiales granulares. Esta arena posee partículas redondeadas y sub-redondeadas de color gris compuestas por mineral de cuarzo. ((Sanchez Ludwing David Universidad Distrital Francisco Jose Caldas Facultad Tecnológica, 2016))

Características físicas y químicas de los óxidos y cemento.

El biocarbón se obtuvo en reactores autotérmicos de tiro descendente en un sistema de dos plantas piloto, WBG-30 (Lab. Energías renovables UPB), con una capacidad de procesamiento de 60 kg h⁻¹ para RH. Los detalles técnicos han sido descritos en trabajos previos (Gomez-Vazquez et al., 2022). La temperatura de operación se controló manejando la relación equivalente (ER) de aire en el

reactor de tiro descendente entre 0,2 y 0,27.

Los biochares fueron sometidos a lixiviación ácida en un equipo de laboratorio de reflujo. La concentración de ácido y la temperatura de oxidación se ajustaron para obtener un área superficial específica BET del óxido biogénico. Medidas de difracción de rayos X se realizaron para estimar la composición química de óxidos y cemento. Siguiendo el proceso mencionado. isotermas de adsorción de N₂ (-196 °C) fueron medidas en los materiales en un Nova3000 de Quanta Chrome.

Utilizando alrededor de 0,1 g de una muestra desgasificada a 110 °C al vacío (aprox. 10⁻⁴ bar) durante la noche. Las isotermas de adsorción de N₂ se analizaron mediante la ecuación BET que arrojó el área superficial A_{BET}. Se aplicó el Dubinin-Radushkevich (DR) a las isotermas de N₂ para determinar el volumen de microporos W₀ y meso poros V_{meso}. La tabla 8 resume las propiedades físicas y químicas de los materiales cementantes y puzolánicos.

OXIDOS	OT-C	OT-AAA	PORTLAND I
Propiedades Químicas			
Si (% at.)	24.155	51.39	8.56
O (% at.)	54.955	47.559	35.9
Al (% at.)	0.535	-	2.55
K (% at.)	0.545	-	0.37
Mg (% at.)	0.115	-	0.76
Mn	-	-	0.03
Fe			2.76
Na			0.15
Ti			0.17
Cl			0.03
C (% at.)	19.695	2.9	-
Humedad (%)	4.05	10.58	**
Pérdida al fuego (%)	11.67	3.33	**
Propiedades Físicas			
ABET (m ² /g)	72.286	135.344	1.324
W _{0-N2} (cm ³ /g)	0.035	0.05	0.001
V _{meso} (cm ³ /g)	0.008	0.17	0.005

RESULTADOS GENERALES

Relación agua /cemento y oxido / cemento optimizadas.

Se busca evaluar el efecto del tiempo de curado con el mejoramiento de las propiedades mecánicas para los ensayos de compresión y flexión respectivamente. También, se evidencia en la tabla 9, la ausencia de probetas para ensayos de compresión de los patrones 1, 2 y 3; a 7 y 28 días de curado, debido a que no se contó con el número de moldes suficientes, para realizar las probetas por triplicado de los días de curado correspondientes, y/o no se

contó con suficiente material de oxido. Se observa que, para las probetas de ensayos a flexión, falta probetas de oxido tipo AAA. Puesto que, se encuentra en cantidades limitadas por falta de producción en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería. Sin embargo, se pudo realizar el proceso de curado en tres diferentes lapsos de tiempo, el primero a 7 días, el segundo correspondería a 28 días, y el tercero a 90 días, en donde se observó el curado en agua destilada en recipientes cerrados. Esto permitió evaluar la evolución de las propiedades mecánicas, para finalmente

alcanzar la resistencia, comprensión y flexión del desarrollo del material.

Numero de probetas ensayadas por día para cada tipo de patrón y de tipos de óxidos.

Muestra	Prueba					
	Compresión			Flexión		
	Número de probetas por días		Número de probetas por día	Número de probetas por días		Número de probetas por día
	7	28	90	7	28	90
Patrón 1			3	3	3	3
Patrón 2			3	3	3	3
Patrón 3			3	3	3	3
OTC	3	3	6	3	3	6
AAA	3	3	3			3

Resistencia a compresión de patrones.

