

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS ÓXIDOS BIOGÉNICOS DE BIOCHAR EN LA
MEJORA DEL ESFUERZO Y MODULO ELÁSTICO DE MORTEROS
FABRICADOS A PARTIR DE LA MEZCLA DE CASCARILLA DE ARROZ Y
CEMENTO.**

**SEBASTIÁN GIRALDO VALENCIA
JOSÉ FRANCISCO HINOJOSA PADILLA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2023**

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS ÓXIDOS BIOGÉNICOS DE BIOCHAR EN LA
MEJORA DEL ESFUERZO Y MODULO ELÁSTICO DE MORTEROS
FABRICADOS A PARTIR DE LA MEZCLA DE CASCARILLA DE ARROZ Y
CEMENTO.**

**SEBASTIÁN GIRALDO VALENCIA
JOSÉ FRANCISCO HINOJOSA PADILLA**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director

Ing. Luis Guillermo Riveros Almanza.

Codirector

Ing. Rafael David Gómez Vásquez. PhD

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2023**

Dedicatoria.

A mi familia y amigos, por su amor incondicional, por su amistad sincera, su apoyo inquebrantable, su ejemplo de vida y su ayuda desinteresada. Gracias por estar siempre a mi lado por compartir conmigo tantos momentos buenos y malos, por hacerme reír y por escucharme. Ustedes son una parte importante de mi historia. y por creer en mí. Sin ustedes, nada de esto hubiera sido posible, a mis profesores, por su enseñanza valiosa, su orientación profesional y su paciencia infinita. Gracias por transmitirme sus conocimientos, por motivarme a seguir aprendiendo y por guiarme en este camino. Ustedes son una fuente de inspiración para mí.

José Francisco Hinojosa Padilla.

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus enseñanzas. Gracias por siempre estar ahí para mí, por creer en mí y por darme las herramientas para alcanzar mis sueños.

A mi hermana, por su amistad, su complicidad y su apoyo incondicional. Gracias por estar siempre ahí para mí, por escucharme, por apoyarme y por reír conmigo.

A mis asesores, ING. Luis G Rivero A y ING. Rafael D Gómez V, por su guía, su orientación y su apoyo. Gracias por compartir su conocimiento y su experiencia conmigo, por enseñarme tanto y por ayudarme a alcanzar mis metas.

A mis amigos más cercanos, por su amistad, su cariño y su apoyo. Gracias por estar siempre ahí para mí, por acompañarme en este camino y por hacer que cada día sea un poco más especial.

Esta tesis es el resultado de todo su apoyo y su amor. Gracias a todos por hacer de este momento uno de los más especiales de mi vida.

Sebastian Giraldo Valencia

CONTENIDO

Resumen.....	7
Abstract	8
1. Introducción	9
2. Marco teórico.....	12
2.1. El Cemento	12
2.2. Resistencia Mecánica del Cemento.....	12
2.3. Morteros	13
2.4. El Concreto	13
2.5. Propiedades Mecánicas del Concreto.....	14
2.6. Propiedades del óxido biogénico de biochar.	15
2.7. Cascarilla de arroz	15
2.8. Propiedades mecánicas por estudiar	16
3. Estado del arte	17
4. Metodología	25
4.1. Extracción de óxido de biochar.	26
4.2. Características técnicas de los equipos utilizados.....	27
4.3. Elaboración y alistamiento de morteros.	28
4.3.1. Cantidad de muestras y tiempo de curado	29
4.4. Ensayos Máquina Universal	31
4.5. Análisis y tratamiento de datos.....	33
4.5.1. Método de varianza ANOVA.	35
5. Resultados y Discusión.	36
6. Conclusiones y Recomendaciones	48
7. Bibliografía	50

Figuras

Figura 1: Proceso de extracción del óxido de biochar.....	27
Figura 2: Cemento Portland Argos	30
Figura 3: Arena extraída del rio Sinú.....	30
Figura 4: Arena de Ottawa / 22.68Kg.....	30
Figura 5: Agua destilada	30
Figura 6: Molde de compresión	30
Figura 7: Molde de flexión.....	31
Figura 8: Mortero de compresión	32
Figura 9: Mortero de flexión	32
Figura 10: Máquina Universal – Laboratorio de mecánica, UPB Montería.....	32
Figura 11: Ensayo a compresión.....	33
Figura 12: Ensayo a flexión.....	33

Tablas

Tabla 1: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado.....	18
Tabla 2: Análisis del porcentaje de ceniza obtenida de la CA por región.....	19
Tabla 3: Resultados de ensayo FRX para CCA	20
Tabla 4: Resistencia a la compresión y alcance por días de curado.....	22
Tabla 5: Resumen del Módulo Elástico promedio obtenido.	23
Tabla 6: Especificaciones técnicas de la mufla.....	27
Tabla 7: Especificación técnicas del molino	28
Tabla 8: Especificaciones técnicas maquina universal.	28
Tabla 9: Tabla de resultados promedio.....	42
Tabla 10. Anova for selected Factorial Model S.....	43
Tabla 11. Final Equation in Terms of coded factors S(Max).	44
Tabla 12. Final Equation in Terms of coded factors E.....	46
Tabla 13. Anova for selected Factorial Model Carga Máxima	47
Tabla 14. Final Equation in Terms of coded factors Carga Max.	47

Gráficas

Gráfica 1. S/Smax vs e. para el patrón de compresión.....	36
Gráfica 2. S/Smax vs e. para la mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.	36
Gráfica 3. esfuerzo vs deformación unitaria para mezcla patrón.	36
Gráfica 4. esfuerzo vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.....	36
Gráfica 5. módulo elástico vs deformación unitaria para la mezcla patrón.	37
Gráfica 6. módulo elástico vs deformación unitaria para la mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.	37

Gráfica 7: Resumen de gráficas de S/Smax vs deformación unitaria para mezcla patrón.	37
Gráfica 8: Resumen de gráficas de S/Smax vs deformación unitaria para mezcla con óxido biogénico de biochar.	37
Gráfica 9: Resumen de gráficas para esfuerzo máximo vs deformacion unitaria para mezcla patrón.	38
Gráfica 10: Resumen de gráficas para esfuerzo máximo vs defromación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.....	38
Gráfica 11:Resumen de gráficas para modulo elástico vs deformación unitaria para la mezcla patrón.....	38
Gráfica 12:Resumen de gráficas para modulo elástico vs deformación unitaria para la mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.....	38
Gráfica 13:Resumen de gráficas para S/Smax vs deformación unitaria para mezcla patrón.	39
Gráfica 14:Resumen de gráficas de S/Smax vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.	39
Gráfica 15: Resumen de Gráficas de esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla patrón.	39
Gráfica 16:Resumen de gráficas de esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.....	39
Gráfica 17: Resumen de gráficas de modulo elástico vs deformación unitaria para mezcla patrón.	40
Gráfica 18:Resumen de gráficas de modulo elástico vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.....	40
Gráfica 19: Resumen de gráficas de S/Smax vs deformación unitaria para mezcla patrón.	40
Gráfica 20: Resumen de gráficas de S/Smax vs deformación unitaria para mezcla con óxido biogénico de biochar.	40
Gráfica 21: Resumen de gráficas de esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla patrón.	41
Gráfica 22: Resumen de gráficas de esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla con óxido biogénico de biochar.	41
Gráfica 23: Resumen de gráficas de modulo elástico vs deformación unitaria para mezcla patrón.	41
Gráfica 24: Resumen de gráficas de modulo elástico vs deformación unitaria para mezcla con óxido biogénico de biochar.	41
Gráfica 25: Interacción S Vs Tipo de mortero.	43
Gráfica 26: Interacción E Vs Tipo de mortero.	45
Gráfica 27: Interacción Carga máx. Vs Tipo de mortero.	47

Resumen

A través de los años, el concreto se ha catalogado como un componente elemental para las personas, convirtiéndose en uno de los materiales más usado a nivel mundial, después del agua. No obstante, su elaboración se ha estimado como uno de los procesos globales con altas emisiones atmosféricas de anhídrido carbónico, genera un alto consumo energético, gasto excesivo de los recursos naturales e inconvenientes con el reciclaje de los residuos que se generan. Por otra parte, la contaminación ambiental ocasionada por los desechos agroindustriales y la poca disponibilidad de áreas para su disposición; han fundamentado el uso de dichos residuos, como una alternativa de sustitución parcial del cemento en la formulación del concreto. El objetivo principal de esta investigación se enfocó en evaluar el comportamiento del esfuerzo a compresión, esfuerzo a flexión y el módulo elástico de morteros de cemento con adición de óxido biogénico de biochar obtenido a partir de la cascarilla de arroz, mediante el estudio de la afectación de los óxidos en el comportamiento de las propiedades de estos materiales. Para abordar este objetivo, se adoptó un enfoque de investigación experimental, donde se conservaron constantes algunas variables específicas y se consideraron otras como objeto de estudio. Para la elaboración de los morteros de prueba, se utilizaron: 18.6% de cemento, 4.65% de óxido de biochar, 63.9% de arena y 12.8% de agua. (Cemento: 18.6%, Arena: 63.9%, Agua: 12,8%, óxido biochar: 4.7%). Estadísticamente se comprueba que si hay una mejora positiva al aplicar óxidos biogénicos de biochar como reemplazo del cemento en la mezcla de concreto para mortero; ya que se conservaron las propiedades mecánicas de la mezcla y se observó un aumento considerable en el esfuerzo máximo.

Abstract

Over the years, concrete has been classified as an elemental component for people, becoming one of the most used materials worldwide, after water. However, its production has been estimated as one of the global processes with high atmospheric emissions of carbon dioxide, generates high energy consumption, excessive expenditure of natural resources and problems with the recycling of the waste that is generated. On the other hand, environmental pollution caused by agro-industrial waste and the limited availability of areas for its disposal; have justified the use of said waste as an alternative for partial replacement of cement in the concrete formulation. The main objective of this research focused on evaluating the behavior of the compressive stress, flexural stress and elastic modulus of cement mortars with the addition of biogenic oxide of biochar obtained from rice husk, through the study of the effect of the oxides in the behavior of the properties of these materials. To address this objective, an experimental research approach was adopted, where some specific variables were kept constant and others were considered as objects of study. To prepare the test mortars, 18.6% cement, 4.7% biochar oxide, 63.9% sand and 12.8% water were used. Statistically, it is proven that there is a positive improvement when applying biogenic biochar oxides as a replacement for cement in the concrete mixture for mortar; since the mechanical properties of the mixture were preserved and a considerable increase in the maximum stress will be observed.

1. Introducción

Son muchos los conocimientos y percepciones que se tienen acerca de los materiales que se utilizan en el campo de la construcción, siendo el cemento uno de los materiales que globalmente satisface las necesidades de formar cimientos resistentes e infraestructuras estables; es un material con buen comportamiento monolítico, presenta un alto nivel de resistencia mecánica a la compresión, toma la forma de cualquier molde y es de fácil aplicación (Camargo e Higuera, 2017). No obstante, su elaboración se ha estimado como uno de los procesos globales con altas emisiones atmosféricas de anhídrido carbónico, con un porcentaje aproximado del 7% de las emanaciones a nivel mundial (Benhelal et al., 2013); genera un alto consumo energético, gasto excesivo de los recursos naturales por la falta de conciencia de las empresas que lo producen y presentan arduos inconvenientes con el reciclaje de los residuos que generan (Khan et al., 2012).

Por otra parte, a medida que la industrialización avanza en todo el mundo, la contaminación ambiental ha sido un fantasma que lo ha perseguido constantemente debido a la poca disposición de áreas utilizadas como rellenos sanitarios; es por ello, que la industria moderna se ha visto obligada a mitigar los efectos ambientales ocasionados por los numerosos desechos residuales generados por estas.

Es por tal motivo que está surgiendo la opción de usar los residuos de la agroindustriales como una alternativa de sustitución parcial del cemento en los proyectos de construcción (Erazo et al., 2019). Dicho esto, a través de los años, la agroindustria colombiana se ha convertido en una potencial alternativa de estudio por su diversidad de biomásas residuales (Patiño, 2014); tal es el caso del uso de la cascarilla de arroz (CA), de la cual se han descubierto algunas aplicaciones en diferentes industrias (Hidalgo y Salinas, 2019).

