

Desenvolvimento de argamassa álcali-ativada baseada em cinzas de caldeira de dendê e queima de madeira

Development of alkali-activated mortar based on palm oil fuel ash and wood ash

Vinícius Almeida Coelho 
Raildo Alves Fiuza Junior 
Francisco Gabriel Santos Silva 

Resumo

Os materiais álcali-ativados são conhecidos por apresentarem rápido desenvolvimento de elevada resistência mecânica, alta estabilidade química e possível reutilização de resíduos durante sua formulação, o que permite reaproveitar recursos e reduzir impactos ambientais. O presente trabalho desenvolveu argamassas álcali-ativadas empregando cinzas de caldeira de dendê e de queima de madeira, beneficiadas por meio de moagem e peneiramento. Avaliaram-se as características físico-químicas dos materiais por meio de ensaios de difração de raios laser, difração e fluorescência de raios x e termogravimetria, e formularam-se aglomerantes variando as relações molares CaO/SiO_2 e $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Foram avaliadas seis formulações, duas das quais com metacaulim como fonte complementar de Al_2O_3 . Avaliadas as propriedades mecânicas dos aglomerantes, formularam-se e avaliaram-se três argamassas com variação do teor volumétrico de agregado em 25% e 50% quanto a trabalhabilidade, resistência mecânica, absorção de água e desenvolvimento de eflorescência. Houve desenvolvimento total de resistência com apenas 2 dias, e resistência à tração média de 3,54 MPa e à compressão de 10,5 MPa. As argamassas apresentaram baixa susceptibilidade ao desenvolvimento de eflorescência e taxa de absorção de 9,6%, o que confirma o potencial de aproveitamento dessas cinzas como material precursor para argamassas.

Palavras-chave: Álcali-ativação. Argamassa. Cinza industrial. Resíduo.

Abstract

Alkali-activated materials are known by its fast development of high mechanical strength and high chemical stability, and the possibility to reuse waste in its formulation contributes to the reduction of several environmental impacts. The present developed an alkali-activated mortar based on palm oil fuel ash and wood ash. To this end, the physical and chemical characteristics of the materials were evaluated through tests of laser diffraction, x-ray diffraction and fluorescence, and thermogravimetry, followed by the formulation of binders by varying the CaO/SiO_2 and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratios. Six formulations were tested and metakaolin was used in two of them as a complementary source of Al_2O_3 . After evaluating the mechanical properties of the binders, three mortars were formulated with a 25% and 50% variation in the volumetric aggregate content. Total strength development was observed in just 2 days, achieving an average flexural strength of 3.54 MPa and compressive strength of 10.5 MPa. The mortars showed low susceptibility to the development of efflorescence and an absorption rate of 9.6%, confirming the reuse potential of the ashes as precursors for the development of mortars.

Keywords: Alkali-activation. Mortar. Industrial ash. Residue.

¹Vinícius Almeida Coelho
¹Universidade Federal da Bahia
Salvador - BA - Brasil

²Raildo Alves Fiuza Junior
²Universidade Federal da Bahia
Salvador - BA - Brasil

³Francisco Gabriel Santos Silva
³Universidade Federal da Bahia
Salvador - BA - Brasil

Recebido em 25/12/20
Aceito em 15/01/23

Introdução

Os aglomerantes álcali-ativados (AAA) são conhecidos por apresentarem desempenho comparável ou superior aos tradicionais produtos baseados em cimento Portland, material de construção mais utilizado no mundo. Entre as características que os tornam interessantes estão o rápido desenvolvimento de elevada resistência mecânica, baixa fissuração, alta resistência química ao ataque de ácidos e sulfatos, e estabilidade sob elevadas temperaturas (HUSSIN *et al.*, 2015; PASSUELLO *et al.*, 2017).

Diversos benefícios ambientais são associados à produção dos álcali-ativados, considerados como uma alternativa potencialmente positiva para reduzir as elevadas emissões de gases associadas à produção de argamassas e concretos de cimento Portland em até 75% (YANG; SONG; SONG, 2013), incluindo menor custo de produção e consumo de energia, além da possibilidade de reutilização de resíduos e subprodutos para formação de novos materiais (CAPASSO *et al.*, 2019; SONG *et al.*, 2016). O desenvolvimento dos AAA também é impulsionado por seu potencial comportamento físico-químico, com elevada resistência mecânica, resistência a altas temperaturas, baixa permeabilidade, forte aderência a produtos de cimento Portland e estabilidade química, apresentando ainda propriedades eletroquímicas que os tornam efetivos para situações de reparo estrutural (CRIADO, 2015; HUSSIN *et al.*, 2015).

Materiais álcali-ativados

Um AAA é um tipo de polímero inorgânico sintetizado pela reação entre uma solução alcalina altamente concentrada e um material precursor fonte de aluminossilicatos. Tal reação produz uma rede polimérica tridimensional cuja estrutura varia de acordo com a matéria-prima e as condições de ativação (PROVIS; BERNAL, 2014). Durante a reação, o ataque da solução ativadora libera monômeros de aluminossilicatos oriundos dos precursores que reagem entre si e se condensam em um gel aglomerante composto predominantemente por fases amorfas (SI; GUO; DAI, 2019).

