

Caracterización y viabilidad del uso de cenizas de biomasa vegetal en mortero

C. F. Gonçalves¹ , A. F. Soares² , H. M. Paula^{1*} 

*Autor de Contacto: heberdepaula@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.484>

Recepción 17/04/2020 | Aceptación: 30/12/2020 | Publicación: 01/05/2021

RESUMEN

La mezcla por volumen fue 1: 1: 6, para un reemplazo parcial de cemento Portland con un contenido de 15 y 30%. Las pruebas para los residuos fueron de caracterización de las partículas y actividad puzolánica, mientras que los morteros fueron sometidos a análisis en estado fresco y endurecido. De los resultados obtenidos, los pretratamientos (tamizado y molienda) y la cal añadida a la mezcla mejoraron la reactividad de las cenizas, el mejor comportamiento se presentó para los morteros con 15% de sustitución, principalmente para los que contienen RHA.

Palabras clave: morteros; reemplazo parcial de cemento; materiales de cemento suplementarios; cenizas de biomasa vegetal.

Citar como: Gonçalves, C. F., Soares, A. F., Paula, H. M. (2021), “*Caracterización y viabilidad del uso de cenizas de biomasa vegetal en mortero*”, Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 1 – 16, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.484>

¹ Master's Degree in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Federal University of Catalão, Catalão, Brazil.

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Federal University of Goiás, Catalão, Brazil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor C. F. Gonçalves fue el responsable del análisis, discusión de los resultados, redacción y revisión del artículo. El autor A. F. Soares desarrolló la metodología experimental, realizó experimentos y recopiló datos. El autor H. M. Paula contribuyó con la idea original, coordinación de experimentos, orientación y supervisión de todas las actividades.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2021) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2022.

Characterization and feasibility of using vegetable biomass ash in mortar

ABSTRACT

The present research aims to evaluate the incorporation of vegetable biomass ash, eucalyptus chips (ECA), sugarcane bagasse ash (SCBA) and rice husk ash (RHA), in mixed mortars of cement and lime, considering its properties and mechanical performance. The volume ratio was 1: 1: 6 for a partial replacement of Portland cement at a rate of 15 and 30%. The tests for the residues were of characterization of the particles and pozzolanic activity, while that of the mortars were submitted to analyses in the fresh and hardened state. From the results, pretreatments (sieving and grinding) and lime added to the mixture improved the reactivity of the ashes and the best performance was presented for mortars with 15% substitution, mainly for those containing RHA.

Keywords: mortars; partial replacement of cement; supplementary cement materials; vegetable biomass ash.

Caracterização e viabilidade de utilização de cinzas de biomassa vegetal em argamassa.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a incorporação de cinzas de biomassa vegetal, cavaco de eucalipto (ECA), bagaço de cana-de-açúcar (SCBA) e casca de arroz (RHA), em argamassas mistas de cimento e cal, considerando suas propriedades e desempenho mecânico. O traço em volume foi 1:1:6, para uma substituição parcial do cimento Portland a teores de 15 e 30%. Os ensaios para os resíduos foram de caracterização das partículas e atividade pozolânica, as argamassas foram submetidas a análises no estado fresco e endurecido. Dos resultados, os pré-tratamentos (peneiramento e moagem) e a cal adicionada a mistura melhoraram a reatividade das cinzas, o melhor desempenho foi apresentado para argamassas com 15% de substituição, principalmente para aquelas contendo RHA.

Palavras-chave: argamassas; substituição parcial do cimento; materiais cimentícios suplementares; cinza de biomassa vegetal.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción civil es un segmento que representa una alta demanda de materias primas, al tiempo que libera importantes cantidades de CO₂ en la atmósfera (Noor-Ul-Amin, 2014; Berenguer et al., 2018). Para minimizar este problema, la industria de la construcción ha incorporado algunos residuos agrícolas (Chatveera y Lertwattanakul, 2014). Y mucho de esto se debe al hecho de que las cenizas tienen propiedades puzolánicas, que juegan un papel importante cuando se incorporan al cemento (Hossain et al., 2016).

Esta propiedad se identifica en materiales llamados puzolánicos que tienen sílice o alúmina en estado amorfo, que en contacto con el agua reaccionan con el óxido de calcio presente en la cal o cemento, dando lugar a una sustancia con propiedades cementosas (ASTM C 618-19; Farinha et al., 2018). Por lo tanto, además de un estado no cristalino, las puzolanas deben tener un refinamiento de sus partículas, es decir, presentar una alta superficie específica (Roselló et al., 2017).

La composición física, química y mineralógica de estos residuos agroindustriales es diversa, dependiendo del tipo de biomasa, especie, condición de crecimiento, técnicas de cosecha, transporte, almacenamiento, proceso de combustión y un sinnúmero de otras condiciones que pueden mejorar - o no - su contenido (Zajac et al., 2018). En general, están compuestos por aluminosilicatos en fase amorfa y cristalina, teniendo el dióxido de silicio el mayor porcentaje en muestras de ceniza de cascara de arroz (CCA) y bagazo de caña de azúcar (CBCA), y óxido de aluminio en cenizas de origen leñoso (Farinha et al., 2018; Fernandes et al., 2016; Kazmi et al., 2017; Ukrainczyk et al., 2016).

También existe la presencia de óxidos de otros metales como hierro, magnesio, calcio y potasio. Además de los carbonatos y el carbono no quemado, que se encuentran comúnmente en las cenizas de los bosques, como las astillas de eucalipto (CAE). Y que, cuando se aplican en sistemas de cemento, son responsables de una mayor demanda de agua en la mezcla, debido a la alta pérdida al fuego (Arif et al., 2016; Ban y Ramli, 2010; García e Sousa-Coutinho, 2013; Ribeiro et al., 2017). A pesar de ello, los diferentes niveles de sustitución pueden provocar la mejora de las propiedades de durabilidad, resistencia del mortero, construcción, disminución del costo del material en la (Hossain et al., 2016), buena compactación y baja evolución del calor durante la hidratación (Noor-ul-amin, 2014), eficaz en el control de expansiones de deterioro debido a reacciones álcali-agregado (Esteves et al., 2012), así como en la reducción del uso de combustibles fósiles, la formación de materias primas y la generación de ingresos para los trabajadores involucrados en procesos de transporte, infraestructura, desarrollo tecnológico y aplicación en sí (Prasara-a y Gheewala, 2017).

Entonces, el uso de cenizas como material de reemplazo parcial del cemento, va más allá de los problemas sostenibles, abarcando aspectos económicos y sociales (Prasara-a y Gheewala, 2017). Sin embargo, la comercialización de residuos y su aplicación en la construcción es casi inexistente, incluso con el creciente interés en materiales complementarios de cemento, derivados de biomasa, en la investigación científica (Roselló et al., 2017), o con la posibilidad de que nuevos materiales pueden mejorar el rendimiento de los edificios y los materiales, promoviendo un mayor control de calidad y minimizando el desarrollo de patologías, por ejemplo. Por lo tanto, es necesario que se realicen más estudios sobre la viabilidad de utilizar residuos de combustión en morteros y hormigón (Ukrainczyk et al., 2016).