A nivel global, se han venido ejecutando investigaciones relacionadas con el uso de residuos agroindustriales como material de sustitución parcial del cemento, los cuales han ocasionado diferentes efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto y, por lo tanto, han

sido estudios que se enfocaron en llevar la investigación más allá de la composición fisicoquímica del material y del porcentaje de materia prima residual utilizada.

Neuner et al., (2022), centraron su estudio en modelos continuos relacionados con la teoría de daños mecánicos y de plasticidad, con los cuales analizaron los efectos mecánicos del concreto de forma objetiva en condiciones de compresión y la tensión a la tracción; todo esto acompañado del análisis computacional de elementos finitos. De igual manera, Demin y Fukang (2017), enfocaron su investigación en examinar las características mecánicas del material de hormigón, por medio del análisis de elementos finitos y bajo las condiciones de tracción simple y compresión.

En consecuencia, los modelos de daño plástico se han convertido en un instrumento decisivo en la práctica de la ingeniería actual, por lo que esta investigación se enfoca en evaluar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de morteros fabricados a partir de la mezcla de ceniza de cascarilla de arroz y cemento, mediante el estudio de modelos de daño de plástico.

Por lo tanto el estudio de la viabilidad del uso del óxido biogénico de biochar de cascarilla de arroz como reemplazo el cemento en la mezcla para morteros como para concretos cobra una vital importancia, ya que siendo Córdoba una región agrícola cuenta con una basta fuente de recursos basados en este material, lo que no solo es beneficioso para la región o el país, también genera ventajas a la industria en general, al obtener una fuente extra de recursos para la construcción, un modelo de economía circular para la construcción de obras tanto públicas como privadas.

Al igual que genera una oportunidad de ser competentes en una industria moderna y globalizada para países en vía de desarrollo, los cuales por lo general son países agricultores con poca industria capaz de crear productos de valor agregado y que, aunque no cuentan con una industria sólida si cuentan con grandes volúmenes de residuos agrícolas.

Por lo tanto, considerando el caso de Colombia, específicamente en el departamento de Córdoba siendo esta una región agrícola por excelencia, ¿cómo podría esta aportar una solución viable aprovechando su importancia como región agrícola mediante la creación de nuevos materiales de construcción sostenibles a través de la sustitución de cemento por óxido biogénico de biochar sacado de la cascarilla de arroz como modelo de economía circular para procesos de construcción sostenible?

Así mismo se realizó la siguiente propuesta para solventar las vicisitudes dadas con anterioridad, dando como objetivo general de esta investigación se tiene la evaluación del comportamiento del esfuerzo y módulo elástico de morteros de cemento con adición de óxido biogénico de biochar obtenido a partir de la cascarilla de arroz, mediante el estudio de la afectación de los óxidos en el comportamiento de las propiedades de estos materiales. (Cemento: 18.6%, Arena: 63.9%, Agua: 12,8%, óxido biochar: 4.65%).

Para esto se precisa desarrollar una metodología para la elaboración de morteros de concreto con adición de óxido biogénico de biochar por medio de la pirolisis de la cascarilla de arroz, aplicando la norma ASTM C109-21 para visualizar el efecto de este en las propiedades mecánicas de los morteros, luego un análisis de las propiedades mecánicas del mortero con óxidos biogénicos adicionados, mediante ensayos de compresión y flexión, para estudiar la evolución de las resistencias máximas y módulos elásticos, que permita desarrollar un modelo inferencial con los resultados de los ensayos a compresión y flexión que permita validar el efecto de la adición de óxidos biogénicos en los morteros.

2. Marco teórico

2.1.El Cemento

El cemento hidráulico está formado por una diversidad de elementos y compuestos; en su mayoría, óxidos de calcio, sílice, hierro y aluminio (Padilla et al., 2017). El cemento es considerado como el material aglutinante más importante en las construcciones, que luego de combinarlo con el agua, se produce una mezcla moldeable capaz de solidificarse dentro o fuera del agua (Igliński y Buczkowski, 2017).

El cemento reacciona químicamente al entrar en contacto con el agua, haciendo que la mezcla se solidifique. A dicho fenómeno químico se le conoce como hidratación, el cual consiste en combinar el cemento con el agua para crear una mezcla pastosa; esta a su vez, al adicionarle agregados como arena y piedra, producen el concreto, material maleable de uso relevante en la construcción (Fonseca y Díaz, 2020).

2.2.Resistencia Mecánica del Cemento

La resistencia mecánica del cemento madurado es la característica más importante al momento de requerir este material para usos estructurales. La forma más sensata de medir esta propiedad, es por medio de ensayos en probetas fabricadas con la mezcla de cemento y agua; puesto que se restringe la propagación de los resultados cuando se utilizan probetas de mezclas con agregados gruesos o finos (concretos o morteros); sin embargo, en varios estudios se ha observado que la resistencia mecánica de algunos cementos difiere al ensayar con probetas, lo que ha determinado el mal cálculo de la resistencia mecánica con solo mezcla de cemento y agua (Sánchez,1996).

Con lo anterior, se pensaría que esta propiedad se debería medir en probetas fabricadas de concreto, puesto que es donde más se utiliza el cemento; no obstante, el gran volumen de los

especímenes y el conflicto de adquirir agregados gruesos certificados, impiden la utilización de ensayos en especímenes de concreto para la calificación del cemento. Dicho esto, se considera el empleo de morteros a nivel mundial, para la aplicación de ensayos de resistencia mecánica y calificación del cemento (Sánchez, 1996).

2.3. Morteros

En el ámbito de la construcción, se considera mortero a la mezcla de cemento, agua y agregados finos (arena), utilizado en el levantamiento de muros o empañetado de los mismos (Sánchez, 1996); también aportan comportamientos estructurales como la resistencia a la compresión, que proporciona resistencia a las cargas estructurales de tipo vertical (Castro et al., 2021). La clasificación de los morteros se tipifica desde su diseño estructural dependiendo del valor de la resistencia a la compresión: tipo I, resistente a la compresión con un valor mayor o igual a 12.5 MPa (125 kg/cm²); tipo II, resistente a la compresión con un valor mayor o igual a 7.5 MPa (75 kg/cm²) (Castro et al., 2021).

2.4. El Concreto

A través de los años, el concreto se ha catalogado como un componente elemental para las personas, hallándose en cada una de las infraestructuras usadas por el hombre para desenvolverse en su diario vivir. Autopistas, edificaciones, aulas de clase, hogares, estanques; son algunas de las aplicaciones que han convertido el concreto en uno de los materiales más usado a nivel mundial, después del agua (Matallana, 2019).

El concreto es considerado como un material hidráulico compuesto, elaborado con cemento, agregados, agua y aditivos. El primero es el componente que proporciona la unión entre los agregados; mientras que el segundo, proporciona la resistencia y el peso. El agua es necesaria para activar el cemento formando una pasta que une los aditivos los cuales se utilizan para mejorar las propiedades del concreto.

2.5. Propiedades Mecánicas del Concreto

Las propiedades mecánicas del concreto son importantes para determinar su comportamiento bajo carga.

Las propiedades mecánicas más importantes del hormigón son: la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y la resistencia a la tracción. La resistencia a la compresión es la capacidad del concreto para soportar cargas aplicadas perpendicularmente a su superficie hasta fallar. La resistencia a la flexión es la capacidad del concreto para soportar cargas aplicadas en un plano perpendicular a su superficie. La resistencia a la tracción es la capacidad del concreto para soportar cargas aplicadas en un plano paralelo a su superficie hasta romperse. (American Concrete Institute (A.C.I). (2019))

El biocarbón es un material sólido que se obtiene de la pirólisis de la biomasa, que es un proceso térmico en ausencia de aire. El biocarbón tiene una alta superficie específica y una estructura porosa, lo que le confiere propiedades únicas. (Lehmann, J., & Joseph, S. (2009))

El óxido biogénico de biochar (B.O.B) es un producto de la oxidación del biochar. El B.O.B se produce mediante la exposición del biochar al aire durante un período prolongado de tiempo. El B.O.B tiene una estructura más densa que el biochar lo que lo confiere de una mayor resistencia a la compresión y a la flexión y tiene una menor capacidad de absorción de agua. (Hernández-Olivares, J., & Pérez-Martínez, J. (2015))

El objetivo de este estudio fue evaluar cómo el B.O.B afecta las propiedades mecánicas del concreto. Para ello, se realizaron pruebas de compresión y flexión a muestras de concreto con y sin B.O.B en la proporción óptima encontrada en un estudio anterior

2.6. Propiedades del óxido biogénico de biochar.

El B.O.B. tiene una serie de propiedades mecánicas que pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto. El B.O.B. es más denso que el biochar, lo que lo hace más resistente a la compresión. El B.O.B. también tiene una menor capacidad de absorción de agua, lo que puede mejorar la resistencia a la flexión y la resistencia a la tracción. ((Li, H., Wang, M., Yang, Q., & Zhang, Q., 2014))

El modelo material de plasticidad del daño del hormigón representa un modelo constitutivo que se basa en una combinación de la teoría de la plasticidad y la teoría de la mecánica del daño. Este modelo de material se utiliza a menudo para resolver problemas geotécnicos debido a su descripción realista del comportamiento mecánico del material de hormigón.

Se prevé que el B.O.B. mejore la resistencia del concreto a la compresión y a la flexión. En concreto, se espera que el concreto con B.O.B. sea más resistente a la compresión y a la flexión que el concreto convencional.

Este estudio podría ayudar a crear un nuevo tipo de concreto con propiedades mejoradas. El concreto con BOB podría utilizarse en una variedad de aplicaciones, como la construcción de edificios, carreteras y puentes.

2.7. Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz (CA) es un residuo agrícola enmarcado en la categoría de cereales, es una fibra que envuelve y protege el grano de arroz de microorganismos y otras fuentes de contaminación; está compuesta por elementos como celulosa y sílice, los cuales son valiosos a la hora de obtener un buen comportamiento como combustible. Debido a su alto contenido energético, la cascarilla de arroz se ha convertido en un material alternativo para la producción de energía, figurando como una contribución a la conservación de las riquezas

naturales y al desarrollo de nuevas tecnologías que aportan valor agregado a la producción de arroz (Valverde et al., 2007).

Según Sierra (Sierra, 2009), la cascarilla de arroz representa un promedio del 20% en masa del grano y su poder calorífico está alrededor de los 16,72 MJ/-kg; tiene forma ondulada y superficie de aspecto irregular, su longitud se encuentra entre los 5 y 11 mm teniendo en cuenta la variedad. Está compuesta en promedio por 34,4% de celulosa, 24,3% de hemicelulosa y un 19,2% de lignina. Su composición elemental está constituida por 37,05% de carbono, 8,80% de hidrógeno, 11,06% de nitrógeno, 35,05% de oxígeno y 9,01% de silicio (Díaz, 2019).

La cascarilla de arroz es un residuo agroindustrial con pocas aplicaciones. Sin embargo, su elevado contenido de sílice amorfa lo ha convertido en una materia prima prometedora, especialmente por su posibilidad de transformarse en un complemento de cemento para mezclas de hormigón. La investigación de materiales vegetales como nuevas fuentes de sílice amorfa de alta calidad tiene una serie de ventajas importantes que dan como resultado un proceso que puede implicar menos pasos de lo habitual (Salazar et al., 2015).

2.8. Propiedades mecánicas por estudiar

Esfuerzo (S): El esfuerzo es la fuerza aplicada a un material dividida por su área. Se mide en megapascales (MPa).

Esfuerzo sobre esfuerzo máximo (S/S_{max}): Este es un parámetro que indica la relación entre el esfuerzo aplicado y el esfuerzo máximo que puede soportar el material.

Módulo elástico (E): El módulo elástico es una medida de la rigidez de un material. Se mide en gigapascales (GPa).

3. Estado del arte

A nivel global, se han venido ejecutando investigaciones relacionadas con el uso de residuos agroindustriales como material de sustitución parcial del cemento, los cuales han expuesto comportamientos relevantes en las propiedades físicas y mecánicas del concreto; investigaciones que se han enfocado en evaluar más allá de la composición fisicoquímica del material y del porcentaje de materia prima residual utilizada. A continuación, se citan una serie de antecedentes relevantes de investigaciones relacionadas con el uso de CCA en la fabricación de morteros de concreto.