Diversos materiais podem ser utilizados como precursores desde que possuam quantidades expressivas de sílica, alumina ou óxido de cálcio na composição, sendo usual o tratamento com moagem e calcinação para otimizar ou mesmo viabilizar seu uso, além da combinação com outros materiais complementares (DEMBOVSKA *et al.*, 2017). A solução ativadora deve possuir elevado pH, sendo usualmente utilizados hidróxidos de metais alcalinos, como NaOH e KOH, associados a silicatos para aumentar a disponibilidade de sílica solúvel no sistema e promover melhorias na trabalhabilidade e no desempenho mecânico das misturas (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2014).

Sistemas com baixa razão molar CaO/SiO_2 tendem a precipitar aluminossilicatos hidratados de sódio (gel N-A-S-H), requerendo meios altamente alcalinos e cura em temperaturas acima de 60 °C. Naqueles com razões maiores, predominam as reações entre cálcio e silício, que produzem rapidamente silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratados (C-S-H e gel C-A-S-H), condensando em temperatura ambiente e em meios medianamente alcalinos (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2014; PROVIS; BERNAL, 2014).

Nessa perspectiva, tem-se buscado, entre os resíduos de outras indústrias, potenciais fontes de alumínio, cálcio e silício que possam contribuir para a produção de AAA, sendo encontrados resultados positivos com o uso de escórias de alto forno, cinza volante, rejeitos de mineração e cinzas como as de casca de arroz e bagaço de cana (BEZERRA *et al.*, 2019; DEMBOVSKA *et al.*, 2017; SULTHAN, 2019).

Cinzas agroindustriais

Cinzas de caldeiras da agroindústria do dendê, conhecidas por apresentar bom desempenho pozolânico como material complementar ao cimento Portland (APRIANTI *et al.*, 2015; COELHO *et al.*, 2019), têm atraído atenção para seu potencial uso como precursor para a álcali-ativação graças à elevada quantidade de silício em sua constituição e seu alto volume de produção mundial (KABIR *et al.*, 2017).

Atualmente, o óleo de dendê é líder em produção e consumo entre os principais óleos comestíveis comercializados, com produção mundial crescente, que já ultrapassa as 76 milhões de toneladas anuais (UNITED..., 2019). Estima-se que, do total de material que chega para ser processado na indústria, 21% correspondam à produção de óleo e 45% correspondam a cascas, fibras e engaços, que são secos e utilizados como biomassa no próprio processo de extração do óleo ou em usinas elétricas (ARIFFIN; HUSSIN, BHUTTA, 2011; GAGG, 2014; THOMAS; KUMAR; AREL, 2017).

Tal processo gera grande quantidade de cinzas, estimada em torno de 5% do total de biomassa, o que corresponde a 8 milhões de toneladas anuais. Tamanho volume de cinzas é normalmente disposto em aterros sem qualquer retorno comercial, ocupando grandes áreas e demandando recursos para transporte e manutenção (APRIANTI *et al.*, 2015; THOMAS; KUMAR; AREL, 2017).

Cinzas resultantes do uso de madeira como biomassa também encontram espaço como precursores, especialmente devido ao alto teor de cálcio e alumínio característico desse tipo de resíduo (ABDULKAREEM; RAMLI; MATTHEWS, 2019; HASSAN *et al.*, 2019). A composição das cinzas sofre variações de acordo com o tipo de planta, a temperatura e a tecnologia da queima, o que as torna materiais adequados para uso como precursor complementar (HASSAN *et al.*, 2019).

De forma semelhante ao tratamento do dendê, o processo de queima de madeira como biomassa resulta em uma grande produção mundial de cinzas. Dados da Associação Mundial de Bioenergia (WORLD..., 2019) mostram que, em 2017, 1,9 bilhão de metros cúbicos de madeira foi utilizado como combustível para produção de energia, aquecimento e fins alimentícios, sendo a principal destinação desse resíduo a disposição em aterros, o que traz preocupações sobre os impactos ambientais (MILOVANOVIĆ *et al.*, 2019).

Dessa forma, o presente trabalho contribui com o conhecimento sobre a produção e utilização de aglomerantes e argamassas álcali-ativadas por meio da combinação de dois resíduos agroindustriais, as cinzas de caldeira de dendê e de queima de madeira, ativadas com solução de silicato de sódio alternativo, além de incentivar potenciais formas de aproveitamento sustentável de tais materiais no âmbito de aplicações associadas à indústria da construção civil.

