

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

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

* Autor de Contato: heberdepaula@hotmail.com

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

Recepção: 17/04/2020 | Aceitação: 30/12/2020 | Publicação: 01/05/2021

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.

Citar como: Gonçalves, C. F., Soares, A. F., Paula, H. M. (2021), “*Caracterização e viabilidade de utilização de cinzas de biomassa vegetal em argamassa*”, 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.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor C. F. Gonçalves foi responsável pela análise, discussão dos resultados, redação e revisão. A autora A. F. Soares elaborou a metodologia experimental, realizou experimentos e coletou dados. O autor H. M. Paula contribuiu com a ideia original, coordenação dos experimentos, orientação e supervisão de todas as atividades.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 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.

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

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la incorporación de cenizas de biomasa vegetal, chips de eucalipto (ECA), bagazo de caña de azúcar (SCBA) y cáscaras de arroz (RHA), en morteros mixto de cemento y cal, considerando sus propiedades y rendimiento mecánico. 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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos para o uso exclusivo do título da revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um segmento que responde por uma elevada demanda de matéria-prima, ao passo que libera quantidades significativas de CO₂ na atmosfera (Noor-Ul-Amin, 2014; Berenguer et al., 2018). Para minimizar esta problemática, alguns resíduos da agricultura têm sido incorporados pela indústria da construção (Chatveera e Lertwattanaruk, 2014). E muito disso devido ao fato de que as cinzas possuem propriedade pozolânica, que desempenham papel significativo quando incorporadas ao cimento (Hossain et al., 2016).

Essa propriedade é identificada em materiais chamados pozolânicos que possuem sílica ou alumina no estado amorfo, que em contato com água reagem com o óxido de cálcio presente na cal ou no cimento, originando uma substância com propriedades cimentícias (ASTM C 618-19; Farinha et al., 2018). Para tanto, além de um estado não cristalino, as pozolanas deverão possuir um refinamento de suas partículas, isto é, apresentar uma elevada área superficial específica (Roselló et al., 2017).

A composição física, química e mineralógica destes resíduos agroindustriais é diversa, sendo função do tipo de biomassa, espécie, condição de crescimento, técnicas de colheita, transporte, armazenamento, processo de combustão e de inúmeras outras condições que possam melhorar - ou não - o seu conteúdo (Zajac et al., 2018). Em geral, compõem-se de aluminossilicatos em fase amorfa e cristalina, sendo o dióxido de silício o de maior percentual em amostras de cinzas de casca de arroz (CCA) e bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), e o óxido de alumínio nas cinzas de origem lenhosa (Farinha et al., 2018; Fernandes et al., 2016; Kazmi et al., 2017; Ukrainczyk et al., 2016). Tem-se, também, a presença de óxidos de outros metais como o ferro, magnésio, cálcio e potássio. Além de carbonatos e carbono não queimado, comumente encontrados em cinzas de origem florestal como, por exemplo, a de cavaco de eucalipto (CCE). E que, quando aplicados em sistemas cimentícios, são responsáveis por uma demanda de água maior na mistura, em função da elevada perda ao fogo (Arif et al., 2016; Ban e Ramli, 2010; Garcia e Sousa-Coutinho, 2013; Ribeiro et al., 2017).

Apesar disso, os diferentes níveis de substituição podem causar a melhoria das propriedades de durabilidade, resistência da argamassa, diminuição do custo de material na construção (Hossain et al., 2016), boa compactação e baixa evolução do calor durante a hidratação (Noor-ul-amin, 2014), eficazes ao controlar expansões de deterioração devido a reações de álcali-agregado (Esteves et al., 2012) bem como, reduzem o uso de combustíveis fósseis, formam matéria-prima e geram rendimentos para os trabalhadores envolvidos nos processos de transporte, infraestrutura, desenvolvimento tecnológico e aplicação propriamente dita (Prasara-a e Gheewala, 2017).

Então, a utilização das cinzas como material de substituição parcial do cimento, verte para além das questões sustentáveis, englobando as econômicas e sociais (Prasara-a e Gheewala, 2017). Contudo, a comercialização dos resíduos e a aplicação na construção é quase inexistente, mesmo com o crescente interesse em materiais cimentícios suplementares, oriundos de biomassa, nas pesquisas de caráter científico (Roselló et al., 2017), ou com a possibilidade de que novos materiais possam melhorar o desempenho de edificações e materiais, promovendo maior controle de qualidade e minimizando o desenvolvimento de patologias, por exemplo. Com isso, faz-se necessário que mais estudos quanto a viabilidade de utilização dos resíduos de combustão em argamassas e concretos sejam realizados (Ukrainczyk et al., 2016).

Estudos esses impulsionados porque, além das cinzas apresentarem bons resultados quando substitutos parciais do cimento Portland, são subprodutos de commodities baratas e abundantes em todo globo, até então, lançadas em aterros sem nenhuma preocupação ambiental (Moraes et al., 2014; Zajac et al., 2018; Berenguer et al., 2018). Em 2012, 34 milhões de toneladas de CCA foram descartadas. No ano seguinte, nos Estados Unidos, estima-se que foram produzidas de 1,25 a 5,6 milhões de CBCA (Martirena e Monzó, 2017; Paris et al., 2016). E pelo crescente uso de biomassas

para geração de energia, uma das mais importantes fontes de produção renovável, com projeções de crescimento para os próximos anos, respondendo também por uma maior disponibilidade de cinzas (Zajac et al., 2018).