Angulo y Viera (Angulo y Viera, 2019), realizaron su investigación con el objetivo de evaluar el comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto al utilizar ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como material sustituto del cemento, en proporciones del 10%, 20% y 30%; partiendo de una mezcla específica con una resistencia de 17,23 MPa. Para la realización de la investigación, los autores iniciaron con la caracterización del material adquirido de la industria arrocera de la ciudad de Montería, la cual mostró un porcentaje total de sílice del 89,20%, de los cuales, el 25,4% se encontraba en estado amorfo con un tamaño máximo de 155,28 μ m. El segundo paso fue la elaboración de probetas con tiempos de fraguado de 7, 14 y 28 días; junto con la muestra patrón formulada sin adición de CCA. Ya con las probetas creadas, Angulo y Viera, las sometieron a ensayos de compresión y flexión, recopilando la información y analizándola por medio del método estadístico de varianza (ANOVA).

Con los resultados obtenidos del análisis, los autores concluyeron que la proporción óptima de CCA para sustituir el cemento es la de 10% con un fraguado de 28 días; puesto que alcanzó los valores de resistencia a la compresión más cercanos a la muestra de control, con un valor de 10.64 MPa logrando un porcentaje de 61.75% de la resistencia citada. También concluyeron, que el porcentaje de sustitución de cemento por CCA con resistencia más bajas

es del 30%, con un valor de 4.68 MPa a los 28 días de fraguado. En las recomendaciones, los autores atribuyen los resultados obtenidos a la inadecuada aplicación de la temperatura en el proceso de obtención de la CCA (726°C a 760°C); ya que la temperatura adecuada para adquirir un material amorfo está entre los 650°C y los 700°C. En la Tabla 1: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado. se observan los resultados que obtuvieron al realizar el ensayo a compresión de las muestras con 28 días de curado.

Tabla 1: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado

Probetas	Resistencia a la compresión (Mpa)
Control	18,34
10% CCA	10,64
20% CCA	7,75
30% CCA	4,68

Fuente: (Angulo y Viera, 2019)

Jarre et al. (Jarre et al., 2021), centraron su estudio en la posibilidad de obtener ceniza de cascarilla de arroz (CCA) con alto potencial para sustituir el cemento Portland usado en la formación de concreto; para ello, evaluaron la caracterización de la ceniza obtenida de la incineración controlada de la cascarilla de arroz producida en el territorio de Macabí Ecuador. El objetivo principal de esta investigación fue determinar, con la mayor exactitud posible, la cantidad y la calidad de la sílice contenida en la CCA, para su potencial utilización en la elaboración de morteros. Para ello, los autores iniciaron su investigación desde la elección, acondicionamiento y combustión controlada de especímenes representativos de cascarilla de arroz (CA), continuando con la caracterización de esta, hasta llegar al análisis de las propiedades de la ceniza obtenida.

Los procedimientos usados como la Espectroscopia de Resonancia Magnética Nuclear o Ensayo de Absorción Nuclear demostraron la eficacia para precisar la porción en peso de sílice obtenido de la caracterización de la CA. De igual forma, con los procedimientos de Espectroscopia de Fluorescencia Molecular y Cristalografía de Rayos X, se caracterizaron las cenizas obtenidas en estado amorfo y cristalino; adquiridas de la combustión a distintas temperaturas y tiempos de exposición. En la Tabla 2: Análisis del porcentaje de ceniza obtenida de la CA por región., se expone el porcentaje de ceniza obtenida de cada muestra de CA estudiada.

Tabla 2: Análisis del porcentaje de ceniza obtenida de la CA por región.

Zona	%
Paján	15,0
Santa Ana	18,0
San Eloy	15,81
Rocafuerte	17,26
Chone	14,30

Fuente: (Jarre et al., 2021)

De igual forma, Ogowang et al. (Ogowang et al., 2021), evaluaron las propiedades y la composición de la ceniza obtenida de la cascarilla de arroz (CA) generada del procesamiento de diversidades de arroces. Los investigadores obtuvieron el material de estudio, a partir de la incineración de la CA a distintos grados de temperatura (600°C, 800°C y 900°C) por un tiempo de exposición de 3 horas. Esta investigación tuvo como objetivo principal, determinar la composición de sílice amorfa y cristalina al caracterizar la CCA de la diversidad de arroces cosechados en Uganda, África Oriental; mediante la implementación de las técnicas espectroscópicas de fluorescencia (FRX) y difracción (DRX) de rayos X. El contenido amorfo obtenido, se dispuso para la formulación de morteros geopoliméricos (A base de cementantes alternativos).

Con todos los ensayos ejecutados, los investigadores obtuvieron un contenido de ceniza del 18,3% y 28,6% entre las variedades procesadas. De los análisis FRX realizados, se observa un volumen de sílice oscilante entre el 89,07% y 95,65% en peso, producido en estructura amorfa y cristalina a temperaturas de combustión de 600°C y 900°C, respectivamente; siendo este, el rango de temperatura donde se transforma la ceniza de forma amorfa a cristalina. En la Tabla 3: Resultados de ensayo FRX para CCA, se exponen los resultados obtenidos en el ensayo espectroscópico FRX, donde se observa que la muestra K 98 produjo el porcentaje de óxido de silicio más alto, con un 94,91% a 600°C. Con los resultados obtenidos, se expone la importancia de realizar un proceso de combustión controlada para la obtención de cenizas con alto porcentaje de sílice amorfa, con la que se pueda aplicar como alternativa potencial en la producción de morteros.

Tabla 3: Resultados de ensayo FRX para CCA

MUESTRAS	TEMPERATURA (°C)	ÓXIDO DE SILICIO (SiO₂)
K 98	600	94.91
K 98	800	95.63
K 98	900	95.65
PUSA 9	600	94.5
PUSA 9	800	94.86
PUSA 9	900	93.81
NERICA 10	600	89.57
NERICA 10	800	89.45
NERICA 10	900	89.07
NERICA 4	600	91.38
NERICA 4	800	90.61
NERICA 4	900	89.65
Kaolin	-	55.78

Fuente: (Ogwang et al., 2021)

Mejía y Cuitiva (Mejía y Cuitiva, 2022), evaluaron la posibilidad de sustituir cemento con materia prima biogénica como ceniza de cascarilla de arroz, para la elaboración de material de relleno cementante sostenible; esto con el fin de analizar los efectos de esta mezcla en las propiedades mecánicas de compresión y flexión de los morteros elaborados. Para desarrollar el objeto de estudio de esta investigación, los autores utilizaron la máquina universal para implementar métodos de ensayos a compresión y a flexión, partiendo de la normativa de la Sociedad Americana ASTM C109 y ASTM C78; respectivamente. Las muestras involucradas en las pruebas tuvieron un tiempo de fraguado de 7, 28 y 90 días; constituidas por una probeta modelo sin material biogénico y dos probetas con una sustitución parcial del 5% con dos tipos de óxidos biogénicos (Tipo C y AAA).

De los resultados obtenidos, los investigadores resaltan una resistencia a la compresión y flexión de 53.93 Mpa y 2.205 Mpa, respectivamente; para las muestras modelo, elaboradas con cemento, agua y arena de Ottawa. Para las muestras con sustitución de cemento, evidenciaron una resistencia a la compresión promedio de 28 Mpa a 90 días de fraguado para la mezcla con óxido biogénico tipo C; mientras que para la mezcla con óxido biogénico AAA, la resistencia a la compresión promedio estuvo en 13.44 Mpa. En cuanto a la resistencia a la flexión, la mezcla con óxido tipo C alcanzó los 7.2 Mpa a los 90 días; mientras que la mezcla con óxido AAA, logró alcanzar los 5.6 Mpa. Mejía y Cuitiva, concluyeron que la mezcla con óxido tipo C, presenta mejores condiciones mecánicas al compararlo con la mezcla con óxido AAA. También concluyen que en la mezcla con óxido tipo C, se podría llegar a sustituir la mezcla agua - cemento en un 20% para obtener resultados favorables en la resistencia a la compresión.

Vargas, J. (Vargas, J., 2023), basó su investigación en algunos estudios realizados con el impacto ambiental causado por la generación de cascarilla de arroz y la producción de cemento a nivel mundial; así mismo, con el análisis de las propiedades físicas y mecánicas del concreto al usar ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como sustituyente parcial del cemento. Su objetivo fue indagar acerca de los rasgos mecánicos y físicos del concreto al

agregar ceniza de cascarilla de arroz en su formulación; con el fin de analizar su comportamiento a partir de una muestra de control con una resistencia a la compresión de 280 kg/cm².

Para la realización de las pruebas de laboratorio, Vargas, J. elaboró 126 muestras cilíndricas y 60 muestras cúbicas, para un total de 186 ejemplares; utilizando un porcentaje de sustitución de 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5 % y 0% para la muestra de control; con un tiempo de fraguado con agua de 7, 14 y 28 días. Con los resultados obtenidos, el investigador concluye que la sustitución de CCA adquirida a 750°C, con un porcentaje de sílice del 88,4%; mejora considerablemente las propiedades físicas y mecánicas del concreto, al incrementar la resistencia a la compresión, a la flexión y el módulo de elasticidad; con un porcentaje óptimo de sustitución del 7,5% con una edad de fraguado de 28 días. En comparación con la muestra de control, el porcentaje óptimo de sustitución obtenido y el tiempo de fraguado adecuado; se observa un incremento del 2,65% en la resistencia a la compresión, un 3,77% a la flexión y un 6,73% del módulo elástico. En la Tabla 4: Resistencia a la compresión y alcance por días de curado. y en la Tabla 5: Resumen del Módulo Elástico promedio obtenido., se exponen los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión y el módulo elástico.

Tabla 4: Resistencia a la compresión y alcance por días de curado.

DIAS	Descripción	Adición en (%)					
		0%	2.5%	5%	7.5%	10%	12.5%
7	Resistencia Compresión Kg/cm2	224.01	211.29	211.94	216.14	215.57	183.84
	% de alcance	80.00	75.46	75.69	77.19	76.99	65.66
14	Resistencia Compresión Kg/cm2	235.36	228.29	230.09	239.03	231.67	206.83
	% de alcance	84.06	81.53	82.17	85.37	82.74	73.87
28	Resistencia Compresión Kg/cm2	288.72	276.21	278.69	296.38	279.37	263.90
	% de alcance	103.11	98.65	99.53	105.85	99.77	94.25

Fuente: (Vargas, J., 2023)

Tabla 5: Resumen del Módulo Elástico promedio obtenido.

Sustitución	Edad (Días)	Ec Prom
%		Kg/cm ²
0	7	281587,54
	14	273995,16
	28	293575,41
2,5	7	277701,4
	14	278016,48
	28	276693,43
5	7	266359,17
	14	273735,84
	28	271542,11
7,5	7	211281,67
	14	249132,17
	28	313327,74
10	7	236941,95
	14	243357,88
	28	296872,65
12,5	7	185283,32
	14	189786,2
	28	304506,83

Fuente: (Vargas, J., 2023)

Uno de los estudios investigados por Vargas, J., es el de Álvarez, C. y Orado, A. (Álvarez y Orado, 2023), quienes evaluaron la influencia de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), como sustituto parcial del cemento, en las características físicas y mecánicas del concreto. Para este estudio, los autores utilizaron reemplazos porcentuales del 5%, 10%, 15% y 20% de cemento por CCA; con el objeto de igualar una resistencia de 210 kg/cm² de la muestra patrón. Para ello, se fabricaron 90 muestras de las cuales, el 50% de forma rectangular y el otro 50% de forma cilíndrica.

Los resultados fueron recopilados en hojas de datos obtenidos de los análisis realizados en campo, permitiendo recolectar información real y específica del comportamiento observado de los ensayos de compresión y flexión ejecutados en las muestras fabricadas, durante

períodos de 7, 14 y 28 días. En primer período, los investigadores obtuvieron una resistencia a la compresión de 183,63 kg/cm² para la muestra patrón, comparado con un valor positivo de 138,35 kg/cm² obtenido con un porcentaje de reemplazo del 5%, y un valor negativo de 59,28 kg/cm² con el 20% de reemplazo. De igual forma se realizaron ensayos con los períodos de fraguado de 14 y 28 días, obteniendo valores para las muestras patrón de 198,60 kg/cm² y 229,56 kg/cm², respectivamente; comparados positivamente con los valores de 161,05 kg/cm² y 204,70 kg/cm²; conseguidos con un reemplazo del 5%. Para los ensayos a flexión, se consiguieron resistencias del 14,43 kg/cm², 16,60 kg/cm² y 23,87 kg/cm², para la muestra patrón; comparándolos con valores de 12,53 kg/cm², 13,97 kg/cm² y 16,63 kg/cm², obtenidos con un reemplazo del 5% de CCA, con períodos de fraguado de 7, 14 y 28 días. Los autores concluyeron que los mejores valores se obtuvieron con reemplazo porcentual del 5%; mientras que, los valores más bajos se lograron con 20% de reemplazo de CCA.