Materiais e métodos

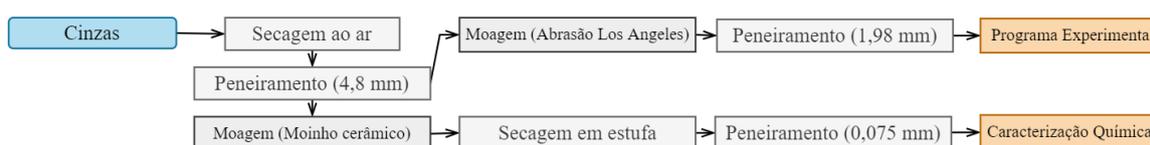
Materiais precursores

Foram utilizadas cinzas de caldeira de dendê (CCD), cinzas de queima de madeira (CQM) e metacaulim (MK), caracterizados quanto à granulometria e superfície específica por difração de raios laser em granulômetro Mastersizer 3000E (Malvern Panalytical), massa específica por picnometria com bomba de vácuo conforme a NBR 6458 (ABNT, 2016), comportamento térmico por termogravimetria (TG) em termobalança de análise simultânea DTG 60H (Shimadzu) sob fluxo de ar sintético de 100 ml/min, taxa de aquecimento de 20 °C/min até a temperatura de 1.000 °C com amostras de aproximadamente 15 mg, composição química via fluorescência de raios x por dispersão em comprimento de onda em analisador S8 Tiger (Bruker) e composição mineralógica por difração de raios x em difratômetro D8 Advance (Bruker), com ânodo de cobre operando a 40 kV e 30 mA, ângulo de variação 2θ entre 5° e 80°, e velocidade de varredura de 2°/min. Os difratogramas foram analisados qualitativamente no software QualX2.0 (ALTOMARE *et al.*, 2015) associado à base de dados POW_COD Inorganic 2007.

A CCD utilizada neste trabalho é resultante da queima de biomassa em caldeiras durante o processo de extração do óleo de dendê pela empresa Oldesa – Óleo de Dendê Ltda., no município de Nazaré, BA. A biomassa é composta principalmente de engaços de dendê, sendo adicionados materiais complementares durante os períodos de baixa produção, com menor volume de cachos. Entre os materiais complementares estão subprodutos da própria indústria, como as fibras do mesocarpo e cascas da amêndoa do dendê, além de lenha de eucalipto.

Um fluxograma do processo de beneficiamento dos resíduos é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do beneficiamento

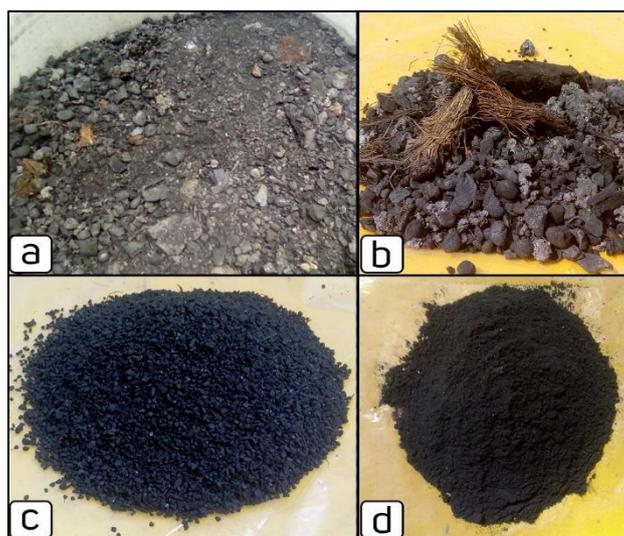


A cinza bruta, retirada das caldeiras, apresenta coloração escura e presença de materiais que não foram totalmente queimados, como fibras de engaço e cascas de palmiste (Figura 2a). O beneficiamento do resíduo consistiu inicialmente na secagem ao ar seguida de peneiramento em peneira de abertura 4,8 mm para remoção de material indesejado (Figura 2b). O material seguiu para moagem em aparelho de Abrasão Los Angeles Burguer SN 509, em procedimento similar ao proposto por Ranjbar *et al.* (2014a). Foram realizados 8.000 ciclos a 33 RPM com 12 esferas de aço de 5 cm de diâmetro e 500 g de massa, com volume de material inferior a 25% do volume da câmara. No final da moagem havia fragmentos de cascas remanescentes, que foram removidos por peneiramento em malha de abertura 1,98 mm (Figura 2c), sendo utilizado na pesquisa o material passante (Figura 2d).

As amostras de CCD destinadas aos ensaios de caracterização química foram submetidas a moagem em moinho de bolas cerâmico (Quimis Q298), com 50 esferas de 25 mm de diâmetro por 9.000 ciclos a 60 RPM, para evitar possível contaminação das amostras com ferro. Desse montante, a parcela passante na peneira de abertura 0,075 mm foi seca em estufa a 100 °C por 24 h.

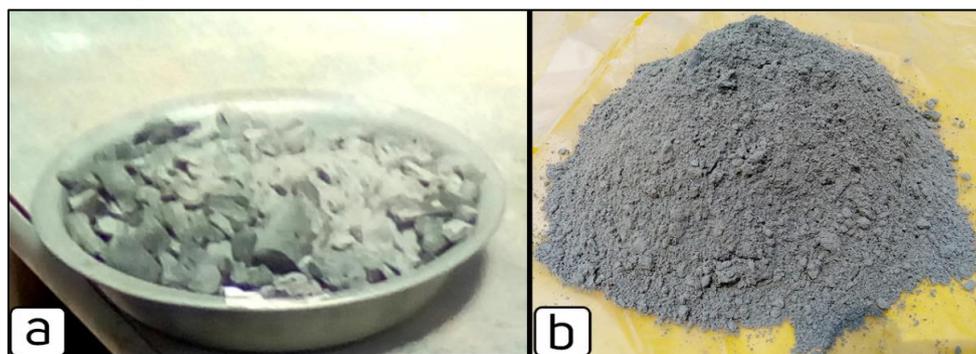
A CQM é oriunda da queima de lenha como biomassa em fornos de uma indústria de produção de gêneros alimentícios da cidade de Cruz das Almas, BA. A madeira predominantemente utilizada no processo é conhecida localmente como jurema (*Mimosa tenuiflora* [Willd]), uma árvore muito comum no Nordeste brasileiro e bastante utilizada como biomassa graças a seu elevado poder calorífico. A cinza bruta, retirada dos fornos, possuía coloração predominantemente cinzenta (Figura 3a), com diversos fragmentos de carvão e detritos (pregos e pedaços de cerâmica, por exemplo). O beneficiamento desse material seguiu os mesmos procedimentos aplicados para a CCD (Figura 3b).