Ou ainda, a confirmação de que países como o Brasil possam ter indústrias capazes de beneficiar resíduos de biomassa para aplicação na construção, como é abordado nos trabalhos de Moraes et al. (2014) e Regô et al. (2015), por exemplo. O primeiro, analisou as possíveis utilizações para os subprodutos da cadeia do arroz, o último, caracterizou as CCA produzidas no país e a sua aplicação em matrizes cimentícias. Dos resultados, para ambos, as vantagens abordadas foram garantidas, além de evidenciarem que dos resíduos aqui obtidos, a composição química é pouco variável, facilitando assim o seu emprego em produtos da construção.

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é verificar a viabilidade técnica do uso de diferentes tipos de cinzas de biomassa – CCE, CBCA e CCA –, a diferentes porcentagens de substituição, como material cimentício suplementar em argamassas mistas, que contém em sua composição dois aglomerantes, o cimento e a cal, visando a diminuição parcial de cimento Portland.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e caracterização

A argamassa de referência utilizada é do tipo mista - cimento Portland, cal hidratada, agregado miúdo natural e água tratada, tal como especificado pela NBR 13529 (ABNT, 2013). O cimento é o de alta resistência inicial (CP – V ARI) ou do tipo III, para a NBR 5733 (ABNT, 1991) e ASTM C 150M-20, respectivamente. O cimento foi escolhido por possuir pouca ou nenhuma adição em sua composição, proporcionando uma melhor investigação do comportamento do material em função da incorporação dos resíduos.

A cal usada é a do tipo hidratada com carbonatos, classificada como CH – III, conforme NBR 7175 (ABNT, 2003) e ASTM C 206-3, conferindo a mistura maior plasticidade, melhor trabalhabilidade e maior retenção de água, além de ser tradicionalmente utilizada na região e de fácil obtenção. Por fim, o agregado miúdo é a areia natural seca, com denominação comercial “média” e especificações de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), sem nenhum tipo de tratamento como peneiramento ou lavagem. A areia foi extraída por dragagem nos rios Veríssimo e Paranaíba na cidade de Catalão – GO.

Os três tipos de cinza de biomassa vegetal empregadas são subprodutos da combustão, usada para geração de calor e energia, classificadas como classe C pela ASTM C 618, pozolanas vegetais para uso em concreto. A CCE foi obtida junto a uma mineradora e beneficiadora de nióbio e fosfato, o resíduo provém do emprego do cavaco de eucalipto em fornalhas para a geração de calor, com o intuito de secar a rocha fosfática, onde as temperaturas atingem entre 1000 e 1100° C. A CBCA, fornecida por uma usina produtora de açúcar, etanol e energia, é retirada de caldeiras, onde o bagaço da cana foi queimado para a geração de energia. A CCA é um subproduto de uma indústria alimentícia, que utiliza a casca para geração de calor, com o intuito de beneficiar o café. Para as duas últimas, não foram disponibilizadas informações quanto ao processo de obtenção dos resíduos.

A composição química determinada por Resende (2013), de Souza et al. (2014) e Berenguer et al. (2018), realizada pela técnica de Espectrometria de fluorescência de raios X, é apresentada na Tabela 1, são cinzas com particularidades similares as aqui estudadas.

Tabela 1. Concentração de óxido (% em massa) das cinzas analisadas.

Compostos	CCE (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 Tratamento das cinzas

Os resíduos de biomassa foram submetidos aos pré-tratamentos de peneiramento e moagem garantindo um aumento da superfície específica, com partículas de menor granulometria e, dessa forma, auxiliando a ocorrência da atividade pozolânica. Procedimentos esses sugeridos por Ramos et al. (2013), Matos e Sousa-Coutinho (2013), Salvo et al. (2015), Modolo (2015), Ataie e Riding (2016).

Assim, as cinzas foram passadas na peneira de malha 50 mesh (abertura de 297 µm), eliminando partículas grossas, em sua maioria constituídas por material inerte, como solo e fragmentos de rocha. Depois, moídas em um moinho de bolas por 30 min a uma rotação de 30 rpm - para períodos maiores, as partículas começam a se agregar (Xu et al., 2015).

2.3 Padrões normativos e ensaios experimentais

2.3.1 Caracterização das partículas

O ensaio de densidade de partículas seguiu a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária – EMBRAPA (2011) pelo método do balão volumétrico. As amostras de 20 g, separadas em recipientes de massa conhecida, foram colocadas para secar em estufa a 105 °C por 24 horas. Posteriormente, esfriadas em dessecador, pesadas e transferida para um balão volumétrico de 50 ml contendo álcool etílico, de modo a retirar o ar ou vazios das cinzas e do cimento.

Para o índice de finura das cinzas, NBR 15894-3 (ABNT, 2010), 20 g de amostra foram dispersas em 400 ml de solução de hexametáfosfato de sódio a 12,5 g/l e peneiradas em uma malha 45 µm, diâmetro nominal de 200 mm, sob um fluxo constante de água de vazão 5 l/s durante 10 min. O material retido foi transferido para um vidro de relógio, colocado para secagem em estufa a 105 °C por 24 horas, determinando-se assim a sua massa seca. Para aqueles com 20% ou mais de material retido na peneira 45 µm poderão ser classificadas como pozolanas, NBR 12653 (ABNT, 2014).