Estos estudios fueron impulsados porque, además de que las cenizas muestran buenos resultados como sustitutos parciales del cemento Portland, son subproductos de materias primas baratas y abundantes en todo el mundo, hasta entonces, lanzadas en rellenos sanitarios sin ninguna preocupación ambiental (Moraes et al., 2014; Zajac et al., 2018; Berenguer et al., 2018). En 2012 se descartaron 34 millones de toneladas de CCA. Al año siguiente, en Estados Unidos, se estima

que se produjeron de 1,25 a 5,6 millones de CBCA (Martirena y Monzó, 2017; Paris et al., 2016). Y el uso creciente de biomasa para la generación de energía, una de las fuentes más importantes de producción renovable, con proyecciones de crecimiento para los próximos años, explicando también una mayor disponibilidad de cenizas (Zajac et al., 2018).

O incluso, la confirmación de que países como Brasil pueden tener industrias capaces de beneficiar los residuos de biomasa para su aplicación en la construcción, como se comenta en el trabajo de Moraes et al. (2014) y Regô et al. (2015), por ejemplo. El primero, analizó los posibles usos de los subproductos de la cadena del arroz, el último, caracterizó el CCA producido en el país y su aplicación en matrices cementosas. A partir de los resultados, para ambos se garantizaron las ventajas abordadas, además de demostrar que, de los residuos aquí obtenidos la composición química es poco variable, facilitando así su uso en productos de construcción.

En este sentido, el objetivo del presente trabajo es verificar la viabilidad técnica de utilizar diferentes tipos de cenizas de biomasa - CAE, CBCA y CCA -, en diferentes porcentajes de sustitución, como material cementante suplementario en morteros mixtos, que contiene en su composición dos aglomerados, cemento y cal, con el objetivo de reducir parcialmente el cemento Portland.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales e caracterización

El mortero de referencia utilizado es de tipo mixto - cemento Portland, cal hidratada, agregado fino natural y agua tratada, según lo especificado por NBR 13529 (ABNT, 2013). El cemento es de alta resistencia inicial (CP - V ARI) o tipo III, para NBR 5733 (ABNT, 1991) y ASTM C 150M-20, respectivamente. Se eligió el cemento porque tiene poca o ninguna adición en su composición, proporcionando una mejor investigación del comportamiento del material debido a la incorporación de residuos.

La cal utilizada está hidratada con carbonatos, clasificados como CH - III, según NBR 7175 (ABNT, 2003) y ASTM C 206-3, otorgando a la mezcla mayor plasticidad, mejor trabajabilidad y mayor retención de agua, además de ser tradicionalmente utilizado en la región y fácil de obtener. Finalmente, el agregado fino es arena natural seca, con nombre comercial "medio" y especificaciones según NBR 7211 (ABNT, 2009), sin ningún tipo de tratamiento como tamizado o lavado. La arena se extrajo mediante dragado en los ríos Veríssimo y Paranaíba en la ciudad de Catalão - GO.

Los tres tipos de cenizas de biomasa vegetal utilizados son subproductos de la combustión, utilizados para generar calor y energía, clasificados como clase C por ASTM C 618, puzolanas vegetales para uso en hormigón. El CAE se obtuvo de una empresa minera y procesadora de niobio y fosfato, el residuo proviene del uso de astillas de eucalipto en hornos para la generación de calor, con el fin de secar la roca fosfórica, donde las temperaturas alcanzan entre 1000 y 1100° C El CBCA, suministrado por una planta productora de azúcar, etanol y energía, se retira de las calderas, donde se quemaba el bagazo de caña de azúcar para generar energía. CCA es un subproducto de una industria alimentaria, que utiliza la cáscara para generar calor, con el fin de beneficiar al café. Para los dos últimos, no se disponía de información sobre el proceso de obtención de residuos.

La composición química determinada por Resende (2013), de Souza et al. (2014) y Berenguer et al. (2018), realizadas mediante la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X, se muestra en la Tabla 1, son cenizas con particularidades similares a las aquí estudiadas.

Tabla 1. Concentración de óxido (% en masa) de la ceniza analizada

Compuestos	CAE (Resende, 2013)	CCA (de Souza et al., 2014)	CBCA (Berenguer et al., 2018)
SiO ₂	6,38	93,25	84,86
Al ₂ O ₃	22,60	<0,1	1,91
Fe ₂ O ₃	10,90	0,02	3,83
CaO	27,40	0,57	2,96
MgO	6,15	0,19	2,54
TiO ₂	2,41	<0,1	0,75
P ₂ O ₅	2,75	0,51	0,38
Na ₂ O	0,28	-	0,47
K ₂ O	4,29	2,18	1,38
MnO	0,41	0,25	0,19

2.2 Tratamiento de cenizas

Los residuos de biomasa fueron sometidos a un pretratamiento de tamizado y triturado garantizando un aumento de la superficie específica, con partículas de menor granulometría y, así, favoreciendo la aparición de actividad puzolánica. Estos procedimientos sugeridos por Ramos et al. (2013), Matos y Sousa-Coutinho (2013), Salvo et al. (2015), Modolo (2015), Ataie y Riding (2016).

Así, las cenizas fueron pasadas a través del tamiz de malla 50 (abertura de 297 μ m), eliminando partículas gruesas, en su mayoría formadas por material inerte, como suelo y fragmentos de roca. Luego, molidas en un molino de bolas durante 30 minutos a una rotación de 30 rpm; durante períodos más largos, las partículas comienzan a agregarse (Xu et al., 2015).

2.3 Estándares normativos y pruebas experimentales

2.3.1 Caracterización de partículas

La prueba de densidad de partículas siguió la metodología propuesta por la Corporación Brasileña de Investigación y Agricultura - EMBRAPA (2011) utilizando el método de matraz volumétrico. Las muestras de 20 g, separadas en recipientes de masa conocida, se secaron en un horno a 105 ° C durante 24 horas. Posteriormente, se enfría en un desecador, se pesa y se transfiere a un matraz aforado de 50 ml que contiene alcohol etílico, con el fin de eliminar el aire o los vacíos de las cenizas y el cemento.

Para el índice de finura de las cenizas, NBR 15894-3 (ABNT, 2010), se dispersaron 20 g de muestra en 400 ml de solución de hexametáfosfato de sodio a 12,5 g / l y se tamizaron en una malla de 45 μ m, diámetro nominal de 200 mm, bajo un flujo constante de agua con un caudal de 5 l / s durante 10 min. El material retenido se transfirió a un vidrio de reloj, se colocó para secar en un horno a 105 ° C durante 24 horas, determinando así su masa seca. Para aquellos con 20% o más de material retenido en el tamiz de 45 μ m, se pueden clasificar como puzolanas, NBR 12653 (ABNT, 2014).