En la figura 5 se presenta la resistencia compresión para 90 días de curado para los patrones de mortero 1, 2 Y 3 siguiendo la norma ASTM C109. Los resultados de resistencia de patrones evidencia no haber independencia estadística de los promedios para los patrones con la relación agua cemento en la compresión.



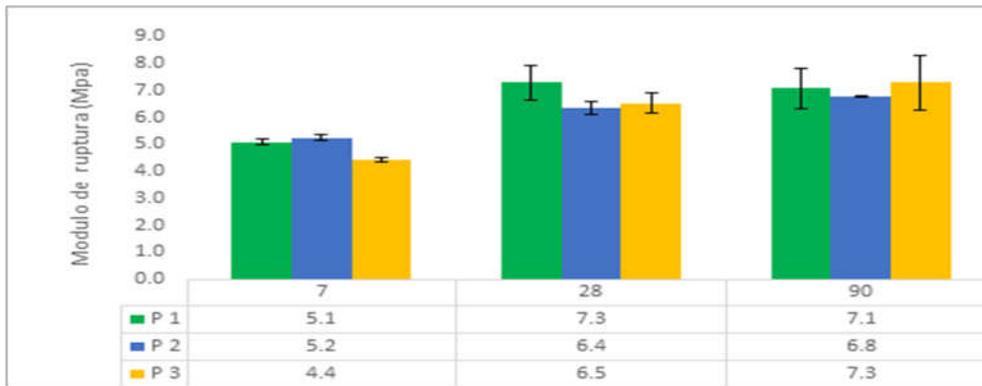
Resistencia a compresión de patrones a 90 días de curado.

Debido a la no independencia de las resistencias a la compresión con la relación A/C con la metodología propuesta, se representará la resistencia de

patrón global como un promedio de los promedios de patrones con una resistencia media de 27.7 Mpa, y una varianza de ± 2.3 Mpa. Teniendo en cuenta, que no se tiene una aplicación específica para los morteros, se realiza la formulación para un mortero de 28 Mpa, es decir, que la resistencia media es aceptable.

Módulo de ruptura a flexión

En la figura 11 muestra las mediciones de módulo de ruptura a flexión para los patrones 1,2 y 3 a diferentes tiempos de curado siguiendo la norma ASTM C78. El resultado del módulo de ruptura a flexión evidencia el incremento del con la edad de



Módulo de ruptura a flexión de patrones para diferentes días de curado.

Para la comparación entre patrones y morteros con óxidos, se tomó el promedio obtenido para el módulo de ruptura a flexión a los distintos tiempos de curado, donde su resistencia máxima es alcanzada a los 90 días de curado. Por tal motivo, el valor referencia del módulo de ruptura a

curado, típico comportamiento de morteros, sin embargo, no se presenta tendencia con la relación A/C, ni existe una independencia estadística respecto a la desviación estándar entre los tiempos de curado a 28 y 90 días. Con las pruebas experimentales el factor agua cemento no genera un efecto significativo en el rango evaluados para los morteros y la resistencia máxima a flexión se alcanza a tan solo 28 días.

flexión a 7, 28 y 90 para el mortero patrón es resumido en la Tabla 12. Esto valores serán usados para obtener un punto de comparación con los morteros de óxidos tipo C Y óxidos AAA.

Días de curado	7	28	90
P 1	5.1	7.3	7.1
P 2	5.2	6.4	6.8
P 3	4.4	6.5	7.3
Promedio	4,9	6,7	7,1

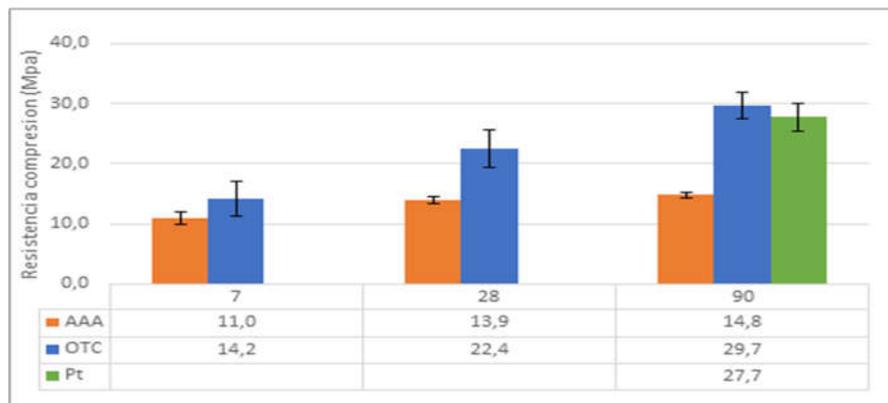
Desviación	0,4	0,5	0,3
------------	-----	-----	-----