Quanto ao índice de finura do cimento NBR 11579 (ABNT, 1991), pelo método manual, a peneira utilizada foi a de malha 75 µm e número 200. O ensaio consiste em peneiramentos de modo que, inicialmente, 50 g de amostra foram pesadas e, terminado apenas quando o material passante corresponde a uma massa menor que 0,05 g. Essa propriedade também pode ser avaliada seguindo-se as indicações da NBR NM 76 (ABNT, 1998) ou ASTM C 204-05, para o Método de Blaine.

Os ensaios de gravimetria possibilitaram determinar o teor de umidade, NBR NM 24 (ABNT, 2003) e ASTM D 3173-73, onde foram pesadas 1 g de cada amostra, secas em estufa a 105 ± 4 °C por 30 min., com períodos subsequentes de 10 min., até que a massa atingida fosse constante. Os resultados determinados deverão ser menores ou iguais a 3 (três), tal como indicado na NBR 12653 (ABNT, 2014).

Na perda de fogo, NBR NM 18 (ABNT, 2004) pelo Método nº 1, as amostras de cinzas foram calcinadas a forno em uma mufla - Graus Bravac M2 Elétrico Inox –, durante 50 min. a 900 °C a uma taxa de aquecimento de 35 °C/min. Finalizada a queima, os cadinhos foram deixados por 5 (cinco) horas na mufla e, posteriormente, postos em dessecador para finalização do resfriamento e futura pesagem. O mesmo procedimento pode ser realizado seguindo as recomendações da ASTM D 7348 – 13, em etapa única, a uma temperatura máxima de 900 °C (Método B). Para que sejam classificados como pozolanas, NBR 12653 (ABNT, 2014), os limites de perda deverão ser menores ou iguais a 6.

2.3.2 Proporcionamento, moldagem dos corpos de prova e cura

A influência da substituição parcial da CCA, CBCA e CCE no desempenho da argamassa foi estudada através da comparação entre o comportamento de um traço tomado como referência, sem resíduos, e outro com a substituição de 15 e 30% em massa do cimento Portland para cada tipo de cinza, Tabela 2. Esses teores de substituição foram definidos, a partir dos melhores resultados apresentados nas pesquisas de Paris et al. (2016), Hossain et al. (2016), Abbas et al. (2017), Izabelle et al. (2011), Resende (2013) e Ukrainczyk et al. (2016).

O traço em volume foi o de 1:1:6 (cimento, cal e areia), podendo ser utilizada como argamassa de assentamento e revestimento, para ASTM C 270-19, argamassa do tipo N. E considerando as análises de Dubaj (2000) e Campos (2014), este proporcionamento apresentou melhor desempenho para as propriedades de argamassa. A quantidade de água foi determinada por meio do índice de consistência, NBR 13276 (ABNT, 2016), fixado no intervalo de 265 ± 5 mm.

Os corpos de prova prismáticos com substituição parcial do cimento foram identificados com a sigla referente a cada cinza – CCA, CCE e CBCA – e com índice 15, para aqueles com 15% de substituição, ou 30, para aqueles com 30% de substituição. Os corpos de prova moldados com o traço de referência, foram identificados com a sigla CPD (corpo de prova de referência).

O proporcionamento em massa utilizado na preparação dos corpos de prova de argamassa foi realizado de modo que o total de material seco da mistura fosse igual a 2,5 kg, Tabela 2. A mistura foi preparada de acordo com o método especificado pela NBR 16541 (ABNT, 2016), sem um misturador mecânico. E a fim de atingir o índice de consistência estabelecido, foi realizado o ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa (flow table), NBR 13276 (ABNT, 2016).

Tabela 2. Proporção em massa (kg) dos materiais utilizados para a produção das argamassas.

Amostra	Cimento	Cal	Areia Seca	Cinza	Água
CPD	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
CCE15	0,219			0,039	0,670
CCE30	0,181			0,077	0,725

Preparada a mistura, os corpos de prova (CDP) foram moldados em formato prismático, com dimensões 4cm x 4cm x 16cm, sendo produzidos 3 (três) corpos de prova por idade para a argamassa de referência e para cada tipo de cinza com as duas faixas de substituição, totalizando 42 corpos de prova (NBR 13279, 2005; BS EN 1015-11). Após a moldagem, os moldes com a mistura foram envoltos por papel filme e submetidos a cura seca em ambiente laboratorial, a uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 5\%$.

É sabido que, havendo perda de água e umidade durante a cura, as propriedades mecânicas e de absorção de água estarão comprometidas, por isso da necessidade de que seja realizada dentro dos padrões estabelecidos pela ASTM C 309-19 e ASTM C 1315-19. Contudo, a escolha por uma cura não submersa reflete o caráter da pesquisa em identificar o comportamento das cinzas em sistemas cimentícios, principalmente no que se refere a sua capacidade de interferir na umidade necessária a hidratação do cimento.

Completadas 48 horas, dado o fim do período de cura, os CDP foram retirados dos moldes e envoltos novamente em papel filme até o momento da realização dos ensaios de resistência mecânica.

2.3.1 Avaliação das argamassas no estado endurecido

Os ensaios de tração na flexão e compressão simples, NBR 13279 (ABNT, 2005) e BS EN 1015-11, foram feitos com o intuito de analisar o desenvolvimento da resistência mecânica da argamassa ao longo do tempo de cura aos 14 e 28 dias. A análise de resistência foi realizada apenas para essas idades uma vez que a reação pozolânica se dá de maneira lenta e, com isso, segundo Ataie e Riding (2016), para idades iniciais não se obtêm resultados consideráveis.