En cuanto al índice de finura del cemento NBR 11579 (ABNT, 1991), por el método manual, el tamiz utilizado fue el de malla de 75 μ m y el número 200. El ensayo consiste en un tamizado de manera que, inicialmente, se pesaron 50 g de muestra y, terminado sólo cuando el material pasante corresponde a una masa inferior a 0,05 g. Esta propiedad también se puede evaluar siguiendo las indicaciones de NBR NM 76 (ABNT, 1998) o ASTM C 204-05, para el Método Blaine.

Las pruebas de gravimetría permitieron determinar el contenido de humedad, NBR NM 24 (ABNT, 2003) y ASTM D 3173-73, donde se pesó 1 g de cada muestra, secada en estufa a 105 $\pm$ 4 ° C durante 30 min., Con periodos posteriores de 10 min., hasta que la masa alcanzada sea constante. Los resultados determinados deben ser menores o iguales a 3 (tres), como se indica en NBR 12653 (ABNT, 2014).

En la pérdida de fuego, NBR NM 18 (ABNT, 2004) por el Método nº 1, las muestras de ceniza se calcinaron en un horno en mufla - Graus Bravac M2 Elettrico Inox -, durante 50 min. a 900 °C a una velocidad de calentamiento de 35 °C / min. Una vez quemados, los crisoles se dejaron en la mufla durante 5 (cinco) horas y, posteriormente, se colocaron en un desecador para su enfriamiento y posterior pesado. El mismo procedimiento se puede realizar siguiendo las recomendaciones de ASTM D 7348-13, en un solo paso, a una temperatura máxima de 900 °C (Método B). Para ser clasificado como puzolanas, NBR 12653 (ABNT, 2014), los límites de pérdida deben ser menores o iguales a 6.

2.3.2 Aprovechamiento, moldeado de probetas y curado

Se estudió la influencia de la reposición parcial de CCA, CBCA y CAE en el desempeño del mortero comparando el comportamiento de una línea tomada como referencia, sin residuos, y otra con la reposición del 15 y 30% en peso de cemento Portland para cada uno. tipo de ceniza, Cuadro 2. Estos niveles de sustitución se definieron con base en los mejores resultados presentados en la investigación de Paris et al. (2016), Hossain et al. (2016), Abbas et al. (2017), Izabelle et al. (2011), Resende (2013) y Ukrainczyk et al. (2016).

La traza en volumen fue 1: 1: 6 (cemento, cal y arena), que se puede utilizar como mortero para colocación y recubrimiento, para ASTM C 270-19, mortero tipo N. Y considerando el análisis de Dubaj (2000) y Campos (2014), esta proporción presentó un mejor comportamiento para las propiedades del mortero. La cantidad de agua se determinó mediante el índice de consistencia, NBR 13276 (ABNT, 2016), fijado en el rango de 265 ± 5 mm.

Los cuerpos de pruebas prismáticos con sustitución parcial del cemento se identificaron con las siglas correspondientes a cada ceniza - CCA, CAE y CBCA - y con índice 15, para aquellas con 15% de reposición, o 30, para aquellas con 30% de reposición. Las muestras moldeadas con la línea de referencia, fueron identificadas con el acrónimo CPR (cuerpo de prueba de referencia).

La proporción de masa utilizada en la preparación de los cuerpos de pruebas de mortero se llevó a cabo de manera que el total de materia seca de la mezcla fuera igual a 2,5 kg, Tabla 2. La mezcla se preparó según el método especificado por NBR 16541 (ABNT, 2016), sin mezclador mecánico. Y para alcanzar el índice de consistencia establecido, se realizó la prueba de consistencia esparciendo sobre la mesa (tabla de flujo), NBR 13276 (ABNT, 2016).

Tabla 2. Proporción de masa (kg) de los materiales utilizados para la producción de morteros.

Muestra	Cemento	Cal	Arena Seca	Ceniza	Agua
CPR	0,258	0,103	2,130	0,000	0,625
CCA15	0,219			0,039	0,750
CCA30	0,181			0,077	0,650
CBCA15	0,219			0,039	0,625
CBCA30	0,181			0,077	0,625
CAE15	0,219			0,039	0,670
CAE30	0,181			0,077	0,725

Una vez preparada la mezcla, se moldearon los cuerpos de pruebas (CDP) en formato prismático, con dimensiones de 4cm x 4cm x 16cm, produciéndose 3 (tres) cuerpos de pruebas por edad para el mortero de referencia y para cada tipo de ceniza con las dos tiras de recambio, totalizando 42 cuerpos de pruebas (NBR 13279, 2005; BS EN 1015-11). Después del moldeo, los moldes con la mezcla se envolvieron con papel film y se sometieron a curado en seco en un ambiente de laboratorio, a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa del $60 \pm 5\%$.

Se sabe que, con la pérdida de agua y humedad durante el curado, las propiedades mecánicas y de absorción de agua se verán comprometidas, de ahí la necesidad de que se lleve a cabo dentro de las normas establecidas por ASTM C 309-19 y ASTM C 1315-19. Sin embargo, la elección de un curado no sumergido refleja el carácter de la investigación en la identificación del comportamiento de las cenizas en los sistemas cementosos, especialmente con respecto a su capacidad para interferir con la humedad necesaria para hidratar el cemento.

Transcurridas 48 horas, dado el final del período de curado, los CDP se retiraron de los moldes y se envolvieron nuevamente en film hasta el momento de las pruebas de resistencia mecánica.

2.3.1 Evaluación de morteros en estado endurecido

Los ensayos de tracción en flexión y compresión simple, NBR 13279 (ABNT, 2005) y BS EN 1015-11, se realizaron con el fin de analizar el desarrollo de la resistencia mecánica del mortero durante el tiempo de curado a 14 y 28 días. El análisis de resistencia se realizó solo para estas edades ya que la reacción puzolánica ocurre lentamente y, por tanto, según Ataie y Riding (2016), para edades tempranas no se obtienen resultados considerables.

Los resultados encontrados para resistencia a la compresión y tracción en flexión a los 14 y 28 días se obtuvieron calculando la resistencia media de los seis cuerpos de pruebas ensayados para compresión y los tres ensayados para resistencia a tracción por flexión, mediante el análisis múltiple de medias utilizando el método de Tukey, al 5% ($p < 0.05$) del nivel de confianza. Además, se respetó el valor de desviación absoluta máxima de 0,5 MPa para los resultados individuales obtenidos en compresión y de 0,3 MPa para los obtenidos en el ensayo de tracción por flexión, NBR 13279 (ABNT, 2005).