Figura 2 - Cinza de caldeira de dendê



Nota: (a) Cinza bruta; (b) material indesejado retido na peneira de abertura 4,8 mm; (c) cascas indesejadas retidas na peneira 1,98 mm; e (d) resíduo pós-moagem, utilizado na pesquisa.

Figura 3 - Cinza de queima de madeira



Nota: (a) Resíduo bruto; e (b) CQM após peneiramento e moagem.

O MK é produzido por meio da calcinação de argilas caulínicas, sendo sua composição diretamente dependente da composição química e mineralógica destas. Nesta pesquisa foi utilizado o HP Ultra, da fabricante Metacaulim do Brasil (Figura 4).

Solução ativadora

Como ativador alcalino foi utilizado silicato de sódio produzido pela reação entre hidróxido de sódio e sílica ativa apresentada na Equação 1. O silicato de sódio é um dos principais ativadores empregados para alcali-ativação, principalmente pela benéfica disponibilização de sílica solúvel para as reações. A produção comercial de tal reagente está associada a um elevado consumo de energia e emissão de poluentes (TURNER; COLLINS, 2013), impactos negativos que são significativamente amenizados pelo processo adotado nesta pesquisa, que foi descrito por Matos (2018) e Geraldo *et al.* (2018). Neste, é inicialmente produzida solução de hidróxido de sódio em água e então adicionada sílica ativa à mistura de forma gradual, procedendo-se com agitação da mistura até completar a dissolução da sílica.



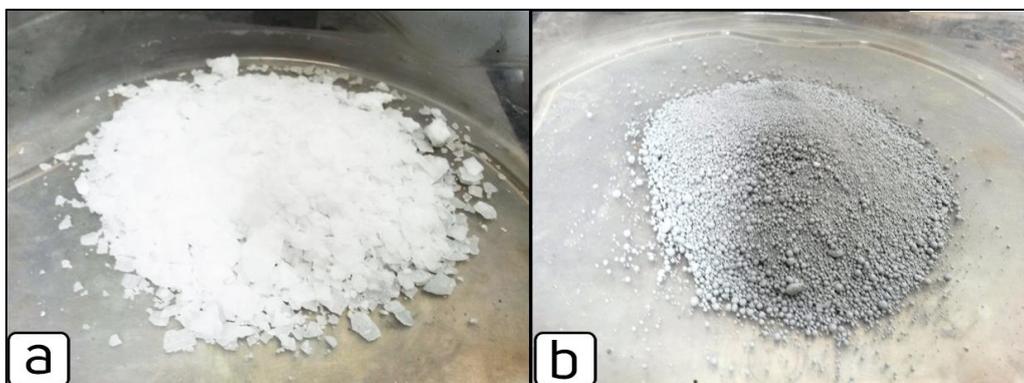
A proporção entre os reagentes para produção do silicato de sódio foi determinada com a metodologia de dosagem por resolução de sistemas lineares proposta por Coelho *et al.* (2022), visando fixar a razão mássica $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ do ativador, também conhecida como módulo de sílica (Ms), em 1,40 (ISLAM *et al.*, 2014; YUSUF, 2015).

A solução de hidróxido de sódio (com concentração de 10 mol/L) foi produzida com hidróxido em escamas (Figura 5a), com grau de pureza de 98%. A sílica ativa utilizada é comercial e foi doada pela fabricante Ferbasa (Figura 5b). A água utilizada durante toda a etapa experimental foi proveniente do sistema de abastecimento da Universidade Federal da Bahia.

Figura 4 - Metacaulim



Figura 5 - Hidróxido de sódio e sílica ativa



Nota: (a) Hidróxido de sódio em escamas; e (b) sílica ativa.

Formulação dos aglomerantes

O traço dos aglomerantes (Tabela 1) foram determinados visando fixar os parâmetros de proporção mássica entre ativador e precursor (conhecida como razão líquido/sólidos ou L/S) em 0,50, variando-se a razão molar CaO/SiO₂ entre 0,30 e 1,00 e a razão SiO₂/Al₂O₃ entre 8 e 17. Tais faixas foram selecionadas com base em valores recomendados pela literatura em trabalhos que utilizaram precursores similares (ISLAM *et al.*, 2014; MATOS, 2018; MIJARSH; JOHARI; AHMAD, 2015; RANJBAR *et al.*, 2014a, 2014b; SALIH *et al.*, 2015a, 2015b; YUSUF, 2015; YUSUF *et al.*, 2014).