Os resultados encontrados para resistência à compressão e à tração na flexão aos 14 e 28 dias foram obtidos calculando-se a resistência média dos seis corpos de prova ensaiados para compressão, e os três ensaiados para tração na flexão, através da análise múltipla de médias utilizando o método de Tukey, a 5% ($p < 0,05$) de nível de confiança. Além disso, foi respeitado o valor de desvio absoluto máximo de 0,5 MPa para os resultados individuais atingidos na compressão e 0,3 MPa para os alcançados no ensaio de tração na flexão, NBR 13279 (ABNT, 2005).

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 28 dias, conforme prescrito pela NBR 15259 (ABNT, 2005). Inicialmente determinou-se a massa de cada corpo de prova ainda seco e, posteriormente, as amostras foram posicionadas sobre um suporte dentro de um recipiente com água, em imersão parcial para uma lâmina d'água constante de 5 ± 1 mm. Por fim, cada amostra foi retirada do recipiente, seca com pano úmido e pesada aos 10 min. e aos 90 min. dado o início do ensaio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização física e química analisada neste estudo, importante para a compreensão do comportamento das partículas e a sua influência nas reações pozolânicas, foi feita a partir dos resultados obtidos para a densidade de partícula (DP), a finura (F) de cada elemento, o teor de água (U) e a perda ao fogo (PF). Dos resultados indicados na Tabela 3 é possível observar que as amostras contendo CBCA apresentaram um menor volume em sua composição, assim como nos estudos de Kazmi et al. (2017), uma vez que esta grandeza é inversamente proporcional a DP (Aprianti et al., 2016). Logo, para a CCE, menor valor de DP encontrado, o volume é dez vezes maior do que seria caso não houvesse a substituição, estando de acordo com Gluitz e Marafão (2013), e que influenciará a resistência das argamassas como será visto adiante.

Tabela 3. Caracterização física dos elementos utilizados

Amostra	DP (g/cm ³)	F	U	PF
Cimento	2,73	3,14%	-	-
CCE	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%

Além disso, a partir da DP pode-se compreender o processo de acomodação das partículas que compõem o sistema cimentício, quando fortemente entrelaçadas e com poucos vazios, tem-se um melhor desempenho mecânico. Nesse sentido, os melhores resultados de resistência deverão ser vistos na CBCA e CCA, pois após serem previamente tratadas – moídas e peneiradas – as amostras apresentaram maior DP. Sem esse tratamento para a CCE, a resistência ou outra propriedade da argamassa poderia ser afetada de maneira negativa, tornando inapta a substituição do cimento pelas cinzas, por exemplo (Martirena e Monzó, 2017; Farinha et al., 2018).

Todavia, sabendo-se que o comportamento de uma argamassa é regido por outras propriedades, a moagem e o peneiramento poderiam deixar as cinzas altamente reativas como comprova Roselló et al. (2017), e com a atividade pozzolânica ocorrendo, o desempenho mecânico do sistema pode ser satisfatório. Então, analisando-se os resultados para o índice de finura e seguindo as especificações da ASTM C 618-19, a CBCA é de fato uma pozzolana, o teor máximo de material retido na peneira 45 μm é de 34%, ante os 31,72% acumulados. Para NBR 12653 (ABNT, 2014) nenhuma das cinzas seriam um material pozzolânico, o teor máximo é de 20%.

Entretanto, mesmo não sendo pozzolanas dentro dos limites estabelecidos pelas normatizações vigentes, as menores partículas, ou seja, o pouco material passante na peneira 45 μm , se concentram perto da interface agregado e matriz de cimento, causando efeito de preenchimento de vazios ou efeito fíler, e que podem contribuir com ganho de resistência no estado endurecido (Khan et al., 2017; Aprianti et al., 2016; Resende, 2013). Esse fenômeno é o mesmo observado em sistemas cimentícios contendo cal hidráulica.

Enquanto, para a argamassa no estado fresco, o índice de finura revela que aqueles de menor valor, no caso CBCA, não há alteração na trabalhabilidade para nenhuma faixa de substituição, isto porque, partículas maiores que 45 μm afetam a plasticidade da mistura (Netto, 2006). Analogamente, para as CCA, tem-se uma maior perda de trabalhabilidade, principalmente quando do aumento de 15 para 30% de substituição do cimento. Assertivas igualmente comprovadas pelo índice de consistência que estão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 13276 (ABNT, 2016), Figura 1.