La prueba de absorción de agua por capilaridad se realizó a los 28 días, según lo prescrito por NBR 15259 (ABNT, 2005). Inicialmente se determinó la masa de cada espécimen que aún estaba seco y, posteriormente, las muestras se colocaron sobre un soporte dentro de un recipiente con agua, en inmersión parcial para un deslizamiento constante de agua de 5 ± 1 mm. Finalmente, cada muestra se sacó del recipiente, se secó con un paño húmedo y se pesó a los 10 min. y a los 90 min. dado el inicio de la prueba.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización física y química analizada en este estudio, importante para comprender el comportamiento de las partículas y su influencia en las reacciones puzolánicas, se realizó a partir de los resultados obtenidos para la densidad de partículas (DP), la finura (F) de cada elemento, contenido de agua (U) y pérdida por incendio (PI). A partir de los resultados mostrados en la Tabla 3, es posible observar que las muestras que contienen CBCA tuvieron un menor volumen en su composición, así como en los estudios de Kazmi et al. (2017), ya que esta cantidad es inversamente proporcional a la DP (Aprianti et al., 2016). Por tanto, para la CAE, el valor de DP más bajo encontrado, el volumen es diez veces mayor de lo que sería si no hubiera sustitución, según Gluitz y Marafão (2013), y que influirá en la resistencia de los morteros como se verá a continuación.

Tabla 3. Caracterización física de los elementos utilizados

Muestra	DP (g/cm ³)	F	U	PI
Cemento	2,73	3,14%	-	-
CAE	0,25	52,63%	6,59%	70,20%
CCA	0,55	78,67%	1,81%	5,79%
CBCA	0,84	31,72%	0,60%	11,65%

Además, a partir del DP se puede entender el proceso de acomodación de las partículas que componen el sistema cementoso, cuando están fuertemente entrelazadas y con pocos vacíos, se observa un mejor desempeño mecánico. En este sentido, los mejores resultados de resistencia se deben ver en el CBCA y CCA, ya que luego de ser previamente tratadas - molidas y tamizadas - las muestras presentaron un mayor DP. Sin este tratamiento para CAE, la resistencia u otra propiedad del mortero podría verse afectada negativamente, haciendo que la sustitución del cemento por cenizas, por ejemplo, sea inepta (Martirena y Monzó, 2017; Farinha et al., 2018).

Sin embargo, sabiendo que el comportamiento de un mortero se rige por otras propiedades, el triturado y el tamizado podrían hacer que las cenizas sean altamente reactivas como evidencian Roselló et al. (2017), y con la actividad puzolánica en curso, el rendimiento mecánico del sistema puede ser satisfactorio. Entonces, analizando los resultados para el índice de finura y siguiendo las especificaciones de ASTM C 618-19, CBCA es de hecho una puzolana, el contenido máximo de material retenido en el tamiz de 45 μm es 34%, en comparación con 31, 72% acumulado. Para NBR 12653 (ABNT, 2014) ninguna de las cenizas sería un material puzolánico, el contenido máximo es 20%.

Sin embargo, aunque no son puzolanas dentro de los límites establecidos por la normativa vigente, las partículas más pequeñas, es decir, el poco material que pasa por el tamiz de 45 μm , se concentran cerca de la interface agregado y la matriz del cemento, provocando efecto relleno de huecos o efecto relleno., y que puede contribuir con la ganancia de resistencia en el estado endurecido (Khan et al., 2017; Aprianti et al., 2016; Resende, 2013). Este fenómeno es el mismo que se observa en los sistemas cementosos que contienen cal hidráulica.

Mientras que, para morteros frescos, el índice de finura revela que los de menor valor, en el caso del CBCA, no hay cambio en la trabajabilidad para ningún rango de sustitución, ya que las partículas mayores a 45 μm afectan la plasticidad de la mezcla (Netto, 2006). De igual forma, para la CCA, existe una mayor pérdida de trabajabilidad, especialmente cuando se incrementa la reposición de cemento del 15 al 30%. Afirmaciones igualmente probadas por el índice de consistencia que se encuentran dentro de los límites establecidos por NBR 13276 (ABNT, 2016), Figura 1.

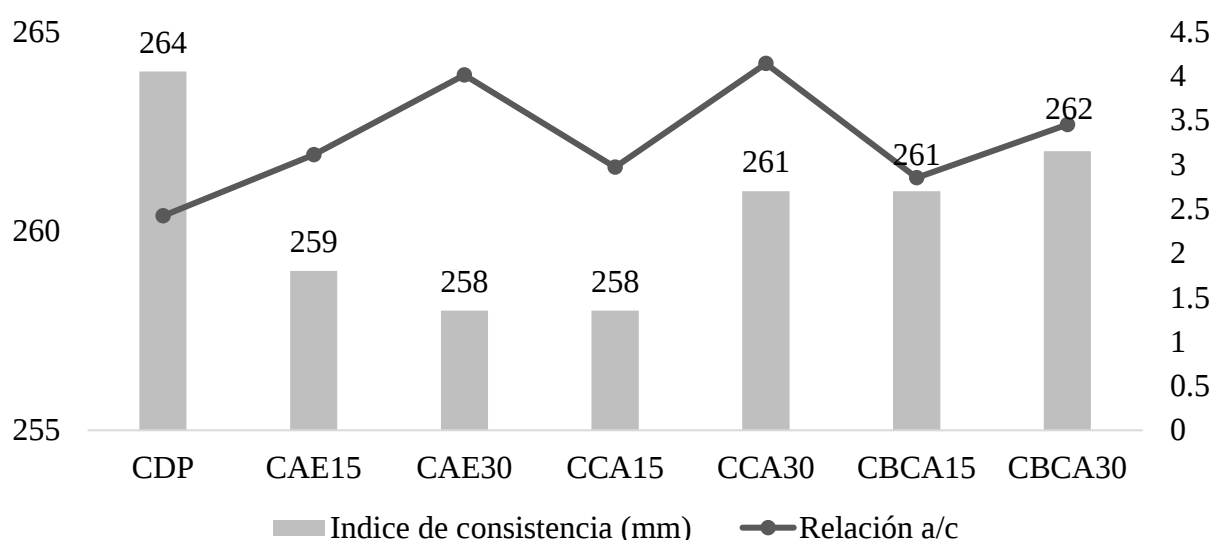


Figura 1. Resultados del índice de consistencia y la relación a / c.

A partir de la prueba del índice de finura también fue posible realizar un análisis visual de las muestras retenidas en el tamiz. Para el CAE, aplicando hexametáfosfato de sodio, un compuesto químico dispersante (Mauri et al., 2011), se notó la presencia de pequeños cristales. Estas partículas

explican el alto contenido de agua en la muestra, Figura 1, debido a la alta capacidad de absorción (Netto, 2006). Justificando no solo el volumen acentuado de agua, que favorece el mantenimiento de la trabajabilidad (Ataie, 2016), sino también la humedad, que es satisfactoria durante el curado del mortero (Rajamma et al., 2009).

Y debido a la naturaleza higroscópica de estos elementos cristalinos, con más agua liberada, hay una mayor pérdida de masa del CAE cuando se somete a la prueba de pérdida de fuego, por esta razón la pérdida del 70,20%, la mayor entre las cenizas analizadas. Además, esta ocurrencia también se debe a la presencia de materia orgánica no quemada (Prasara-a, 2017), que, durante el calentamiento en una mufla, libera otra porción de CO₂ y agua.