Os aglomerantes A4 e A5 incorporaram MK como fonte de alumina, sendo a principal diferença entre eles a razão CaO/SiO₂. O aglomerante A6 foi formulado buscando-se atingir a menor razão SiO₂/Al₂O₃ possível apenas com as cinzas. Tal resultado só foi possível com a variação da razão L/S, o que impactou a dose de álcalis (M+) deste grupo. Foi utilizada razão L/S mínima de 0,34 para evitar a formulação de misturas demasiadamente secas (ZHANG *et al.*, 2018).

A mistura foi feita em misturador eletromecânico, adicionando-se primeiro a solução ativadora, agitando por 30 s, e então os precursores, agitando por mais 1 min. Foi feita pausa para homogeneização manual do aglomerante, seguindo pela agitação mecânica por mais 3 min, totalizando tempo total de mistura em aproximadamente 5 min.

Inicialmente se procedeu com a secagem dos precursores em estufa (24 horas a 100 °C), no entanto foi observada intensa liberação de bolhas durante a moldagem, o que comprometeu a estrutura e a estabilidade das amostras. Dessa forma, optou-se por trabalhar com os materiais em estado de armazenamento, considerando sua umidade como água adicional durante o cálculo das razões molares. A umidade presente nos materiais foi quantificada em 15%, 5%, 1,6% e 0,06% para a CCD, CQM, MK e areia respectivamente.

Ao término da mistura, os aglomerantes foram despejados em moldes prismáticos acrílicos de 40x40x160 mm e adensados por queda em procedimento adaptado da NBR 13279 (ABNT, 2005a) em duas camadas, sendo manualmente realizadas 30 quedas à altura aproximada de 2 cm, por camada.

Os aglomerantes A1, A2 e A3 permaneceram nos moldes por 24 h, já os traços A4, A5 e A6 apresentarem resistência suficiente para desforma em apenas 2 h. As amostras foram destinadas à cura em temperatura ambiente, em embalagens plásticas, até atingir a idade designada para os ensaios. As etapas de preparo descritas são apresentadas na Figura 6.

Formulação das argamassas

Agregado miúdo

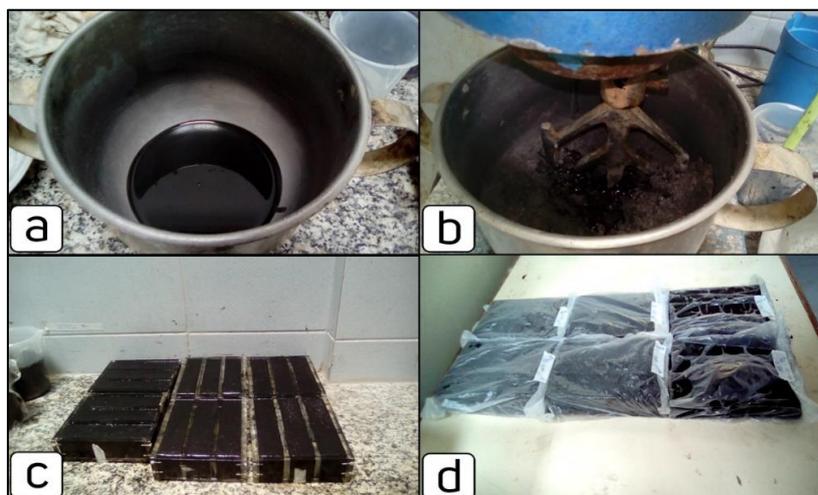
Como agregado miúdo para formulação das argamassas foi utilizada areia comercializada na cidade de Salvador, BA, caracterizada quanto a granulometria (ABNT, 2003b), massa específica (ABNT, 2009), massa unitária (ABNT, 2006) e teor de material pulverulento (ABNT, 2003a).

Tabela 1 - Traços dos aglomerantes com principais parâmetros

Traço	CCD	CQM	MK	Solução NaOH	Sílica ativa	CaO/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O	L/S	M+ ¹
A1	100,0	8,7	0	39,9	14,4	0,29	17,25	0,30	5,17	15,85	0,59	9,87%
A2	100,0	39,0	0	51,0	18,5	0,61	17,10	0,34	5,89	14,74	0,57	9,61%
A3	100,0	92,5	0	70,6	25,7	1,01	16,89	0,40	6,81	13,67	0,56	9,39%
A4	100,0	181,9	21,6	111,0	40,5	1,19	8,01	0,41	3,28	12,78	0,54	9,14%
A5	100,0	14,6	13,4	47,0	17,1	0,29	7,89	0,28	2,20	15,23	0,57	9,66%
A6	100,0	88,6	0	41,5	15,1	1,24	13,49	0,32	4,38	17,11	0,34	5,64%

Nota: medidas em gramas, razões molares adimensionais. ¹M+ se refere à “dose de álcalis”, razão mássica entre Na₂O no ativador e a massa de precursores.

Figura 6 - Preparo dos aglomerantes



Nota: (a) Ativador na cuba do misturador; (b) adição das cinzas na mistura; (c) aglomerantes nos moldes prismáticos; e (d) aglomerantes em cura após desforma.

Dosagem

Entre os aglomerantes produzidos, aquele que apresentou melhor desempenho mecânico foi selecionado para a formulação das argamassas (A4). Foram formulados três traços visando avaliar a influência de diferentes teores de agregado (Tabela 2), sendo adotadas as proporções volumétricas de 25% e 50%. Para garantir a trabalhabilidade das misturas com 50% foi necessário introduzir mais água na mistura, feita de duas formas, um traço com adição de água extra e outro com adição de solução de hidróxido de sódio, similar ao procedimento adotado por Mijarsh, Johari e Ahmad (2015).