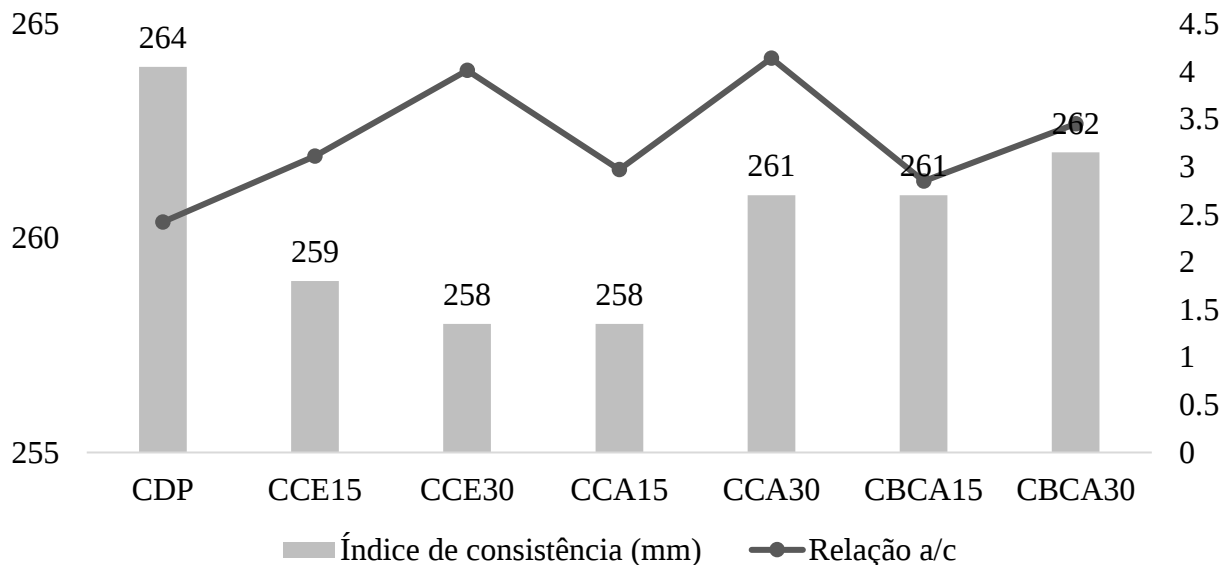


Figura 1. Resultados para índice de consistência e relação a/c.

Do ensaio de índice de finura foi possível realizar também uma análise visual das amostras retidas na peneira. Para as CCE, aplicando-se o hexametáfosfato de sódio, composto químico dispersante (Mauri et al., 2011), notou-se a presença de pequenos cristais. Estas partículas respondem pelo alto

teor de água na amostra, Figura 1, em função da elevada capacidade de absorção (Netto, 2006). Justificando não só o acentuado volume de água, que favorece a manutenção da trabalhabilidade (Ataie, 2016), como a umidade, que é satisfatória durante a cura da argamassa (Rajamma et al., 2009).

E devido à natureza higroscópica desses elementos cristalinos, com mais água liberada, tem-se uma maior perda de massa da CCE quando submetida ao teste de perda ao fogo, por isso os 70,20% de perda, a maior dentre as cinzas analisadas. Além disso, essa ocorrência se dá, também, pela presença de matéria orgânica não queimada (Prasara-a, 2017), que durante o aquecimento em mufla, libera mais uma parcela de CO₂ e água.

De todo modo, a presença desses cristais não é favorável às propriedades da argamassa. Para Aprianti et al. (2016), os elementos em forma amorfa são mais reativos. No entanto, em virtude de que grande parte do material retido seja cristalino e que a sua finura atingiu um valor de 52,63%, é possível que o restante da amostra, material passante e amorfo, tenha compensado a reatividade da cinza. Com isso, para a CCE, o considerável ganho de resistência é função do volume de cinza adicionado a argamassa devido a sua baixa DP, como indicado anteriormente.

E no que diz respeito a demanda de água nas amostras, utilizando-se do índice de consistência, Figura 1, em relação ao CPD, há uma elevada quantidade de água para as misturas que contenham cinzas em substituição parcial ao cimento, exceto para a CBCA. A maior quantidade requerida foi para o traço CCA30 com 20% a mais quando comparado ao CPD. Segundo Ukrainczyk et al. (2016), isso ocorre por causa da forma irregular e volumosa das cinzas. Berra et al. (2015) evidenciam a elevada área superficial específica das cinzas em comparação ao cimento Portland, além da natureza porosa de suas partículas, como sugerido por Arif et al. (2016).

Essas características são outros fatores que igualmente respondem por uma maior absorção de água. Bem como, a presença de grande quantidade de matéria orgânica disponível para hidratação durante o endurecimento da argamassa, conforme identificado por Rajamma et al. (2009) e confirmado anteriormente pelo ensaio de perda ao fogo. Percebe-se, portanto, que a trabalhabilidade diminuiu quando da presença de cinzas em substituição parcial ao cimento, corroborando com os resultados obtidos por Belviso (2018), Aprianti et al. (2016), Ukrainczyk et al. (2016) e aqueles aqui abordados.

Apesar disso, a diminuição encontrada foi de 2,3% ante os 34,4% detalhada na literatura. Essa diferença se deu devido ao tamanho das partículas selecionadas, Ukrainczyk et al. (2016), por exemplo, utilizaram materiais com partículas de até 80 µm. Neste estudo, optou-se por aquelas com diâmetro máx. de 75 µm, valor considerado satisfatório por Ataie e Riding (2016) para assegurar reatividade, que é inversamente proporcional a densidade da partícula, e, portanto, influenciam positivamente as propriedades mecânicas da argamassa.

De modo geral, considerando as análises para a CCE, que são inversas as observadas nas CBCA e CCA, e seguindo os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014), somente as duas últimas podem ser classificadas como pozolanas de classe N, para teor de água, umidade e perda ao fogo. Ambas atingiram teor de umidade menor que 3% e não ultrapassaram em 10% o valor de perda ao fogo. E somando-se o comportamento das cinzas ante as propriedades da argamassa no estado plástico, trabalhabilidade e absorção de água, é previsto uma melhor reatividade nas amostras contendo CCA.