De todos modos, la presencia de estos cristales no favorece las propiedades del mortero. Para Aprianti et al. (2016), los elementos amorfos son más reactivos. Sin embargo, debido a que gran parte del material retenido es cristalino y que su finura alcanzó un valor del 52,63%, es posible que el resto de la muestra, material pasante y amorfo, haya compensado la reactividad de la ceniza. Así, para el CAE, la considerable ganancia de resistencia es función del volumen de ceniza añadida al mortero por su bajo DP, como se indicó anteriormente.

Y con respecto a la demanda de agua en las muestras, utilizando el índice de consistencia, Figura 1, en relación al CPR, existe una alta cantidad de agua para mezclas que contienen cenizas en reemplazo parcial del cemento, excepto CBCA. La mayor cantidad requerida fue para el rasgo CCA30 con un 20% más en comparación con la CPR. Según Ukrainczyk et al. (2016), esto ocurre por la forma irregular y voluminosa de las cenizas. Berra y col. (2015) muestran la alta superficie específica de la ceniza en comparación con el cemento Portland, además de la naturaleza porosa de sus partículas, como sugieren Arif et al. (2016).

Estas características son otros factores que también explican una mayor absorción de agua. Así como, la presencia de una gran cantidad de materia orgánica disponible para la hidratación durante el endurecimiento del mortero, como lo identifica Rajamma et al. (2009) y previamente confirmado por la prueba de pérdida por incendio. Se advierte, por tanto, que la trabajabilidad disminuyó cuando la presencia de ceniza en reemplazo parcial al cemento, corroborando los resultados obtenidos por Belviso (2018), Aprianti et al. (2016), Ukrainczyk et al. (2016) y los discutidos aquí. A pesar de ello, la disminución encontrada fue del 2,3% frente al 34,4% detallado en la literatura. Esta diferencia se debió al tamaño de las partículas seleccionadas, Ukrainczyk et al. (2016), por ejemplo, utilizaron materiales con partículas de hasta 80 µm. En este estudio, optamos por aquellos con máx. 75 µm, valor considerado satisfactorio por Ataie y Riding (2016) para asegurar la reactividad, que es inversamente proporcional a la densidad de partículas, y por tanto influye positivamente en las propiedades mecánicas del mortero.

En general, considerando los análisis para el CAE, que son inversos a los observados en el CBCA y CCA, y siguiendo los requisitos de NBR 12653 (ABNT, 2014), solo las dos últimas pueden clasificarse como puzolanas clase N, por contenido de agua, humedad y pérdida por fuego. Ambos alcanzaron un contenido de humedad inferior al 3% y no superaron el 10% del valor de pérdida por incendio. Y sumando el comportamiento de la ceniza ante las propiedades del mortero en estado plástico, trabajabilidad y absorción de agua, se espera una mejor reactividad en muestras que contienen CCA.

Entonces, con respecto a los resultados en sí mismos, no hubo una ganancia significativa en la resistencia a la compresión a los 14 días para ninguna de las muestras, Figura 2, como en Paris et al. (2016) y Abbas et al. (2017). Los CDP con un contenido de reemplazo de cemento del 15% lograron un mejor rendimiento mecánico, especialmente para CAE15. Esto se relaciona con factores como la menor tasa de reposición del cemento (García y Sousa-Coutinho, 2013; Carrasco et al., 2014; Ukrainczyk et al., 2016), a mayor cantidad de material reactivo, mejor trabajabilidad, cuando en comparación con CDP, y una mayor absorción de agua.

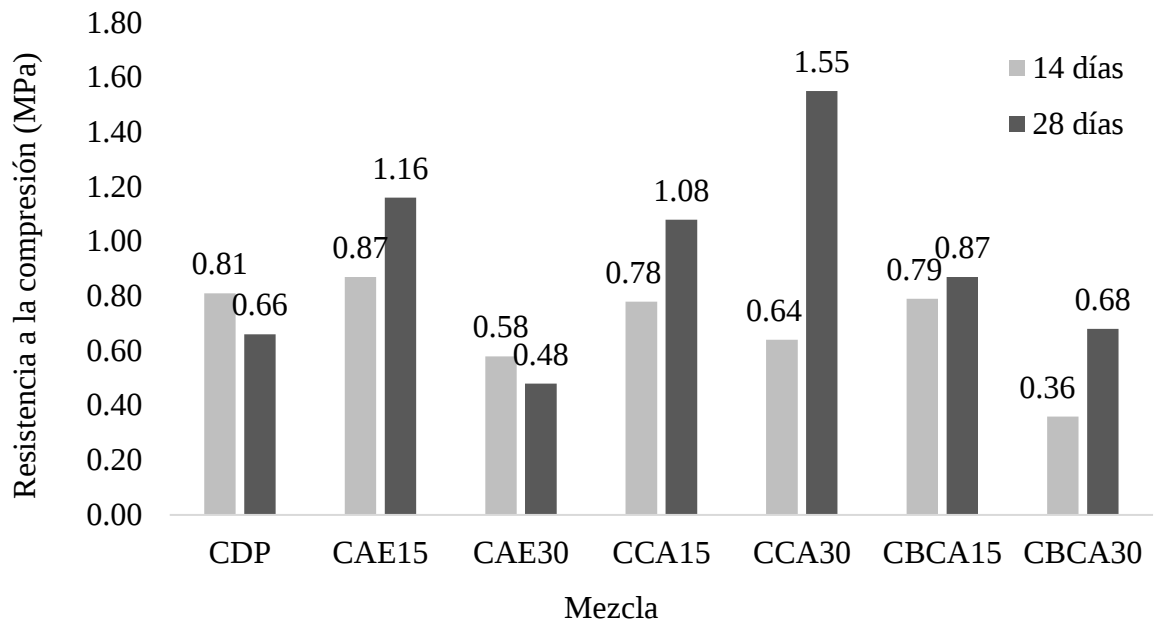


Figura 2. Comparación entre la resistencia promedio lograda en la prueba de compresión simple para cada mezcla a los 14 y 28 días (método de Tukey $p < 0.05$).

La causa del bajo desempeño del CDP se justifica por la no ocurrencia del efecto sinérgico entre la hidratación del cemento y la reacción puzolánica, que influye directamente en la resistencia a la compresión del mortero (Isaia, 2003; Berra et al., 2015). Por un lado, la mala acción de hidratación se debe posiblemente al uso de moldes de madera para moldear el CDP, un material de naturaleza permeable, y poca retención de agua durante el curado, como era de esperar. Por otro lado, la lenta reacción del cemento gris, Carrasco et al. (2014) y Rosales et al. (2017), sugieren que son necesarios períodos prolongados para que existan efectos considerados positivos en la resistencia a la compresión.