O processo de mistura das argamassas foi semelhante ao dos aglomerantes, com menor tempo de mistura devido ao fato de a trabalhabilidade ser atingida mais rapidamente e um dos traços ter apresentado ganho de resistência ainda no misturador, totalizando 3 min.

Métodos de ensaio

Aglomerantes

Os aglomerantes A1, A2 e A3, formulados em uma primeira etapa da pesquisa, foram avaliados quanto à resistência à tração na flexão e à compressão axial aos 7 dias em prensa servocontrolada da fabricante Contenco, modelo HD-20T, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005a). Os grupos A4, A5 e A6 foram avaliados quanto à resistência à tração aos 2 e 14 dias e resistência à compressão aos 2, 7 e 14 dias.

Argamassas

A resistência mecânica das argamassas foi avaliada por resistência à tração na flexão e compressão nas idades de 7 e 14 dias. A influência do agregado nas propriedades de taxa de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica seca foi avaliada com corpos de prova cilíndricos, seguindo a metodologia de ensaio da NBR 9778 (ABNT, 2005b).

Também foi avaliada a formação de eflorescência acelerada das argamassas, com metodologia de exposição adaptada das observações de Castro (2019), Bem e Medeiros (2019), consistindo na exposição de corpos de prova prismáticos de dimensões 40x40x160 mm à lâmina de água destilada com profundidade de 5 mm por 7 dias em ambiente de laboratório, seguida por secagem em estufa a 100 °C. Foram registradas imagens das faces expostas dos corpos de prova no início e final do ensaio, avaliando-se quantitativamente o surgimento de eflorescência em termos da área afetada, calculada com o software livre ImageJ (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012).

Tabela 2 - Traços das argamassas (em gramas)

Argamassa	CCD	CQM	MK	Solução NaOH	Sílica ativa	Areia	Volume de agregado	H ₂ O _{Add}	Solução NaOH _{Add}
AR25	100	181,9	21,6	111	40,5	209,1	25%	-	-
AR50H	100	181,9	21,6	111	40,5	627,4	50%	60 ml	-
AR50S	100	181,9	21,6	111	40,5	627,4	50%	-	70 ml

Análise estatística

Os dados obtidos nos ensaios de resistência mecânica foram amostrados conforme critério do Desvio Absoluto Máximo prescrito pela NBR 13279 (ABNT, 2005a), sendo os resultados obtidos avaliados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% e um fator de variação a depender da análise, que poderia ser tipo de aglomerante, teor de agregado ou idade de ensaio. As análises foram realizadas nos softwares Microsoft Excel e Past (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001). Para facilitar o entendimento, o fator empregado é destacado juntamente com os resultados nas seções seguintes.

Resultados e discussões

Materiais precursores

Granulometria, massa específica e superfície específica

A Figura 7 apresenta a curva granulométrica dos precursores, onde se pode observar que o processo de moagem produziu materiais finos, com exceção do metacaulim, que possui origem industrial. Os diâmetros médios foram de 50,2 μm , 28,3 μm e 23,4 μm , para a CCD, CQM e MK respectivamente, próximos aos apresentados por Yahya *et al.* (2013) para cinzas de caldeira e algumas classes de cinza volante empregadas em álcali-ativação.

Uma vez que a granulometria atua principalmente como indicador da reatividade dos precursores e diante da velocidade da álcali-ativação (SOUTSOS *et al.*, 2016), tem-se melhor aproveitamento do potencial dos precursores quando mais de 50% do material possui granulometria inferior a 45 μm (ISLAM *et al.*, 2014; KHANKHAJE *et al.*, 2016). Nesse sentido, a CCD apresentou 48,2% de sua granulometria inferior a 40 μm , a CQM, 60%, e o MK, 73,6%.

A massa e a superfície específica dos precursores são apresentadas na Tabela 3. As massas específicas encontradas para os precursores se encontram dentro da faixa esperada com base na literatura (ABDULKAREEM; RAMLI; MATTHEWS, 2019; ABOSHIA *et al.*, 2018; AL-MULALI *et al.*, 2015). Já a superfície específica da CCD está ligeiramente menor do que o usualmente relatado (entre 915 m^2/kg e 1.871 m^2/kg). Isso se deve ao uso de processos de calcinação sob altas temperaturas em fornalhas a gás, seguido de segunda etapa de moagem para produção de granulometria mais fina por tais estudos (ELBASIR; MEGAT JOHARI; AHMAD, 2019; SALIH *et al.*, 2015b). A superfície específica da CQM se encontra dentro da faixa usualmente utilizada (entre 567 m^2/kg e 6.260 m^2/kg). Este tipo de resíduo apresenta grande variabilidade devido às diferentes propriedades físicas da biomassa (MILOVANOVIĆ *et al.*, 2019).

Composição química

A composição química dos materiais precursores e da sílica ativa é apresentada na Tabela 4, onde se destaca na CCD as parcelas dos óxidos de potássio e silício, totalizando 39,5% da composição, e sua elevada perda ao fogo (PF), de 31,65%. O expressivo teor de K₂O das cinzas está associado à presença majoritária de engaços de dendê na biomassa (TAY; SHOW, 1995).