Kinnane, Pavía y Costigan (Costigan et al., 2015) en su artículo contribuyen al entendimiento de la resistencia y deformación del mortero de cal para mampostería, que determina la durabilidad y las tensiones/deformaciones permitidas en los códigos de diseño, mediante la medición de las propiedades mecánicas de ladrillos unidos con mortero de cal y cal-cemento.

A través del análisis de regresión de los resultados experimentales, se proponen modelos para estimar la resistencia a compresión del mortero de cal para mampostería (menos precisos para la cal hidratada CL90s debido a la disparidad entre las resistencias del mortero y el ladrillo). También se proponen tres relaciones entre el módulo elástico del mortero y su resistencia a compresión para el mortero de cemento-cal, cal hidráulica (NHL3.5 y 5), y cal hidratada/de baja hidraulicidad, respectivamente.

La discrepancia entre los resultados experimentales y los modelos matemáticos de predicción anteriores (propuestos principalmente para el cemento de mampostería) se debe a la falta de consideración para la deformación significativa de la cal para mampostería y los cambios relativos en resistencia y rigidez entre el mortero y el ladrillo con el tiempo (a los 6 meses y 1 año, los morteros NHL3.5 y 5 son a menudo más fuertes que el ladrillo). El Eurocódigo 6

proporcionó las mejores predicciones para la resistencia a compresión de la cal para mampostería y cal-cemento basándose en la resistencia de sus componentes. Sin embargo, todos los modelos sobreestimaron ampliamente la resistencia de la mampostería de CL90s a los 28 días; no obstante, el Eurocódigo 6 se volvió un predictor preciso después de 6 meses, cuando el mortero había adquirido la mayor parte de su resistencia y rigidez final.

Los resultados experimentales concordaron con las antiguas curvas de esfuerzo-deformación. Se evidenció que el mortero tiene un fuerte impacto en la deformación de la mampostería y que la relación esfuerzo/deformación de la mampostería se vuelve cada vez más no lineal a medida que la resistencia del mortero disminuye. También se observó que la influencia de la rigidez de la mampostería en su resistencia a compresión disminuye a medida que aumenta la hidraulicidad del mortero.

4. Metodología

Esta investigación se llevó a cabo como apoyo al semillero SEMIFAE de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería. El objetivo principal de este proyecto se enfocó en evaluar la viabilidad de utilizar óxidos de biochar en la creación de materiales de construcción sostenible. Para abordar este objetivo, se adoptó un enfoque de investigación experimental, donde se conservaron constantes algunas variables específicas y se consideraron otras como objeto de estudio.

La metodología empleada en este proyecto se basó en la formulación de un proceso que permitiera recopilar información relevante sobre el impacto del óxido biogénico de biochar en las propiedades mecánicas de morteros de concreto, con especial atención en el módulo elástico y el esfuerzo máximo. La recopilación de datos se llevó a cabo a medida que avanzaba el proceso de investigación, lo que permitió obtener información valiosa sobre el comportamiento de estos materiales en condiciones específicas.

La investigación consta de tres pasos. En el primero, se formulan los parámetros para la extracción del óxido biogénico de biochar a partir de la pirolisis de la cascarilla de arroz. En el segundo paso, se caracterizan los parámetros necesarios para la construcción de las probetas y los ensayos, siguiendo los requisitos de la norma ASTM C109-21. Por último, se aplica un tratamiento estadístico a los datos recolectados para su análisis.

4.1. Extracción de óxido de biochar.

Para el proceso de extracción del óxido de biochar, se utilizó cascarilla de arroz como materia prima expuesta a un proceso de pirólisis a 700 °C durante 8 horas de exposición; esto con el fin de asegurar que toda la cascarilla se oxidara de manera uniforme y poder obtener una ceniza grisácea.

Posterior al proceso de transformación termoquímica, se realiza un proceso de molienda (molino de bolas fabricado de forma artesanal para el soporte de las actividades del semillero SEMIFAE, con un motor de 0.5 HP, sección de tubo de PVC de 10,16 cm de diámetro y 30 de largo para la cámara de molienda y bolas de acero de 5 cm de diámetro) en el cual se muele la cascarilla de arroz que ha sido oxidada para disminuir el tamaño de la partícula previamente al proceso de tamizado, cabe destacar que sin el proceso de la molienda el tamaño la partícula habría imposibilitado un correcto tamizaje.

4.1.1. Secado previo

Antes de moler y tamizar el óxido de biochar, se realiza un secado previo a una temperatura de 100°C durante una hora, para 40 gramos de biochar lo cual era la capacidad máxima permitida por la mufla para eliminar la humedad absorbida. Esto ayuda a evitar la formación de grumos, que pueden dificultar el paso del óxido por el tamiz.

4.1.2. Tamizado

El óxido de biochar se tamiza con una malla número 325 para lograr una granulometría similar a la del cemento. Esto permite que el óxido se integre de una mejor manera a la mezcla, cuando se reemplaza parte del cemento por este.

En la Figura 1: Proceso de extracción del óxido de biochar, se describe paso a paso el proceso para obtener el óxido de biochar de cascarilla de arroz.



Figura 1: Proceso de extracción del óxido de biochar

4.2. Características técnicas de los equipos utilizados

Tabla 6: Especificaciones técnicas de la mufla.

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: Especificación técnicas del molino

Marca: Siemens	1LA7070-4YA60.
Capacidad	0.5 Hp.
Peso	4.7 Kg.
Frecuencia	60 Hz.
Velocidad máx.	1590 rpm.
Eje	2.7 In.
Voltaje	220/440
Amperaje	1.9/0.95 A.

Tabla 8: Especificaciones técnicas maquina universal.

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 9513Class 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		2133 x 1230 x 870/ 2360 x 1215 x 960
Longitud extendida		2433 x 1230 x 870/ 2760 x 1215 x 960
Longitud estándar	kg	1400/1700
Longitud extendida	kg	1480/1795

4.3. Elaboración y alistamiento de morteros.

Para la fabricación de los morteros a evaluar, se eligió el uso de cemento argos; ya que cumplen con los valores de la Norma Técnica Colombiana NTC 121 (Tipo UG), lo que nos permite tener un cemento estandarizado y de fácil acceso debido a que es comercializado habitualmente en el país. Con el fin de abaratar costos para la muestra patrón se usó arena extraída del río Sinú de la ciudad de Montería, Córdoba; y para el modelo formulado con óxido de biochar se usó arena de Ottawa, las cuales fueron tamizadas siguiendo los parámetros establecidos por la norma ASTM C33-22 y poder obtener ciertos estándares de calidad, garantizando la granulometría y módulo de finura para que sean adecuados en la fabricación de los morteros.

Tanto para el primer patrón como para el modelo optimizado con óxido de biochar, se utilizó agua destilada con el objeto de evitar impurezas que puedan afectar el resultado. En el **Grupo de Figuras**, se describen los materiales y moldes utilizados para fabricar los morteros de muestra.

4.3.1. Cantidad de muestras y tiempo de curado

En la norma ASTM C109-21 se establece que se deben utilizar al menos tres probetas para llevar a cabo pruebas de compresión. Sin embargo, con la intención de reducir la incertidumbre en los resultados, se prefirió fabricar para el patrón número uno, dos tandas de diez probetas de compresión y nueve para flexión, para curados de 7 y 28 días respectivamente cada tanda, en el caso del patrón 2 (con óxido de biochar) se optaron por la fabricación dos tandas de 5 probetas de compresión y 6 para flexión para 7 y 28 días respectivamente cada tanda. en lugar de tres, como lo indica la norma original.

Grupo de Figuras 1: Proceso de elaboración y alistamiento de morteros



Cemento

- Cemento portland producido en Colombia, de alta calidad y que cumple con las normativas nacionales e internacionales.

Figura 2: Cemento Portland Argos



Arena

- Extraída del río Sinú de la ciudad de Montería, Córdoba previamente tamizada.

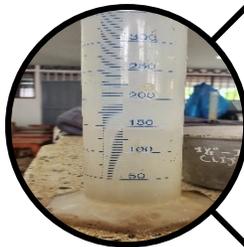
Figura 3: Arena extraída del río Sinú



Arena de Ottawa

- Es una arena fina de sílice que cumple con las normas (ASTM), se caracteriza por su alta pureza. presentación 22.68Kg

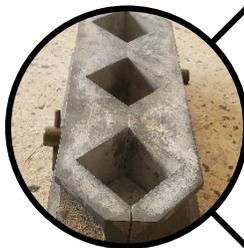
Figura 4: Arena de Ottawa



Agua destilada

- El agua de mezclado se obtiene mediante la destilación del agua del sistema hídrico de la ciudad de Montería.

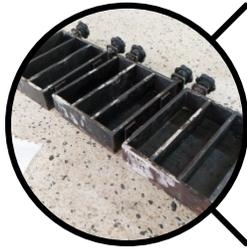
Figura 5: Agua destilada



Molde de Compresión

- Este molde nos permite obtener 3 muestras de 5cm x 5cm x 5cm, cumpliendo con la normativa ASTM c109-23.

Figura 6: Molde de compresión



Molde de flexión

- Este molde nos permite obtener 3 muestras por vez de 4cm x 4cm x 16cm, cumpliendo con la normativa ASTM C1138/C1138M-21.

Figura 7: Molde de flexión

4.4. Ensayos Máquina Universal

Para la realización de los ensayos en la máquina universal, luego de esperar el tiempo de curado de los morteros, se tuvo en cuenta el procedimiento de la norma ASTM C39-21, donde se describe que al momento de someter el concreto a una carga, no todo depende de la mezcla realizada; también se tiene en cuenta la manera en que la geometría y el tamaño de la probeta afecta el resultado, así como también, las condiciones de humedad, la temperatura durante el curado, el procedimiento a la hora de hacer la mezcla, el procedimiento a la hora del muestreo, moldeo, fabricación y la edad de la muestra.

Es por esta razón que la norma establece que se deben realizar los especímenes con base a las normas ASTM C31-03, ASTM C192-06, ASTM C617-15, ASTM C1231-001, C42-03 y ASTM C873-10A; para asegurar el control de la calidad de las proporciones, mezclado y colocación de la muestra y el control de la evaluación de la eficacia del aditivo utilizado.

Por lo anterior, se determinaron los parámetros para ejecutar el ensayo de compresión: morteros de 50 mm de ancho, largo y profundidad, los cuales fueron fallados con una velocidad de avance en la cruceta de 0.25mm/min para igualar en la medida de lo posible la velocidad de carga establecida por dicha norma de 0.25 MPa/s.

Para el caso de los ensayos a flexión, como establece la norma, los requerimientos de fabricación de las probetas son: 40 mm de ancho, 40 mm de alto y una profundidad de 160 mm. También se establece que para este caso los morteros, se deben tener dos puntos de

apoyo con una distancia de 120 mm y la carga debe ser aplicada justo en la mitad de estos apoyos para que el esfuerzo sea lo más homogéneo posible a lo largo de la muestra; igualmente se fallaron con una velocidad de avance en la cruceta de 0.25 mm/min debido a que la maquina universal disponible no permitía programar el avance en MPa/s, garantizando así el cumplimiento de la norma.

En él, Grupo de Figuras 2 se evidencian los distintos tipos de morteros elaborados y una breve explicación de los ensayos realizados.

Grupo de Figuras 2: Ensayos de compresión y flexión a morteros fabricados



Mortero de compresión

- Mortero de concreto fabricado según establece la norma ASTM para morteros de compresión, dimensiones de 5cm x 5cm x 5cm

Figura 8: Mortero de compresión



Mortero de Flexión

- Mortero de concreto fabricado con base a las indicaciones de la ASTM para morteros de concreto a flexión, dimensiones 16cm x 4cm x 4cm.

Figura 9: Mortero de flexión



Máquina Universal

- Este equipo de laboratorio permite realizar pruebas mecánicas en materiales con una gran versatilidad, siendo una herramienta esencial para la caracterización de materiales.