Então, no que se refere aos resultados propriamente dito, não houve ganho significativo de resistência à compressão aos 14 dias para nenhuma das amostras, Figura 2, tal como em Paris et al. (2016) e Abbas et al. (2017). Os CPD com teor de 15% de substituição de cimento conseguiram melhor desempenho mecânico, em especial para a CCE15. Isso está relacionado a fatores destacados como o menor índice de substituição do cimento (Garcia e Sousa-Coutinho, 2013; Carrasco et al., 2014; Ukrainczyk et al., 2016), a maior quantidade de material reativo, a melhor trabalhabilidade, quando se comparada a CDP, e a maior absorção de água.

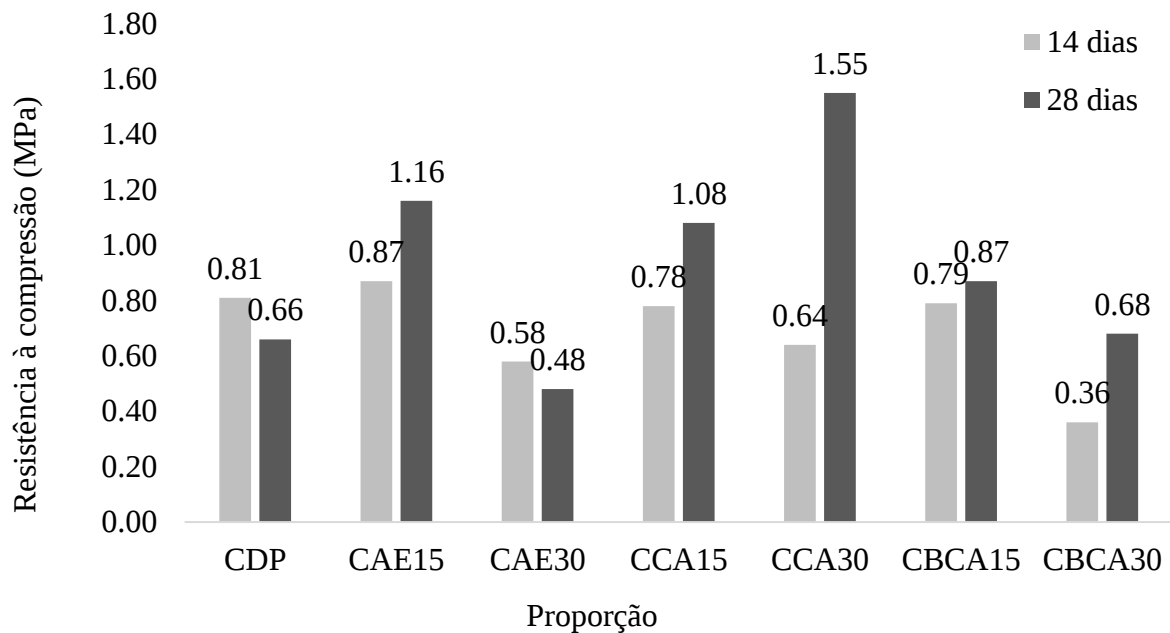


Figura 2. Comparativo entre a resistência média alcançada no ensaio de compressão simples para cada traço aos 14 e 28 dias (Método de Tukey $p < 0,05$).

A causa do mal desempenho dos CPD é justificado pela não ocorrência do efeito sinérgico entre a hidratação do cimento e a reação pozolânica, que influencia diretamente a resistência à compressão da argamassa (Isaia, 2003; Berra et al., 2015). De um lado a má ação de hidratação, possivelmente decorre da utilização de fôrmas de madeira para moldagem dos CDP, um material de natureza permeável, e a pouca retenção de água durante a cura, como esperado. Do outro, a reação cinza-cimento lenta, Carrasco et al. (2014) e Rosales et al. (2017), sugerem que são necessários longos períodos para que haja efeitos considerados positivos na resistência à compressão.

Aos 28 dias, o CCE30 não apresentou ganho de resistência, as causas são as mesmas apontadas para a CCE15 aos 14 dias. Confirmando que as cinzas tendem a contribuir para o desenvolvimento da resistência mecânica em razão da sua pozolanicidade e atividade hidráulica, tal como em Berra et al. (2015). Os melhores resultados foram obtidos para amostras com um teor de 15% e para a CCA30, esses também foram identificados por Rajamma et al. (2009) e Wang (2015). Na CCA30, a amostra com maior ganho de resistência, é função da elevada quantidade de sílica em sua composição (Fernandes et al., 2016), Tabela 1, que podem reagir mais facilmente com o CH liberado, aumentando a resistência das argamassas (Jamil et al., 2016).

Com isso, pode-se afirmar que, mesmo sem ganho significativo de resistência à compressão, a substituição parcial de cimento por cinzas de biomassa foi considerada aceitável para 15% em massa. Os resultados identificados na Figura 2 e aqueles encontrados por Rajamma et al. (2015), Garcia e Sousa-Coutinho (2013), Carrasco et al. (2014) e Ukrainczyk et al. (2016), apontam que a resistência das amostras contendo cinzas é maior que a encontrada nos CPD para tempos de curas diferentes, isto é, 28 dias para aqueles contendo o resíduo de biomassa e 90 dias para aqueles sem nenhuma adição de material cimentício suplementar.