A CQM apresenta elevado teor de óxido de cálcio (CaO), típico de cinzas de madeira, e significativa contribuição de K₂O, que pode ser visto como um contribuinte positivo para a alcalinidade das misturas (CHEAH *et al.*, 2017). Em ambas as cinzas se observa baixa concentração de óxido de alumínio (Al₂O₃), o que pode afetar o desempenho de aglomerantes que utilizam apenas elas como material precursor. A partir disso, tem-se o metacaulim como material complementar, com elevados teores de Al₂O₃ e SiO₂.

Difração de raios x

O difratograma da CCD é apresentado na Figura 8, onde são observados picos referentes às fases de quartzo (00-901-3321), calcita (00-901-4891) e óxido de silício (00-412-4079), sendo os óxidos de silício e cálcio

predominantes em sua composição química. Também é observado um característico halo amorfo, entre 18° e 40° (2 θ) (SALIH *et al.*, 2015b).

A Figura 9 apresenta o difratograma da CQM, onde se observam picos referentes às fases de carbonato (00-702-2027), hidróxido de cálcio (00-100-8780), carbonato (00-153-6439) e cloreto de potássio (00-900-8651). A presença do pico de carbonato de cálcio (CaCO₃) próximo aos 29° (2 θ) é característica das cinzas de madeira, o que foi verificado também por Hassan *et al.* (2019) e Matos (2018). É interessante observar que a presença do potássio em cinzas de madeira está associada a contribuições positivas para a alcalinidade das reações (CHEAH *et al.*, 2017).

No difratograma do metacaulim (Figura 10) se observam picos referentes às fases de quartzo (00-153-8064), muscovita (00-900-1058) e caulinita (00-901-4999). Há também um halo amorfo entre 20° e 30° (2 θ), característico da perda de cristalinidade da caulinita durante o processo térmico de produção do metacaulim (YUAN *et al.*, 2016).

Figura 7 - Curva granulométrica dos precursores

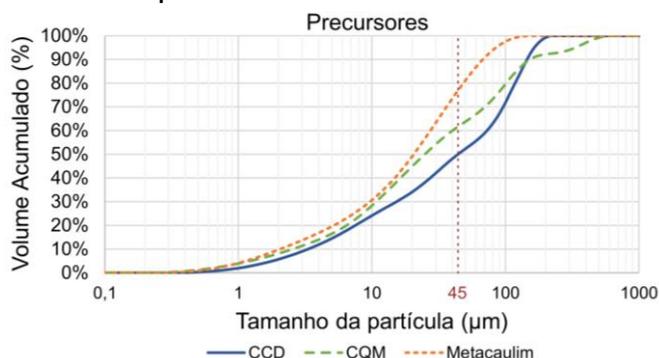


Tabela 3 - Massa e área superficial específica dos precursores

PROPRIEDADE	CCD	CQM	MK
Massa específica (g/cm ³)	2,17	2,77	2,73
Área superficial específica (m ² /kg)	606,5	872,3	948,1

Tabela 4 - Composição química dos materiais (%)

ÓXIDO	CCD	CQM	Metacaulim	Sílica ativa
Al ₂ O ₃	3,62	1,60	42,17	0,15
CaO	6,35	41,93	0,09	0,56
Cl	1,10	1,48	0,02	0,36
Fe ₂ O ₃	6,11	0,77	5,76	2,28
K ₂ O	16,43	8,20	0,81	2,78
MgO	4,66	2,34	0,10	1,53
MnO	0,13	0,14	0,12	0,16
Na ₂ O	0,75	1,78	-	1,13
P ₂ O ₅	4,32	1,74	0,07	0,14
SiO ₂	23,09	2,56	45,85	89,89
SO ₃	0,95	1,75	0,18	-
SrO	0,09	0,50	< 0,01	< 0,01
TiO ₂	0,47	0,17	1,37	-
Perda ao fogo (PF)	31,65	34,90	2,07	-