Resultados del módulo de ruptura a flexión de patrones

Resistencia a compresión de óxidos tipo C, óxidos tipo AAA y patrón.

En la figura 17, se presenta un análisis comparativo de las resistencias promedio a 7, 28 y 90 días de curado, donde, se refleja que a medida que pasa la edad de curado

los morteros de óxidos van aumentando su resistencia, hasta alcanzar la máxima, en comparación con el patrón. Nótese que el óxido tipo C, fue el que más aumento su resistencia a compresión durante 90 días de curado, obteniendo una máxima promedio de 29,7 Mpa; también, se observa que su desviación en comparación con los otros días de curado produce un bajo nivel de ruido experimental.

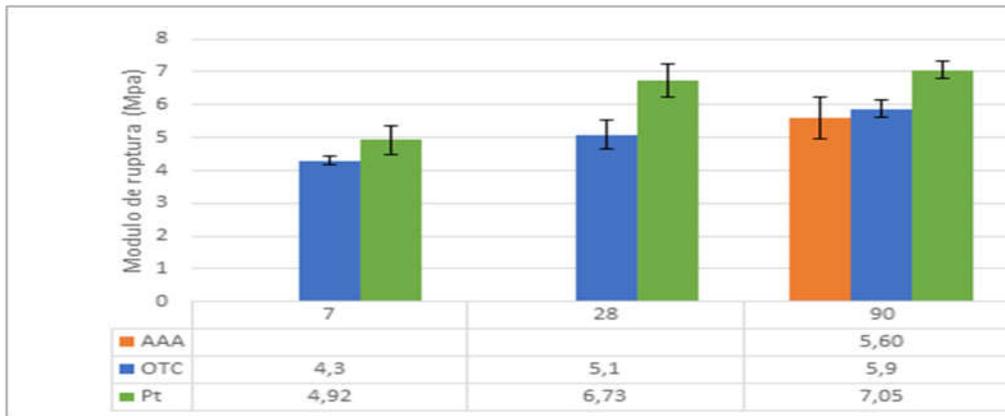


Comparación de óxidos y patrones sometidos a compresión.

5.6.2Módulo de ruptura a flexión de óxidos tipo C, óxidos tipo AAA y patrón.

En la figura 18, las resistencias promedio a 7, 28 y 90 días de curado, donde se refleja que a medida que pasas la edad de curado

los óxidos van aumentando su resistencia hasta alcanzar la máxima en comparación con el patrón. Nótese que el óxido tipo C fue el que más aumento su resistencia a compasión durante 90 días de curado, obteniendo una máxima promedio de 5,9Mpa; sin embargo, en esta propiedad mecánica los morteros con oxido no alcanzaron a superar el módulo de ruptura a flexión para la muestra patrón.



Comparación de óxidos y patrones sometidos a flexión.

Una vez realizado los ensayos, se pudo evidenciar que el uso de óxido biogénico de biochar para la formulación de morteros, no es resistente al módulo a flexión, ya que este no se encuentra óptimo, sin embargo, este óxido si es resistente a compresión, pues se observó que sus propiedades permiten que se aplique a la fabricación de bloques, morteros, pañetes, y en placas de pavimento.

CONCLUSIONES.

Se evidencia claramente que, al comparar los dos tipos de óxidos y su optimización, el óxido tipo C presenta mejores características en sus propiedades

mecánicas en comparación, con el óxido tipo AAA, esto es producto de la optimización de la relación agua cemento implementada en estudios previos.

Se validó experimentalmente, que el uso o aplicación del óxido tipo C, puede ser remplazado en relación agua-cemento hasta un 20 % peso a peso, en la resistencia a la compresión en morteros. Es decir, que el cemento puede ser sustituido por el óxido tipo C en un 20%.