De forma análoga, analisando os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão, Figura 3, foi observado que apenas os traços CBCA30 e CCA30 não superaram a resistência do CPD e que para CCE30 um mesmo valor aos 14 dias foi atingido. Para a idade de 28 dias, os traços contendo cinzas obtiveram melhor desempenho para a resistência à tração na flexão do que para a compressão simples, confirmando o efeito retardatário das reações cinza-cimento, principalmente para uma substituição de 15%.

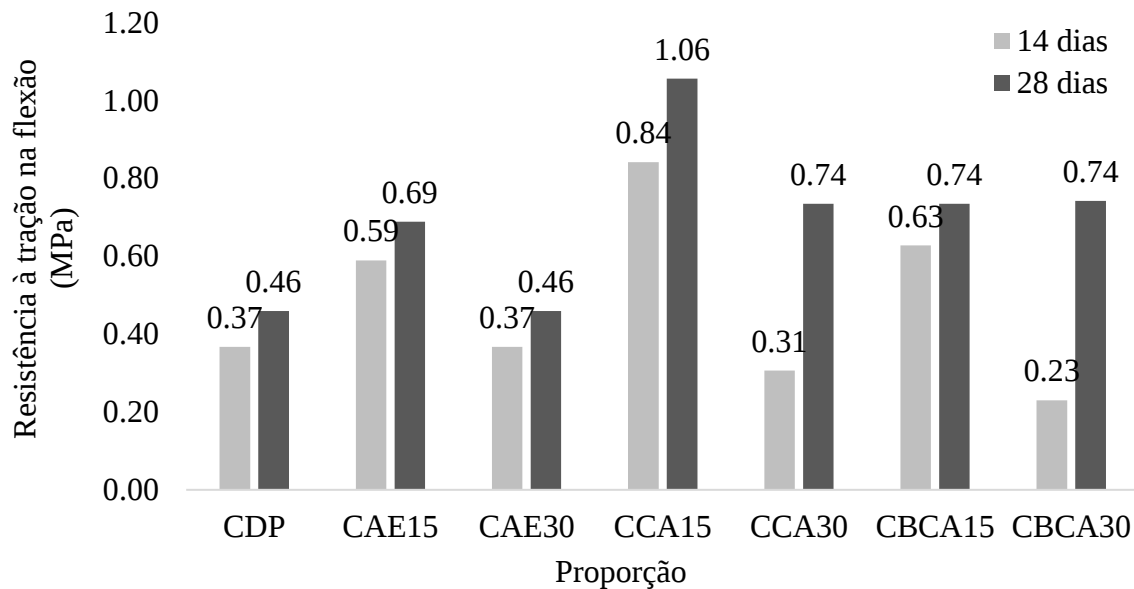


Figura 3. Comparativo entre a resistência média alcançada no ensaio de tração na flexão para cada traço aos 14 e 28 dias (Método de Tukey $p < 0,05$).

Contudo, os resultados para flexão divergem daqueles obtidos por Rajamma et al. (2009), onde houve uma redução gradual da resistência com o aumento da porcentagem de cinza e, consequente aumento das reações pozolânicas, principalmente, para taxas de substituição maiores que 20% (Chowdhury et al., 2015). Esse fenômeno pode ser controlado com a requieira dos resíduos e processos de moagem, como foi feito para as cinzas aqui estudadas, confirmando-se a necessidade de se as submeter a estes tipos de pré-tratamentos, tal como indicado por Jamil et al. (2016). Por último, para identificar o fenômeno de absorção da água, seguiu-se as especificações apresentadas pela NBR 15259 (ABNT 2005). Nela consta que o índice de absorção por capilaridade deve ser calculado como a média dos três corpos de prova submetidos à imersão em água por 10 min e 90 min, Figura 4.