A los 28 días, el CAE30 no mostró ganancia de resistencia, las causas son las mismas que las señaladas para el CAE15 a los 14 días. Confirmando que las cenizas tienden a contribuir al desarrollo de resistencias mecánicas por su puzolanidad y actividad hidráulica, como en Berra et al. (2015). Los mejores resultados se obtuvieron para muestras con un contenido del 15% y para CCA30, estos también fueron identificados por Rajamma et al. (2009) y Wang (2015). En CCA30, la muestra con mayor ganancia de resistencia, se debe a la alta cantidad de sílice en su composición (Fernandes et al., 2016), Tabla 1, que puede reaccionar más fácilmente con el CH liberado, aumentando la resistencia de los morteros (Jamil et al., 2016).

Así, se puede decir que, incluso sin una ganancia significativa en la resistencia a la compresión, se consideró aceptable la sustitución parcial del cemento por cenizas de biomasa en un 15% en masa. Los resultados identificados en la Figura 2 y los encontrados por Rajamma et al. (2015), García y Sousa-Coutinho (2013), Carrasco et al. (2014) y Ukrainczyk et al. (2016), señalan que la resistencia de las muestras que contienen cenizas es mayor que la encontrada en CPR para diferentes tiempos de curado, es decir, 28 días para aquellas que contienen el residuo de biomasa y 90 días para aquellas sin material cementoso adicional.

De manera análoga, analizando los resultados obtenidos para la resistencia a la tracción por flexión, Figura 3, se observó que solo las trazas CBCA30 y CCA30 no superaron la resistencia CPR y que para CAE30 se alcanzó el mismo valor a los 14 días. Para la edad de 28 días, las trazas que contienen cenizas obtuvieron un mejor comportamiento para la resistencia a la tracción en flexión que para la compresión simple, lo que confirma el efecto retardado de las reacciones del cemento gris, principalmente para un 15% de reposición.

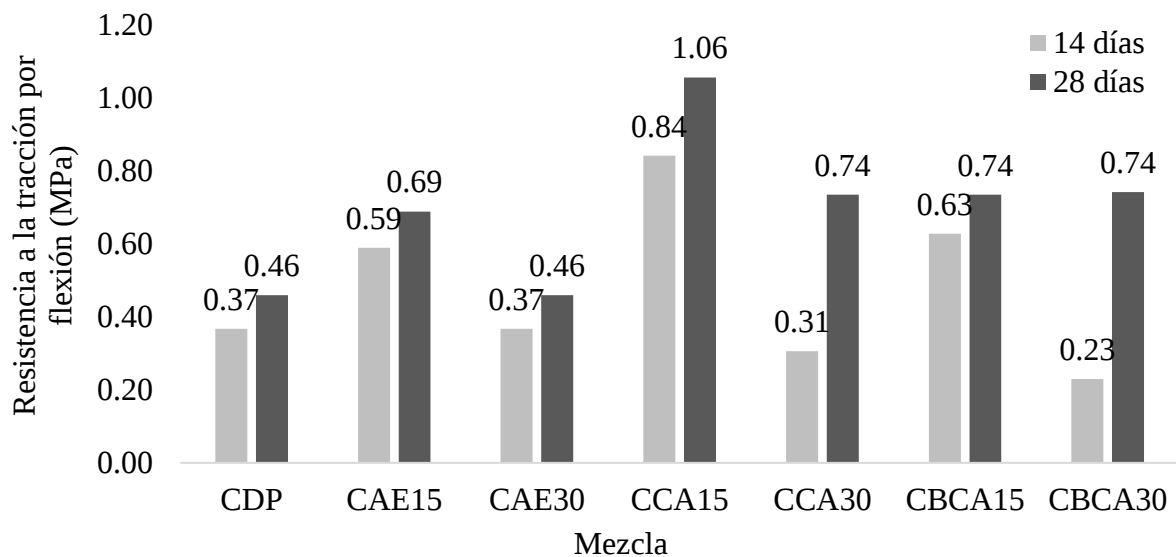


Figura 3. Comparación entre la resistencia media alcanzada en el ensayo de tracción por flexión para cada mezcla a los 14 y 28 días (método de Tukey $p < 0,05$).

Sin embargo, los resultados de la flexión difieren de los obtenidos por Rajamma et al. (2009), donde hubo una reducción gradual de la resistencia con el aumento del porcentaje de ceniza y, en consecuencia, un aumento de las reacciones puzolánicas, especialmente para tasas de reemplazo superiores al 20% (Chowdhury et al., 2015). Este fenómeno se puede controlar mediante la reactivación de los residuos y los procesos de trituración, como se hizo con las cenizas aquí estudiadas, lo que confirma la necesidad de someterlas a este tipo de pretratamientos, como señalan Jamil et al. (2016).

Finalmente, para identificar el fenómeno de la absorción de agua se siguieron las especificaciones presentadas por NBR 15259 (ABNT 2005). Establece que el índice de absorción de capilaridad debe calcularse como el promedio de las tres muestras sometidas a inmersión en agua durante 10 min y 90 min, Figura 4.

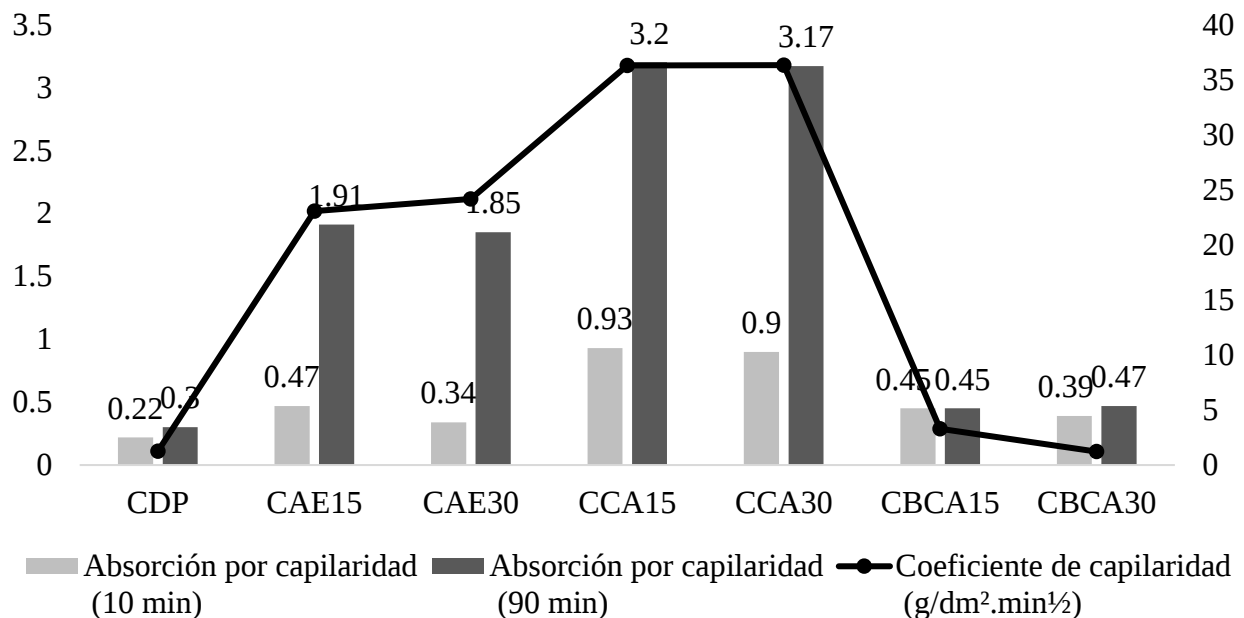


Figura 4. Prueba de absorción a los 28 días.