Se evidencia una optimización de la resistencia a compresión con la sustitución de 20% p/p de cemento por óxido tipo C, este proceso es favorable al módulo de ruptura, sin embargo, se reducen las propiedades mecánicas hasta 16.3%. Por lo tanto, se puede determinar

que este mecanismo es válido para el uso de mortero a compresión.

Bibliografía

- Ahsan, M. B., & Hossain, Z. (2018). Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry. *Construction and Building Materials*, 178, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.05.101>
- Angulo, O., & Viera, J. (2019). Evaluación del efecto de la ceniza de cascarilla de arroz en la resistencia a la compresión de concretos simples obed angulo zabala.
- Bernal Vargas, A., & Carvajal Cano, L. P. (2019). Evaluacion de un biocomposito elaborado con residuos agroindustriales del cultivo de arroz (cascarilla y tamo) y su potencial aplicacion en viviendas de interes social.
- Bevel, N., Abro, A. W., Shar, I. A., Dayo, A. A., Shaikh, S., & Shaikh, Z. H. (2019). Use of Rice Husk Ash as Cementitious Material in Concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(3), 4209–4212. <https://doi.org/10.48084/etasr.2746>
- Borja Quintanilla, W. David., & Rea Castillo, J. Pablo. (2015). Análisis comparativo del módulo de rotura en vigas de hormigón simple y vigas reforzadas con fibra de carbono con una resistencia a la compresión de 28 mpa utilizando agregados del sector guayllabamba y cemento holcim tipo he.
- Devia, A., & Valencia, E. (2019). Evaluación de la resistencia del concreto con reemplazo del agregado fino por ceniza de cascarilla de arroz andrea devia guevara código 2110166 emilia valencia pabón código 21210361 universidad piloto de colombia seccional del alto magdalena facultad de ingeniería programa ingeniería civil girardot 2019.
- FEDEARROZ. (2021). *ARROZ*.

- Gomez-Vazquez, R., Camargo-Trillos, D., & Fernández-ballesteros, E. (2022). Biogenic nanoporous oxides recovery from by-products of bioenergy production: Rice husks and corncob biochars. *Biomass and Bioenergy*, *161*, 106455. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106455>
- Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. In *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 206, pp. 46–59). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>
- Huaquisto Cáceres, S., & Belizario Quispe, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, *20*(2), 255–234. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- Khan, M. N. N., Jamil, M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., & Kaish, A. B. M. A. (2017). Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *21*(1), 274–284. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0737-5>
- Lo, F. C., Lee, M. G., & Lo, S. L. (2021). Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *286*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122947>
- Orrabalís, C., Ledezma, A., Villalba, R., & García, R. M. (2019). cuantificación de la resistencia mecánica de morteros de cemento al añadir cenizas de cascara de arroz ricas en nanopartículas de sílice quantification of the mechanical strength of cement mortars when added rice husk ash rich in silica nanoparticles.
- Páez-Zuleta, L., & Vélez-Vieira, L. (2019). Análisis de la influencia de los óxidos de biochar de cascarrilla de arroz obtenidos por oxidación y gasificación de biomasa como agentes puzolánicos en la formulación de morteros y concretos hidráulicos.
- Rodríguez Sanches, A. M., & Tibabuzo Jimenez, M. P. (2019). Evaluación de la ceniza de cascarrilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico.
- Salamanca-Correa, R. (2001). *LaTecnologiaDeLosMorteros*.

- Sanchez Ludwing David Universidad Distrital Francisco Jose Caldas Facultad Tecnologica, C. de. (2016). Efecto de la redondez de la arena sobre el desgaste abrasivo a 3 cuerpos según la norma astm g65.
- Traversa, L. P., Iloro, F. H., & Benito, D. E. (2013). Determinación mediante ensayos térmicos del co 2 absorbido por morteros de cemento determination by thermal test of co 2 absorbed by cement mortars.
- Urien Pinedo, A. (2013). “Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual.”
- Wilson Javier, E. E., Jose Luis, L. P., & Lucas Fernando, P. T. (2019). Evaluacion de las propiedades fisicomecanicas de cubos de mortero utilizando ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento. (Vol. 4, Issue 1).