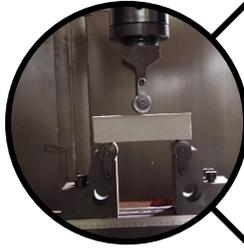
Figura 10: Máquina Universal – Laboratorio de mecánica, UPB Montería.



Montaje a Compresión

- Se aplica una carga de compresión axial a la muestra de material y se mide la fuerza requerida para romper la muestra.

Figura 11: Ensayo a compresión



Montaje a Flexión

- Montaje para ensayos a flexión para morteros de concreto, los apoyos se encuentran a 12 cm de distancia entre sí y la carga se ejerce en el centro de estos dos.

Figura 12: Ensayo a flexión

4.5. Análisis y tratamiento de datos.

Para el procesamiento de datos se utiliza el software ofimático Excel, con el objetivo de tener una herramienta de fácil manejo que nos permita procesar y analizar la información generada en el paso anterior. Se escoge esta herramienta por su flexibilidad y capacidad para realizar cálculos avanzados, aplicar fórmulas personalizadas y crear gráficos dinámicos útiles para interpretar los datos producidos por la maquina universal.

Para el caso específico de esta investigación, se utiliza Excel para el cálculo y el análisis de las siguientes propiedades mecánicas de los materiales evaluados:

Esfuerzo (S):

$$S = \frac{F}{A}$$

S = Esfuerzo

F = Carga Aplicada

A = Área

$$S_f = \frac{M * c}{I}$$

S_f= Esfuerzo a flexión

M = Momento de Flexión

c = Distancia del eje neutro

I = Momento de inercia

Esfuerzo sobre esfuerzo máximo (S/S_{max}): Este es un parámetro que indica la relación entre el esfuerzo aplicado y el esfuerzo máximo que puede soportar el material.

$$\frac{S}{S_{max}}$$

Módulo elástico (E):

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}$$

E = Módulo elástico

S = Esfuerzo

ε = Deformación unitaria

Nota: Kinnane, Pavía y Costigan (Costigan et al., 2015) en su investigación proponen que el Módulo elástico se calcula entre 30-50% del esfuerzo máximo alcanzado, Se evidenció que el mortero impacta fuertemente la deformación, y que la relación tensión/tensión de la se vuelve cada vez menos lineal a medida que disminuye la resistencia del mortero.

Una vez realizados estos cálculos, se generaron gráficas para representar los resultados obtenidos, estudiar el comportamiento del material bajo carga e identificar a partir de (S/S_{max}), los puntos máximos de las cargas. Las gráficas se iniciaron a partir de la misma carga, con el objeto de analizar el comportamiento de las muestras y examinar las condiciones más relevantes que se puedan resaltar.

4.5.1. Método de varianza ANOVA.

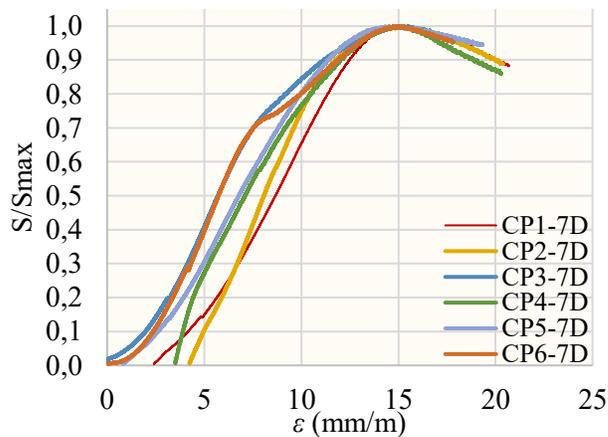
Luego de finalizar el tratamiento de los datos en EXCEL, se le aplicó el método de varianza ANOVA el cual se basa en el análisis de la varianza, que es la medida de la dispersión de los datos alrededor de su media. El ANOVA compara la varianza entre los grupos (la variación debida al efecto del factor o tratamiento) con la varianza dentro de los grupos (la variación debida al azar o al error). Si la varianza entre los grupos es mucho mayor que la varianza dentro de los grupos significa que hay una diferencia significativa en las medias de los grupos. Si la varianza entre los grupos es similar o menor que la varianza dentro de los grupos significa que no hay una diferencia significativa en las medias de los grupos.

Para realizar un ANOVA, se deben cumplir algunas condiciones, como que los datos sean independientes, que los grupos tengan una distribución normal y que los grupos tengan una varianza homogénea. Además, se deben definir las hipótesis nula y alternativa, que son las afirmaciones que se quieren contrastar con los datos. La hipótesis nula suele ser que no hay diferencia entre las medias de los grupos, mientras que la hipótesis alternativa suele ser que hay al menos una diferencia entre las medias de los grupos.

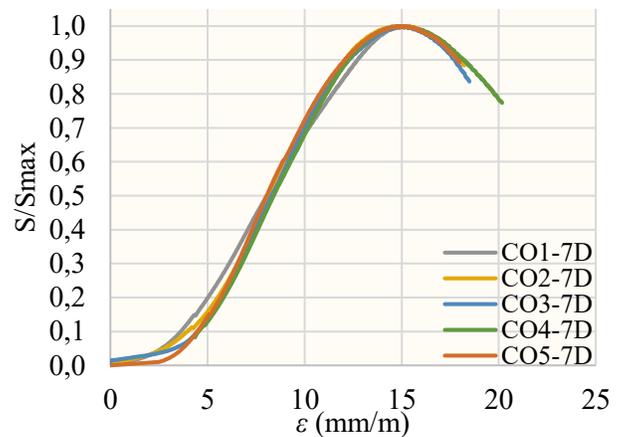
5. Resultados y Discusión.

Tras los resultados en el tratamiento de los datos, se obtuvieron las diferentes gráficas que permitirán un análisis a profundidad de las propiedades mecánicas evaluadas.

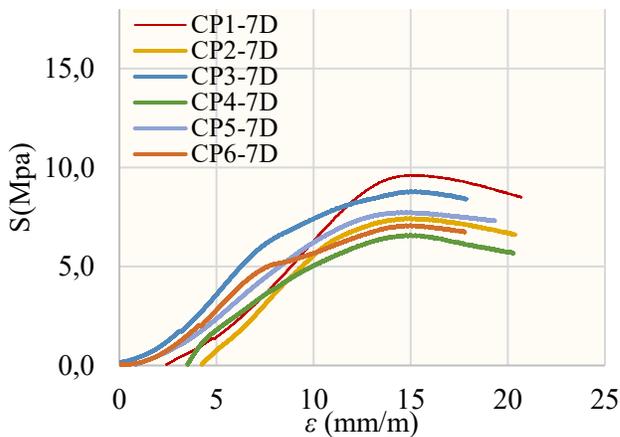
Grupo de Gráficas 1: Compresión con 7 días de curado



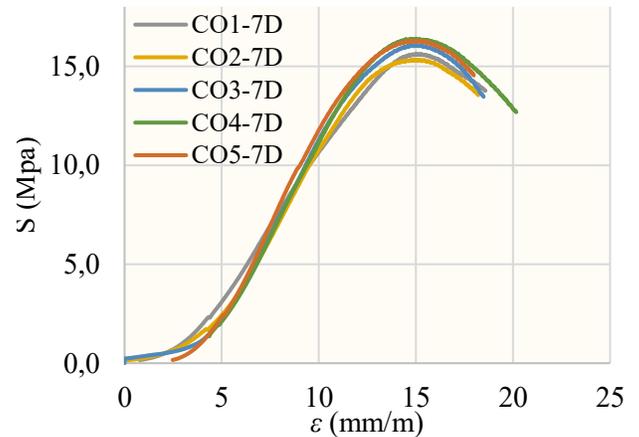
Gráfica 1. S/Smax vs ϵ . para el patrón de compresión.



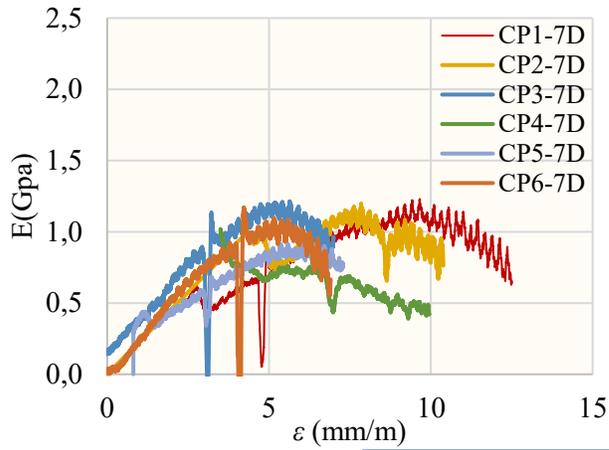
Gráfica 2. S/Smax vs ϵ . para la mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.



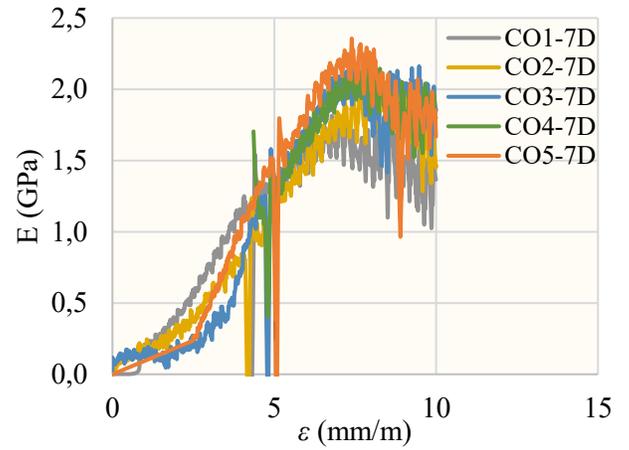
Gráfica 3. esfuerzo vs deformación unitaria para mezcla patrón.



Gráfica 4. esfuerzo vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.

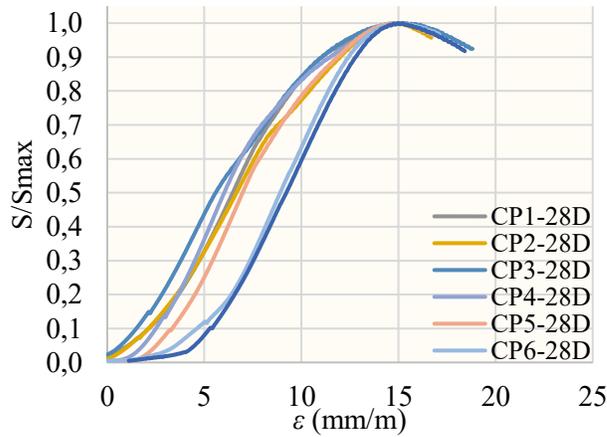


Gráfica 5. módulo elástico vs deformación unitaria para la mezcla patrón.

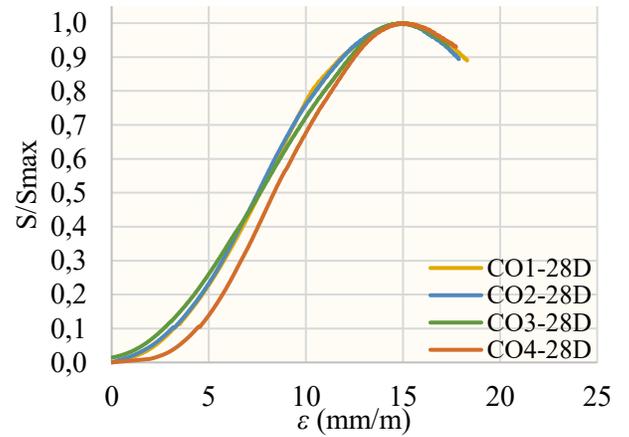


Gráfica 6. módulo elástico vs deformación unitaria para la mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.