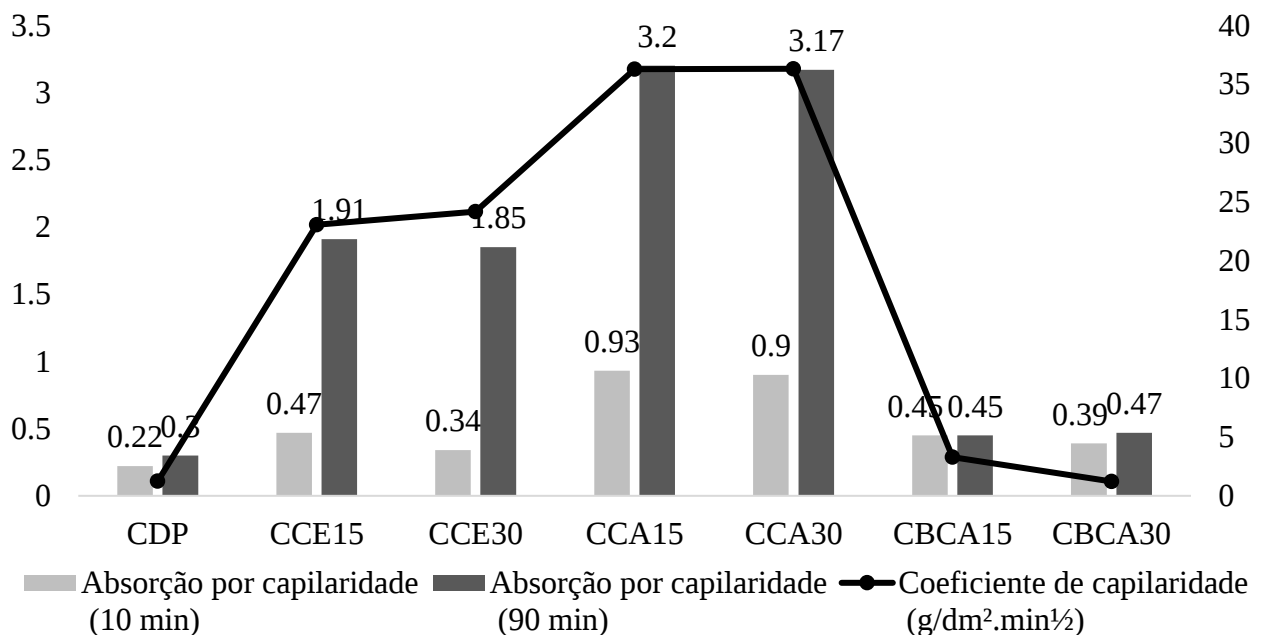


Figura 4. Ensaio de absorção aos 28 dias.

A partir dos resultados encontrados percebe-se que a taxa de absorção diminui, mesmo que inexpressivamente, à medida que se aumenta a taxa de substituição do cimento de 15 para 30%. Tal como apresentado por Jamil et al. (2016), Elinwa e Ejeh (2003), que identificaram uma redução da absorção de água, quando da adição de cinzas a uma taxa de 15% em argamassas, com um valor médio de aproximadamente 0,8% e 1,25%, abaixo dos 10% aceito para materiais de construção. Divergindo, porém, dos estudos de Chowdhury et al. (2015), no qual a relação absorção e adição de cinzas é diretamente proporcional.

Para os maiores valores, CCE30 e CCE15, eles se deram em virtude da presença de poros abertos na estrutura, confirmando os resultados para os ensaios de granulometria e índice de finura. Na presença de partículas com tamanhos diversos, aumenta-se a capacidade de absorção de água. Logo, por razão da uniformidade e finura das CBCA, a penetração de água nessas apresentam valores próximos aos dos CPD. Com isso, conclui-se que a absorção diminui à medida que a quantidade de vazios diminui, assim, a CBCA pode ser utilizada como material de preenchimento. Torna-se claro, também que, aumentando-se os percentuais de cinzas, os vazios permeáveis serão preenchidos, minimizando a taxa de absorção (Jamil et al., 2016; Rosales et al., 2017; Carrasco et al., 2014).

Sobre a cura, segundo Aprianti et al. (2016), quando da incorporação de material fino em sistemas cimentícios, deve-se fazer o uso de diferentes procedimentos para promover essa hidratação do concreto. Uma opção é a utilização de superplastificantes (Ukrainczyk et al., 2016), com o intuito de fixar a relação a/c e garantir condições de execução e desempenho (Carasek, 2010). Para Ramos et al. (2013), Ataie e Riding (2016) o valor ideal da relação a/c equivale a 0,4 e 0,45, respectivamente.

Diante disso, a cinza com maior potencial para melhorar as características das argamassas como substituta parcial do cimento é a CCA. Quanto a CCE e CBCA, deve-se avaliar o seu potencial como material de preenchimento. E ainda uma possível utilização de uma mistura contendo mais de um tipo de cinza.

4. CONCLUSÃO

Aplicada as cinzas nas matrizes cimentícias, ficou evidente a viabilidade de uso como um material cimentício suplementar, os critérios técnicos analisados são atestados por aqueles encontrados na literatura. Os pré-tratamentos reduziram a variação granulométrica das cinzas, aumentando a sua superfície específica, e as partículas estando melhor acomodadas, apresentaram maior reatividade. O teor de matéria orgânica não queimada influenciou a perda de massa ao fogo, mas não o suficiente para impedir melhores resultados no estado endurecido quando se comparados a argamassa de referência.

Cabe destacar que, de todas as análises feitas, as argamassas contendo CCA obtiveram o melhor desenvolvimento mecânico. O comportamento das CCE e CBCA sugere a sua aplicação como substituto da areia, por exemplo, podendo ser objeto de estudo em pesquisas futuras, o efeito de preenchimento foi identificado pelo ganho de resistência que ocorreu devido ao comportamento das partículas, semelhantes às da cal, ocupando vazios da matriz cimentícia. Contudo, não se deve descartar a sua utilização como substituto do cimento.

Quanto ao teor de substituição, para as faixas escolhidas, 15% é o teor de substituição ideal, contudo, maiores teores de substituição podem implicar em argamassas com menor resistência mecânica ou mais porosas. A referência deve ser, portanto, a aplicação da argamassa, se de assentamento ou revestimento, se área externa ou interna. Aquelas aqui estudadas, em função do seu traço, 1:1:6, e dos resultados obtidos, poderiam ser utilizadas para assentamento de alvenaria ou para revestimento cerâmico. Todavia, a viabilidade técnica para essas aplicações só pode ser comprovada realizando-se novos estudos.

E em se tratando da absorção de água, que foi elevada para todos os teores de cinzas, a argamassa é altamente porosa. A sugestão é que sejam realizadas após o peneiramento e moagem a requieima da cinza, melhorando a atividade pozolânica, diminuindo a quantidade de vazios na matriz cimentícia, ou ainda, a utilização de aditivos para controle da relação a/c.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo financiamento desta pesquisa (Projeto número 552118 / 2011-7).

6. REFERÊNCIAS

- 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/10.1520/10.1520/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.pecs.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., Lertwattanakur, 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>