A partir de los resultados encontrados, se puede ver que la tasa de absorción disminuye, aunque sea de manera expresiva, a medida que la tasa de reemplazo de cemento aumenta del 15 al 30%. Según lo presentado por Jamil et al. (2016), Elinwa y Ejeh (2003), quienes identificaron una reducción en la absorción de agua, al agregar ceniza a razón del 15% en morteros, con un valor promedio de aproximadamente 0.8% y 1.25%, menos del 10% aceptado para materiales de construcción. Sin embargo, divergiendo de los estudios de Chowdhury et al. (2015), en el que la relación de absorción y adición de cenizas es directamente proporcional.

Para los valores más altos, CAE30 y CAE15, se produjeron por la presencia de poros abiertos en la estructura, lo que confirma los resultados de las pruebas de granulometría e índice de finura. En presencia de partículas de diferentes tamaños, aumenta la capacidad de absorción de agua. Por tanto, debido a la uniformidad y finura de los CBCA, la penetración de agua en ellos tiene valores cercanos a los del CPR. Por lo tanto, se concluye que la absorción disminuye a medida que disminuye la cantidad de huecos, por lo que el CBCA se puede utilizar como material de relleno. También es claro que, al aumentar los porcentajes de cenizas, se llenarán los huecos permeables, minimizando la tasa de absorción (Jamil et al., 2016; Rosales et al., 2017; Carrasco et al., 2014). Sobre la cura, según Aprianti et al. (2016), al incorporar material fino en sistemas cementosos, se deben utilizar diferentes procedimientos para promover la hidratación de este concreto. Una opción es el uso de superplastificantes (Ukrainczyk et al., 2016), con el fin de fijar la relación a/c y garantizar las condiciones de ejecución y rendimiento (Carasek, 2010). Para Ramos et al. (2013), Ataie y Riding (2016) el valor ideal de la relación a/c es equivalente a 0.4 y 0.45, respectivamente. Ante esto, la ceniza con mayor potencial para mejorar las características del mortero como sustituto parcial del cemento es el CCA. En cuanto a CAE y CBCA, se debe evaluar su potencial como material de relleno. Y un posible uso de una mezcla que contenga más de un tipo de ceniza.

4. CONCLUSIÓN

Cenizas aplicadas en matrices cementosas, se evidenció la viabilidad de uso como material cementante adicional, los criterios técnicos analizados están avalados por los encontrados en la literatura. Los pretratamientos redujeron la variación granulométrica de la ceniza, aumentando su superficie específica, y las partículas mejor acomodadas mostraron mayor reactividad. El contenido de materia orgánica no quemada influyó en la pérdida de masa al fuego, pero no lo suficiente como para evitar mejores resultados en el estado endurecido en comparación con el mortero de referencia. Cabe destacar que, de todos los análisis realizados, los morteros que contienen CCA obtuvieron el mejor desarrollo mecánico. El comportamiento de CAE y CBCA sugiere su aplicación como sustituto de la arena, por ejemplo, y puede ser objeto de estudio en futuras investigaciones, el efecto de relleno se identificó por la ganancia de resistencia que se produjo debido al comportamiento de las partículas, similares a las de la cal, ocupando huecos en la matriz de cemento. Sin embargo, no se debe descartar su uso como sustituto del cemento.

En cuanto al contenido de sustitución, para las bandas elegidas, el 15% es el contenido de sustitución ideal, sin embargo, mayores contenidos de sustitución pueden dar como resultado morteros con menor resistencia mecánica o más porosos. Por tanto, la referencia debe ser la aplicación del mortero, ya sea de colocación o de revestimiento, ya sea en zona exterior o interior. Los aquí estudiados, por su línea 1: 1: 6, y los resultados obtenidos, podrían utilizarse para la colocación de mampostería o baldosas cerámicas. Sin embargo, la viabilidad técnica de estas aplicaciones solo puede demostrarse mediante la realización de nuevos estudios.

Y en lo que respecta a la absorción de agua, que fue alta para todos los contenidos de ceniza, el mortero es muy poroso. La sugerencia es que después de realizar el tamizado y triturado de cenizas, se mejore la actividad puzolánica, se reduzca la cantidad de huecos en la matriz cementosa, o el uso de aditivos para controlar la relación a/c .

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Investigación y Desarrollo (CNPq) por financiar esta investigación (Número de proyecto 552118 / 2011-7).

6. REFERENCIAS

- Abbas, S., Kazmi, S. M. S., Munir, M. J. (2017), *Potential of rice husk for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates*. Construction and Building Materials. 132:61-70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.126>
- Aprianti, E., Shafigh, P., Zawawi, R., Hassa, Z. F. A. (2016), *Introducing an effective curing method for mortar containing high volume cementitious materials*. Construction and Building Materials. 107:365-377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.100>
- Arif, E., Clark, M. W., Lake, N. (2016), *Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Application in cement and mortar production*. Construction and Building Materials. 128:287-197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). *NBR 11579: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μ (nº 200)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). *NBR 5733: Cimento Portland com alta resistência inicial*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR NM 24: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). *NBR NM 18: Análise química – Determinação da perda ao fogo*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *NBR 15894-3: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- ASTM International. (2005). *ASTM C 204-05 Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus*. <https://doi.org/10.1520/C0204-05>
- ASTM International. (2009). *ASTM C 206-03 Standard Specification for Finishing Hydrated Lime*. <https://doi.org/10.1520/C0206-03R09>
- ASTM International. (2013). *ASTM D 7348 – 13 Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues*. <https://doi.org/10.1520/D7348-13>
- ASTM International. (2017). *ASTM D3173 / D3173M - 17a Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. <https://doi.org/10.1520/C0204-05>
- ASTM International. (2019). *ASTM C 1315-19 Standard Specification for Liquid Membrane-*