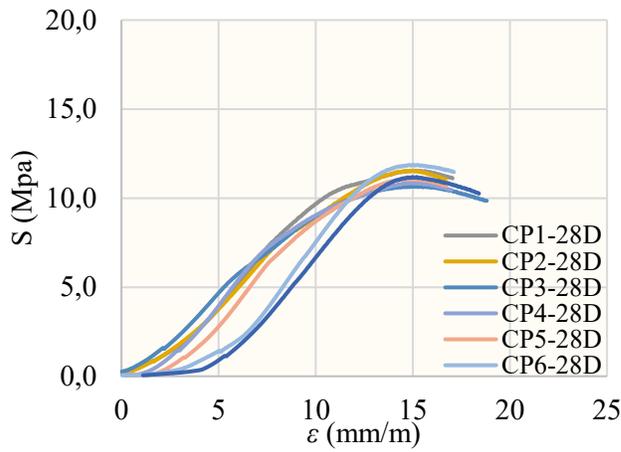
Grupo de Gráficas 2: Compresión con 28 días de curado



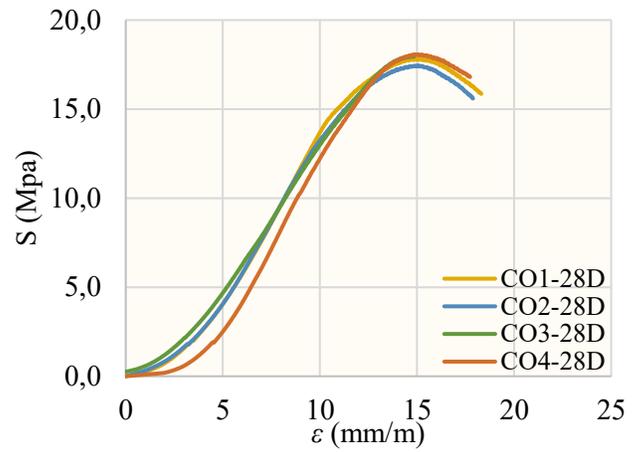
Gráfica 7: Resumen de gráficas de S/S_{max} vs deformación unitaria para mezcla patrón.



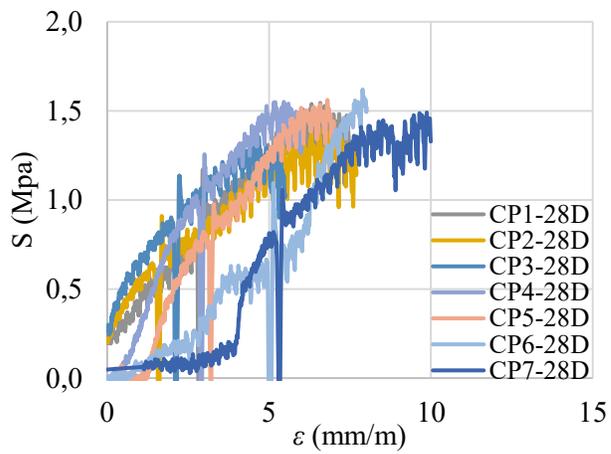
Gráfica 8: Resumen de gráficas de S/S_{max} vs deformación unitaria para mezcla con óxido biogénico de biochar.



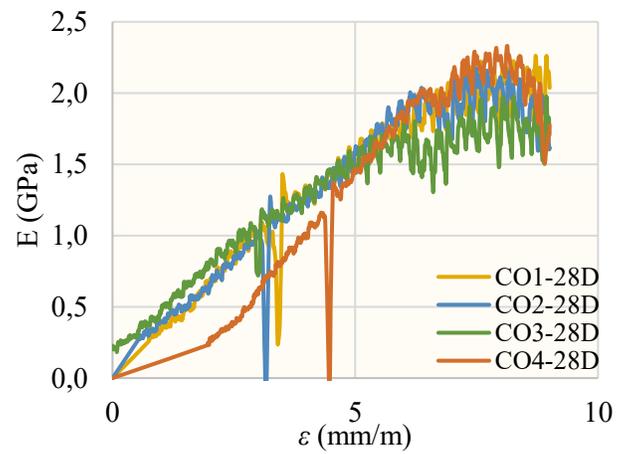
Gráfica 9: Resumen de gráficas para esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla patrón.



Gráfica 10: Resumen de gráficas para esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.

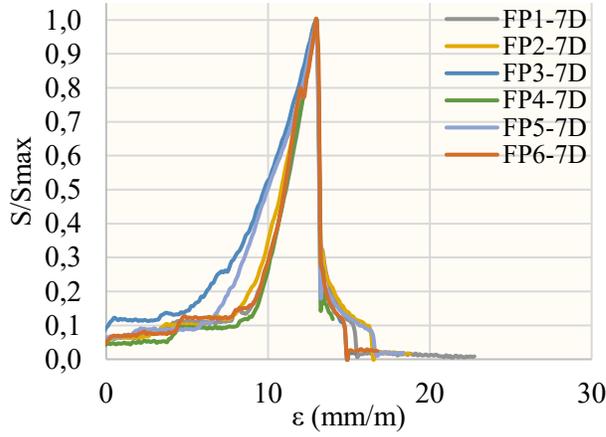


Gráfica 11: Resumen de gráficas para modulo elástico vs deformación unitaria para la mezcla patrón.

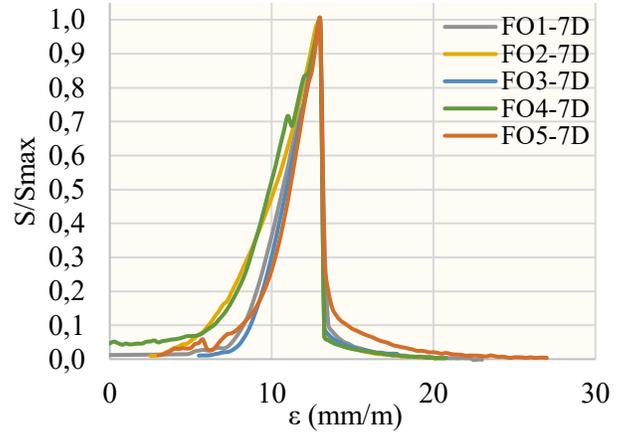


Gráfica 12: Resumen de gráficas para modulo elástico vs deformación unitaria para la mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar..

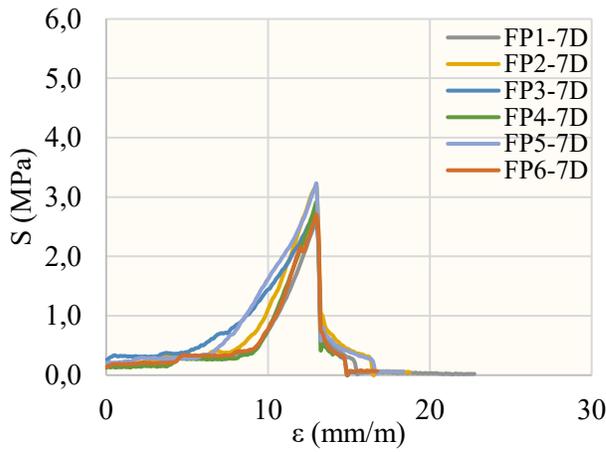
Grupo de Gráficas 3: flexión 7 días de curado



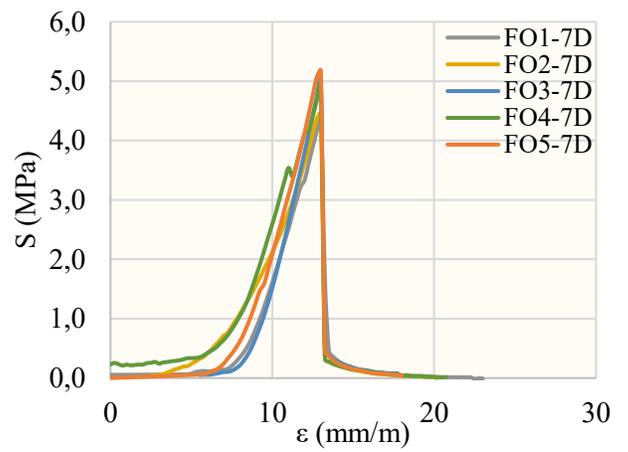
Gráfica 13: Resumen de gráficas para S/S_{max} vs deformación unitaria para mezcla patrón.



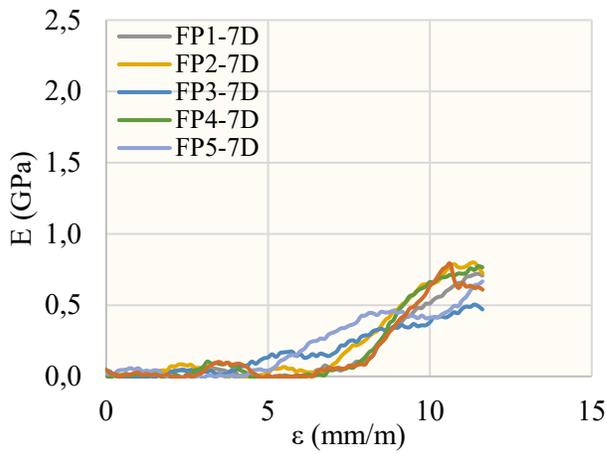
Gráfica 14: Resumen de gráficas de S/S_{max} vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.



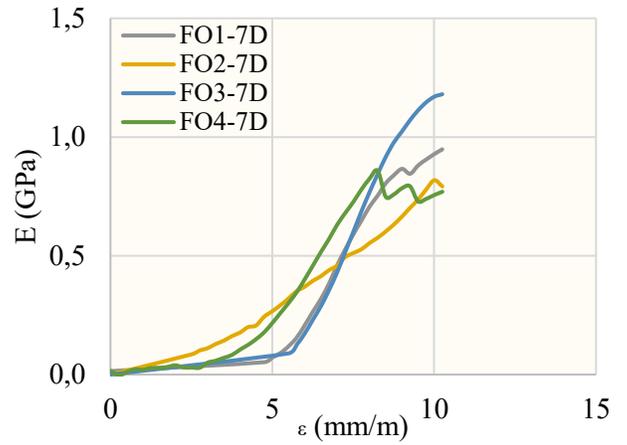
Gráfica 15: Resumen de Gráficas de esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla patrón.



Gráfica 16: Resumen de gráficas de esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.

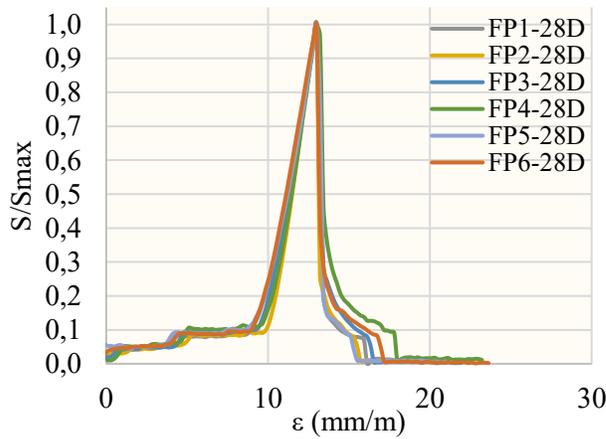


Gráfica 17: Resumen de gráficas de módulo elástico vs deformación unitaria para mezcla patrón.

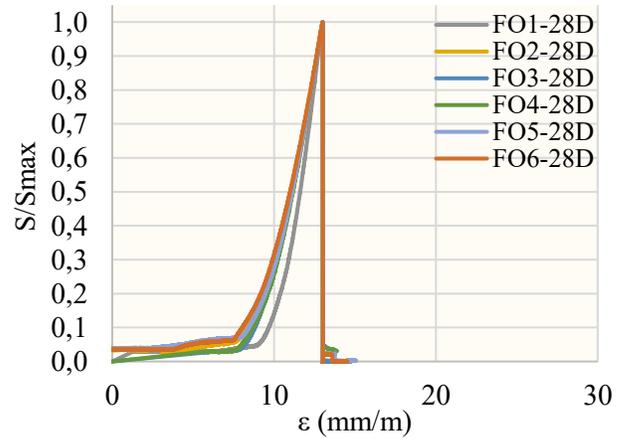


Gráfica 18: Resumen de gráficas de módulo elástico vs deformación unitaria para mezcla con reemplazo de óxido biogénico de biochar.

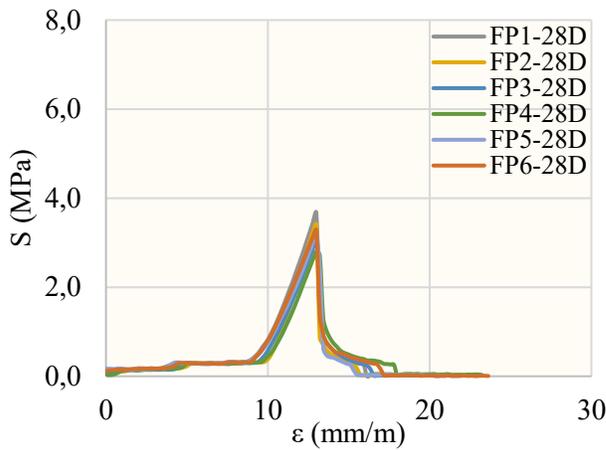
Grupo de Gráficas 4: Flexión con 28 días de curado



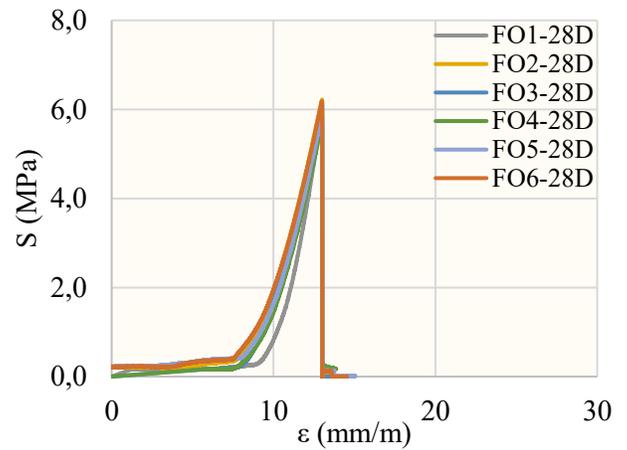
Gráfica 19: Resumen de gráficas de S/S_{max} vs deformación unitaria para mezcla patrón.



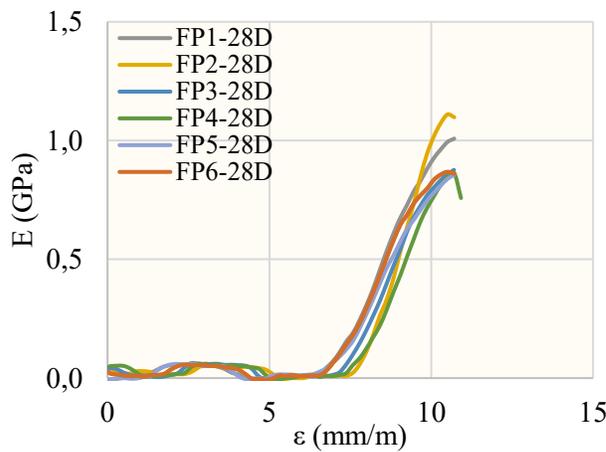
Gráfica 20: Resumen de gráficas de S/S_{max} vs deformación unitaria para mezcla con óxido biogénico de biochar.



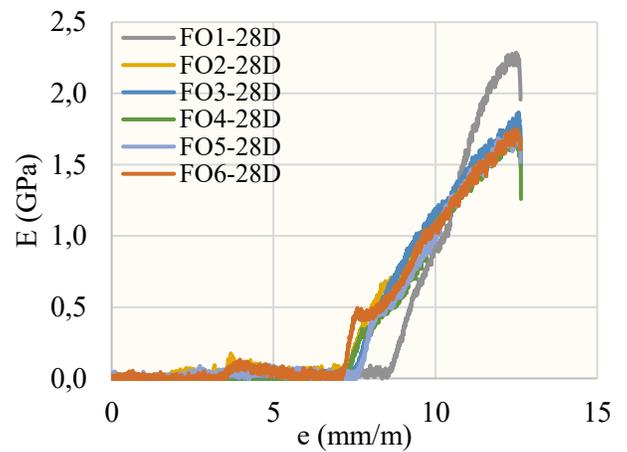
Gráfica 21: Resumen de gráficas de esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla patrón.



Gráfica 22: Resumen de gráficas de esfuerzo máximo vs deformación unitaria para mezcla con óxido biogénico de biochar.



Gráfica 23: Resumen de gráficas de modulo elástico vs deformación unitaria para mezcla patrón.



Gráfica 24: Resumen de gráficas de modulo elástico vs deformación unitaria para mezcla con óxido biogénico de biochar.

Tras los datos obtenidos y tabulados que se muestran en el anterior resumen de gráficas vemos como el reemplazo parcial de cemento por OBB es capaz de generar cambios bastante beneficiosos desde la perspectiva de los materiales de construcción sostenibles, ya que según los datos tomados de los ensayos muestran una mejoría bastante considerable para el esfuerzo máximo, el cual tuvo un aumento del 115% para un tiempo de curado de 7 días mientras que para 28 días tuvo un aumento solo del 68%.

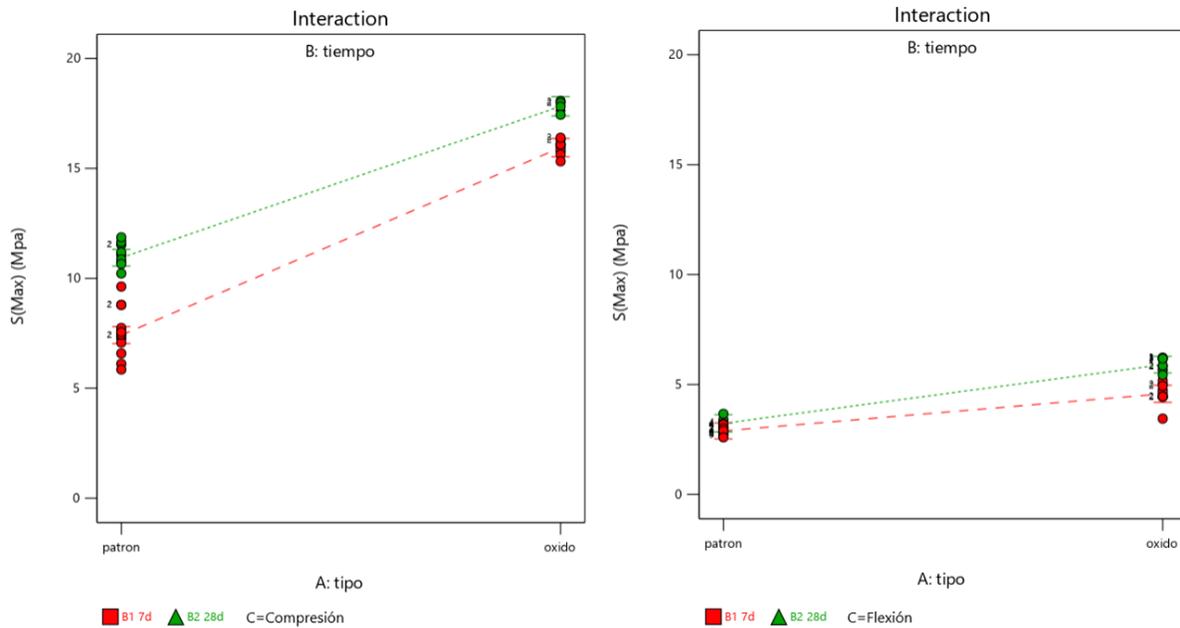
Esto puede ser provocado por el hecho de que para el curado de 28 días los esfuerzos son más homogéneos permitiendo un resultado más exacto en la toma de muestras. De igual manera el esfuerzo máximo en los ensayos de flexión también obtuvo un resultado ventajoso, con un aumento del 66,31% para 7 días de curado y 82,58% para 28 días de curado.

Dados los resultados anteriores es posible asumir que la adición de OBB le otorga beneficios claros al mortero, por lo que es debido comprobar la veracidad de los datos obtenidos, para esto se decidió someter los datos obtenidos al análisis de varianza ANOVA.

Tabla 9: Tabla de resultados promedio

Descripción		Tiempo de curado	Nomenclatura	S(máx) [Mpa]	E(máx)[Gpa]	Carga(máx)[KN]
Compresión	Patrón	7Dias	CP#-7D	7,828794	1,196404	19,54097
		28Dias	CP#-28D	11,17738	1,413552	27,94322
	OBB	7Dias	CO#-7D	15,94668	2,120421	39,8666
		28Dias	CO#-28D	17,82531	2,186277	44,5635
Flexión	Patrón	7Dias	FP#-7D	2,889252	0,758132	1,027265
		28Dias	FP#-28D	3,234541	0,930406	1,149972
	OBB	7Dias	FO#-7D	4,805	0,803011	1,7084
		28Dias	FO#-28D	5,905571	1,796623	2,099571

Resultados del análisis ANOVA.



Gráfica 25: Interacción S Vs Tipo de mortero.

Tabla 10. Anova for selected Factorial Model S

Fuente	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	Valor-F	Valor-P	
Modelo	1262,79	7	180,40	366,27	<0.0001	Significant
A-Tipo	313,26	1	313,26	636,02	<0.0001	
B-Tiempo	40,05	1	40,05	81,32	<0.0001	
C-Carga	1010,66	1	1010,66	2051,98	<0.0001	
AB	0.3496	1	0.3496	0.7098	0.4037	
AC	97.88	1	97.88	198.72	<0.0001	
BC	11.13	1	11.13	22.59	<0.0001	
ABC	5.51	1	5.51	11.19	0.0016	
Pure Error	23.64	48	0.4925			
Cor total	1286.44	55				

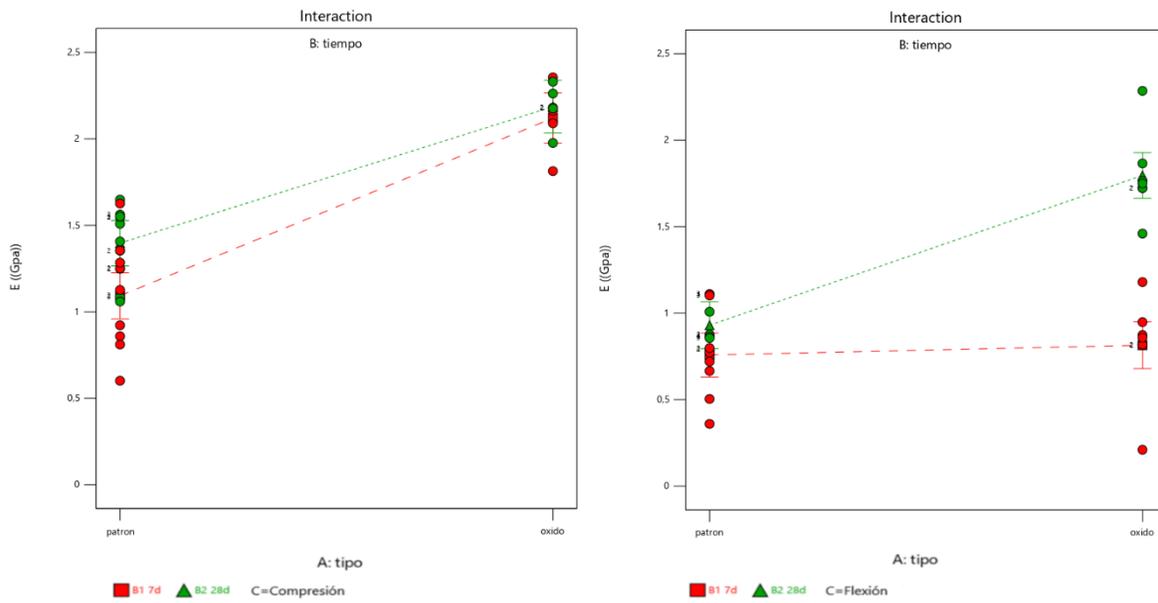
Tabla 11. Final Equation in Terms of coded factors S(Max).

S(Max)	=
+8.59	
+2.47	*A
+0.8839	*B
-4.44	*C
-0.0826	*AB
-1.38	*AC
0.4659	*BC
+0.3279	*ABC

La tabla ANOVA para S (Esfuerzo máximo) muestra que el modelo es significativo, lo que indica que existe una relación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y las variables predictoras.

Se aprecia una notable mejora sobre la Esfuerzo máximo soportado. Las muestras con OBB (Óxido biogénico de biochar) tienen una carga máxima soportada significativamente mayor que las muestras sin OBB. Evidenciando que el OBB proporciona un refuerzo adicional que mejora la resistencia del mortero a la carga. Tanto para las muestras de compresión como la flexión siendo más evidente en las de compresión ya que concreto está diseñado principalmente para soportar estas cargas.

El tiempo de curado también tiene un efecto significativo sobre la carga máxima soportada. Las muestras curadas durante 28 días tienen una carga máxima soportada significativamente mayor que las muestras curadas durante 7 días. Esto se debe a que el proceso de curado aumenta la resistencia del mortero.