- Forming Compounds Having Special Properties for Curing and Sealing Concrete.* <https://doi.org/10.1520/C1315-19>
- ASTM International. (2019). ASTM C 270-19ae1 *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry.* <https://doi.org/10.1520/C0270-19AE01>
- ASTM International. (2019). ASTM C 309-19 *Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete.* <https://doi.org/10.1520/C0309-19>
- ASTM International. (2019). ASTM C 618-19 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.* <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- ASTM International. (2019). ASTM C 618-19 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.* <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- ASTM International. (2020). ASTM C 150M-20 *Standard Specification for Portland Cement.* https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-20
- Ataie, F. F., Riding, K. A. (2016). *Influence of agricultural residue ash on early cement hydration and chemical admixtures adsorption.* Construction and Building Materials. 106:274-281. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.091>
- Belviso, C. (2018), *State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues.* Progress in Energy and Combustion Science. 65:109-135. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.10.004>
- Berenguer, R. A., Silva, F. A. N., Torres, S. M., Monteiro, E. C. B., Helene, P., Neto, A. A. de M. (2018), *A influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento na resistência à compressão de argamassa.* Revista ALCONPAT. 8(1):30-37. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.187>
- Berra, M., Mangialardi, T., Paolini, A. E. (2015). *Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials.* Construction and Building Materials, 76:286-296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.052>
- British Standard (2002). BS EN 1015-18 *Methods of test for mortar for masonry. Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.*
- British Standard (2019). BS EN 1015-11 *Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.*
- Campos, M. O. (2014), *“Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto”.* Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, p. 321.
- Carasek, H. (2010), *Argamassas.* In: ISAIA, G. C. (Ed.). *“Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais”.* IBRACON, São Paulo, p.1-37.
- Carrasco, B., Cruz, N., Terrados, J., Corpas, F. A., Pérez, L. (2014), *An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks.* Fuel Processing Technology. 118:272-280. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077>
- Chatveera, B., Lertwattanaruk, P. (2014), *Evaluation of nitric and acetic acid resistance of cement mortars containing high-volume black rice husk ash.* Journal of Environmental Management. 133:365-373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.010>
- Chowdhury, S., Mishra, M., Suganya, O. (2015), *The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview.* Ain Shams Engineering Journal. 6 (2):429-437. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>
- de Souza, L. M. S., Fairbairn, E. M. R., Filho, R. D. T., Cordeiro, G. C. (2014), *Influence of initial CaO/SiO₂ ratio on the hydration of rice husk ash-Ca(OH)₂ and sugar cane bagasse ash-Ca(OH)₂ pastes.* Química Nova. 37 (10):1600-16605. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140258>
- Dubaj, E. (2000), *“Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre”.* Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 115.

- Elinwa, A. U., Ejeh, S. P. (2003), *Effects of incorporation of sawdust incineration fly ash in cement pastes and mortars*. Asian Architecture Build Eng. 3:1-7. <http://dx.doi.org/10.3130/jaabe.3.1>
- Esteves, T. C., Rajamma, R., Soares D., Silva, A. S., Ferreira, V. M., Labrincha, J. A. (2012), *Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars*. Construction and Building Materials. 26:687-693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.075>
- Fernandes, I. J., Calheiro, D., Kieling, A. G., Moraes, C. A. M., Rocha, T. L. A. C., Brehm, F. A., Modolo, R. C. E. (2016), *Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy*. Fuel Processing Technology. 165:351-359. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.086>
- Garcia, M. L., Sousa-Coutinho, J. (2013), *Strength and durability of cement with forest waste bottom ash*. Construction and Building Materials. 41:897–910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.081>
- Gluitz, A. C., Marafão, D. (2013), “*Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa*”. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p. 53.
- Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M. K., Zain, M. F. M. (2016), *Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review*. Construction and Building Materials. 116:128-140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.147>
- Isaia, G. C., Gastaldini, A. L. G., Moraes, R. (2003), *Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete*. Cement and Concrete Composites. 25:69-76. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00057-9)
- Jamil, M., Khan, M. N. N., Karim, M. R., Kaish, A. B. M. A., Zain, M. F. M. (2016), *Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar*. Construction and Building Materials. 128:185-198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.029>
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Patnaikuni, I., Wu, F. (2017), *Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction*. Construction and Building Materials. 148:231-240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.025>
- 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*. Journal of Civil Engineering. 21:274-284. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0737-5>
- Martirena, F., Monzó, J. (2017), *Vegetable ashes as Supplementary Cementitious Materials*. Cement and Concrete Research. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.015>
- Mauri, J., Ruiz, H. A., Raphael, B. A. F., Ker, J. C., Rezende, L. R. M. (2011), *Dispersantes químicos na análise granulométrica de latossolos*. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 34:1277-1284. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400021>
- Modolo, R. C. E., Silva, T., Senff, L., Tarelho, L. A. C., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Silva, L. (2015), *Bottom ash from biomass combustion in BFB and its use in adhesive-mortars*. Fuel Processing Technology. 129:192-202. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.015>
- Netto, R. M. (2006), “*Materiais pozolânicos*”. Dissertação Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, p.149.
- Noor-Ul-Amin, S. (2014), *A multi-directional utilization of different ashes*. Royal Society of Chemistry Advances. 4(107):62769–62788. <https://doi.org/10.1039/C4RA06568A>
- Prasara-a, J., Gheewala, S. H. (2017), *Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review*. Journal of Cleaner Production. 167:1020-1028. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.042>
- Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A. C., Allen, G. C., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M. (2009), *Characterization and use of biomass fly ash in cement-based materials*. Journal of Hazardous Materials. 172(2-3):1049-1060. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>
- Rajamma, R., Senff, L., Ribeiro, J. A., Ball, R. J., Aleen, G. C., Ferreira, V. M. (2015), *Biomass*

- fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement-based materials*". Composites Part B: Engineering. 77:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.019>
- Ramos, T., Matos, A. M., Sousa-Coutinho, J. (2013), *Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion*. Construction and Building Materials. 49:343–351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026>
- Resende, D. S. (2013), “*Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar*”. Tese Doutorado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 168.
- Rosales, J., Cabrera, M., Beltrán, M. G., López, M., Agrela, F. (2017), *Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars*. Journal of Cleaner Production. 154:424-435. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.024>
- Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M. P., Akasaki, J.L., Monzó, J., Payá, J. (2017), *Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems*. Industrial Crops and Products. 103:39-50. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.030>
- Salvo, M., Rizzo, M. C., Novajra, G., Canonico, F., Bianchi, M., Ferraris, M. (2015), *Biomass ash as supplementary cementitious material (SCM)*. Advances in Applied Ceramics. 114:S3-S10. <https://doi.org/10.1179/1743676115Y.0000000043>
- Ukrainczyk, N., Vrbos, N., Koenders, E. A. B. (2016), *Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials*. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. 30(2):137-148. <http://dx.doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2231>
- Wang, S. (2015), *Cofired biomass fly ashes in mortar: Reduction of Alkali Silica Reaction (ASR) expansion, pore solution chemistry and the effects on compressive strength*. Construction and Building Materials. 82:123-132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.021>
- Xu, W., Lo, Y. T., Ouyang, D., Memon, A., Xing, F., Wang, W., Yuan, X. (2015), *Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste*. Construction and Building Materials. 89:90-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.030>
- Zajac, G., Szyszlak-Bargłowicz, J., Gołbiowski, W., Szczepanik, M. (2018), *Chemical Characteristics of Biomass Ashes*. Energies. 11(11):2-15. <https://doi.org/10.3390/en11112885>