Gráfica 26: Interacción E Vs Tipo de mortero.

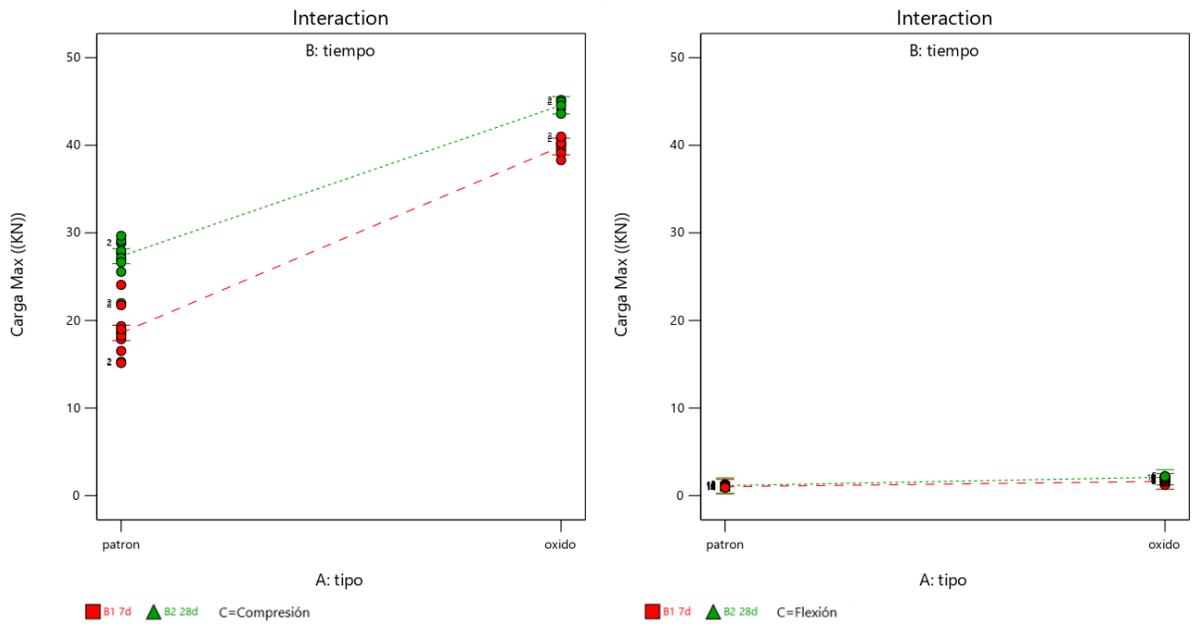
Fuente	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	Valor-F	Valor-P	
Modelo	13.59	7	1.94	32.63	<0.0001	Significant
A-Tipo	6.01	1	6.01	101.05	<0.0001	
B-Tiempo	1.86	1	1.86	31.28	<0.0001	
C-Carga	4.99	1	4.99	83.92	<0.0001	
AB	0.2612	1	0.2612	4.39	0.0414	
AC	0.6401	1	0.6401	10.76	0.0019	
BC	0.4922	1	0.4922	8.27	0.0060	
ABC	0.8798	1	0.8798	14.79	0.0004	
Pure Error	2.86	48	0.0595			
Cor total	16.44	55				

Tabla 12. Final Equation in Terms of coded factors E.

E	=
+1.39	
+0.3425	*A
+0.1905	*B
-0.3121	*C
+0.0714	*AB
+0.1117	*AC
+0.0980	*BC
+0.1310	*ABC

En el análisis de varianza (ANOVA) para el módulo elástico (E) muestra que el uso de OBB (Óxido biogénico de biochar) produce una mejora significativa en la carga a compresión, tanto a los 7 como a los 28 días.

En la gráfica de flexión, se observa una mejora más notable en el caso del óxido a los 28 días. Sin embargo, se observan algunos puntos atípicos, posiblemente causados por esfuerzos de concentración debidos a burbujas en la mezcla.



Gráfica 27: Interacción Carga máx. Vs Tipo de mortero.

Tabla 13. Anova for selected Factorial Model Carga Máxima

Fuente	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	Valor-F	Valor-P	
Modelo	13367.01	7	1909.57	753.75	<0.0001	Significant
A-Tipo	1285.12	1	1285.12	507.26	<0.0001	
B-Tiempo	158.33	1	158.33	62.49	<0.0001	
C-Carga	12406.24	1	12406.24	4897.00	<0.0001	
AB	11.10	1	11.10	4.38	0.0417	
AC	1093.86	1	1093.86	431.77	<0.0001	
BC	132.69	1	132.69	52.37	<0.0001	
ABC	15.65	1	15.65	6.18	0.0165	
Pure Error	121.60	48	2.53			
Cor total	13488.61	55				

Tabla 14. Final Equation in Terms of coded factors Carga Max.

$$\underline{\underline{\text{Carga Max}}} =$$

+17.03	
+5.01	*A
+1.76	*B
-15.56	*C
-0.4653	*AB
-4.62	*AC
-1.61	*BC
+0.5525	*ABC

En este caso lo primero que podemos apreciar es que el análisis también muestra que efectivamente el OBB generó un aumento considerable de la carga al igual que los anteriores casos, mostrando que no solo la carga aumento en función del tiempo de curado, sino que también en función de la composición de la mezcla.

En el caso de la gráfica de los ensayos a flexión como era de esperarse se aprecia que el aumento es poco ya que el concreto es un material que no suele comportarse bien en cargas deflexión.

6. Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos a través de los análisis de varianza (ANOVA) señalan que el tipo de mortero, el tiempo de curado y la adición de Oxido Biogénico de Biochar (OBB) son factores que ejercen una influencia significativa en la carga máxima soportada. Es importante destacar que el tipo de mortero exhibe el mayor efecto, seguido por el tiempo de curado.

Desde una perspectiva estadística, se ha verificado una mejora positiva al incorporar OBB como sustituto del cemento en la mezcla de mortero. Los análisis de varianza confirman que la sustitución del cemento tipo Portland por OBB no solo mantiene las propiedades mecánicas, sino que también resulta en un considerable aumento en el esfuerzo máximo, como se evidencia en la línea de tendencia del análisis ANOVA. Este hallazgo no solo posibilita la sustitución del cemento en las mezclas para

concreto, sino que también promete una reducción en el consumo global de materiales de construcción. Reducir la cantidad de material necesario para alcanzar un factor de seguridad equivalente contribuirá significativamente a la sostenibilidad en la construcción.

Se logró evidenciar que se tuvo una mejoría bastante optimista en el aumento de la resistencia máxima tal cual se expresa en la literatura consultada, para el caso de un reemplazo por debajo del 10%, con un reemplazo de 4,65% se obtiene un aumento del esfuerzo máximo del 62,95% para los morteros de compresión y un aumento del 82,58% para los ensayos de flexión, mientras que en los resultados previos del semillero con un reemplazo de 10%, 20% y 30% obtuvo un resultado menor al de la muestra patrón, mientras que para este al haber reemplazado solo un 4.65% del cemento se obtuvo una mejoría en las propiedades del mortero.

Se logró evidenciar que se tuvo una mejoría en el aumento de la resistencia máxima tal cual se expresa en la literatura consultada, para el caso de un reemplazo por debajo del 10%, con un reemplazo de 4,65% se obtiene un aumento del esfuerzo máximo del 62,95% para los morteros de compresión y un aumento del 82,58% para los ensayos de flexión.

No obstante, es crucial señalar la presencia de puntos atípicos en los resultados, los cuales pueden deberse a la formación de burbujas de aire en la mezcla. Estas burbujas pueden ocasionar concentraciones de esfuerzos, resultando en una mayor deformación o fractura del material. Para mitigar este problema, se recomienda el uso de un dispositivo vibrador de concreto durante la preparación de los morteros. Este dispositivo contribuirá a eliminar las burbujas de aire de la mezcla, mejorando así la homogeneidad y la resistencia del material final.

7. Bibliografía

- Angulo, O. y Viera, J. (2019). *Evaluación del efecto de la ceniza de cascarilla de arroz en la resistencia a la compresión de concretos simples*. (Trabajo de grado). Montería: Universidad de Córdoba.
- American Concrete Institute (ACI). (2019). ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete. *American Concrete Institute*.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E. y Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of cleaner production*, 51. 142-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.
- Camargo, N. R. e Higuera, C. H. (2017). Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(1). 91-109. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1907>.
- Castro, C., Rojas, L., Sánchez, S., Cuevas, A. y Altamirano, G. (2021). Propiedades físicas y mecánicas del mortero con alta resistencia a compresión. *Academia Journals*, 13(10). 504-509.
- Demin, W. y Fukang, H. (2017). Investigation for plastic damage constitutive models of concrete material. *Procedia Engineering*, 210(2017). 71-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.050>.
- Erazo, W., Lara, J. y Prado, L. (2019). Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de cubos de mortero utilizando cenizas de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento. *Revista Erasmus Semilleros de Investigación*, 4(1). 97 – 109. DOI: <https://doi.org/10.25054/issn.2590-759X>.
- Hidalgo, M. y Salinas, E. (2019). Mechanical, thermal, viscoelastic performance and product application of PP – rice husk Colombian biocomposites. *Composites Part B* 176(2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107135>.
- Igliński, B. y Buczkowski, R. (2017). Development of cement industry in Poland History, current state, ecological aspects. A review. *Journal of Cleaner Production*, 141. 702-720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.139>.

- Jarre, C., Puig, R., Zamora, C. y Zamora, E. (2021). Caracterización preliminar de la ceniza de cáscara de arroz de la provincia Manabí, Ecuador, para su empleo en hormigones. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*, 44(1). 44-50. DOI: <https://doi.org/10.22209/rt.v44n1a06>.
- Fonseca, D. y Díaz, S. (2020). *Aspectos químicos y termodinámicos del cemento y el concreto*. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/32512/Aspectos%20Qu%C3%ADmicos%20y%20Termodin%C3%A1micos%20del%20cemento%20y%20el%20concreto.pdf>.
- Matallana, R. (2019). *El CONCRETO Fundamentos y Nuevas Tecnologías*. Constructura Concreto. <https://conconcreto.com/wp-content/uploads/2023/02/EL-CONCRETO-Fundamentos-y-nuevas-tecnologias..pdf>.
- Neumer, M., Hofer, P. y Hofstetter, G. (2022). On the prediction of complex shear dominated concrete failure by means of classical and higher order damage – plasticity continuum models. *Engineering Structures*, 251(2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113506>.
- Ogwang, G., Olupot, P., Hasedde, H., Menya, E., Storz, H. y Kiros, Y. (2021). Experimental evaluation of rice husk ash for applications in geopolymer mortars. *Journal of Bioresources and Bioproducts* 6(2021). 160-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.02.008>.
- Padilla, J. V., Jiménez, B. C., Brenes, J. P. S., Delgado, J. S., & Castro, E. R. (2017). Contenido de metales pesados y composición química de los cementos hidráulicos de uso general comercializados en Costa Rica. *Ingeniería*, 27(1), 75-95. DOI: <https://doi.org/10.15517/jte.v27i1.26894>.
- Patiño, P. (2014). *Biomasa: estudio de factibilidad para implementar un sistema de generación de energía a partir de residuos vegetales*. (Tesis de grado). Bucaramanga: Universidad de Santander.
- Sánchez, D. (1996). *Tecnología del concreto y del mortero*. Biblioteca de la Construcción (3ra ed.). Bhandar Editores Ltda.

- Salazar, D., García, R. y Ortiz, O. (2015). Laboratory processing of Colombian rice husk for obtaining amorphous silica as concrete supplementary cementing material, *Construction and Building Materials*, 96 (2015), pp. 65–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.178>.
- Valverde, A., Sarria, B. y Monteagudo, J. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica Año XIII*, 37.
- Vargas, J. (2023). *Evaluación de las propiedades físico mecánicas del concreto usando ceniza de cascarilla de arroz (CCA)*. (Tesis de grado). Pimentel, Perú: Universidad Señor de Sipán.
- Mejía, L. y Cuitiva, A. (2022). *Análisis de propiedades mecánicas de materiales sostenibles para la construcción de morteros de cementos con aditivos de óxidos de biochar*. (Trabajo de grado). Montería: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Costigan, A., Pavía, S., & Kinnane, O. (2015). An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression. *Journal of Building Engineering*, 4, 283–294. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.10.001>