Figura 8 - Difratoograma da CCD

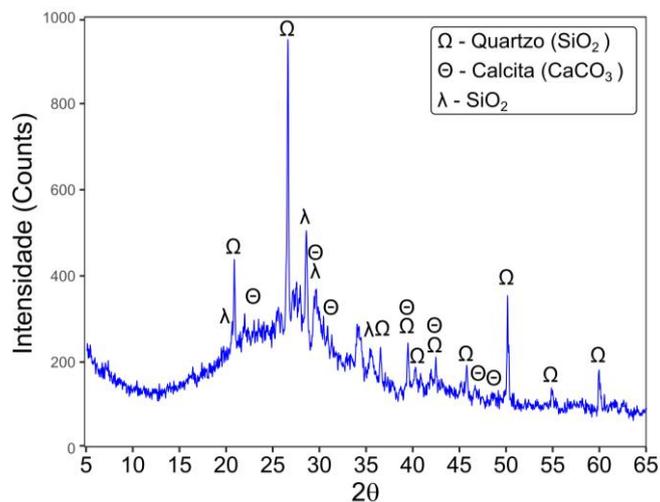


Figura 9 - Difratoograma da CQM

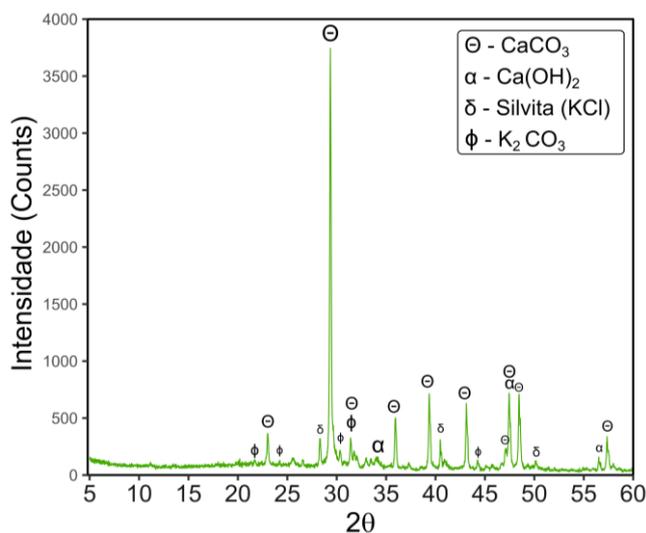
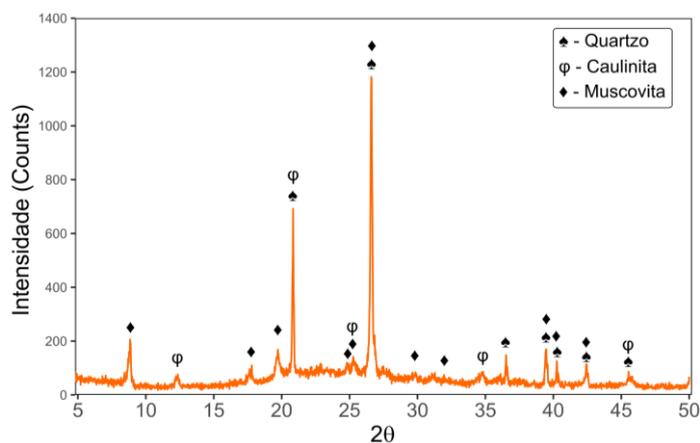


Figura 10 - Difratoograma do metacaulim



Termogravimetria

A Figura 11 apresenta as curvas de TG e termogravimetria derivada (DTG) da CCD, onde se observam perdas de massa relativas à perda de água livre, na faixa entre 30 °C e 150 °C, e descarbonatação associada à queima de carvão residual do processo de queima nas caldeiras, entre 250 °C e 600 °C (ELBASIR; MEGAT JOHARI; AHMAD, 2019).

Análises térmicas das biomassas utilizadas nas caldeiras da indústria do dendê, como casca de palmiste, engaços e fibras do mesocarpo, mostram duas variações importantes: a primeira na faixa entre 200 °C e 400 °C, que pode estar associada à combustão da celulose e lignina, e a segunda entre 350 °C e 650 °C, associada à queima do carvão. No caso das cascas de palmiste, também há contribuição da descarbonatação (IDRIS; RAHMAN; ISMAIL, 2012). Visto que tais materiais passaram por processo de queima, dando origem à CCD, conclui-se que a maior perda de massa está relacionada à presença de carvão não queimado, evidente pela coloração escura do material.

As curvas de TG/DTG da CQM são apresentadas na Figura 12, sendo indicadas quatro faixas principais de perda de massa do material. A primeira, entre 30 °C e 150 °C, está associada à desidratação da amostra, de forma similar à CCD, ainda que em parcela menor. A segunda faixa está associada à desidratação do hidróxido de cálcio, que se decompõe em óxido de cálcio e água a partir dos 420 °C até os 500 °C (FERNANDES *et al.*, 2017). A terceira faixa ocorre até os 760 °C, sendo associada à queima de carvão e descarbonatação, principal contribuição para perda de massa desse tipo de material (ABDULKAREEM; RAMLI; MATTHEWS, 2019). Conforme Thy *et al.* (2006), a decomposição do carbonato de cálcio se inicia próximo aos 500 °C, sendo observada em cinzas de madeira a presença do composto até os 720 °C. Misra, Ragland e Baker (1993) registraram que a partir dos 600 °C também pode ocorrer a decomposição do carbonato de potássio, ainda que com menor expressividade.

Figura 11 - Termogravimetria da CCD

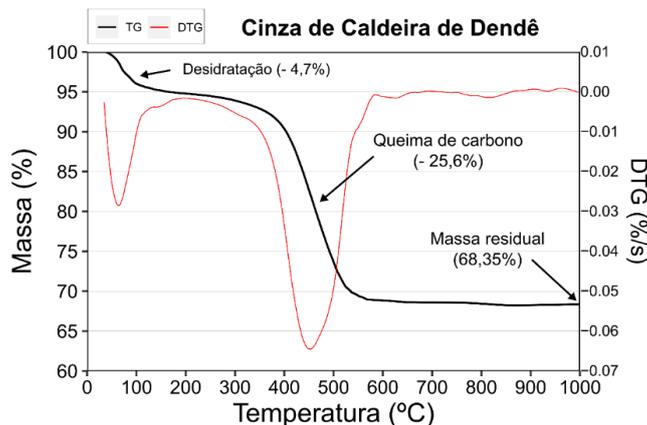
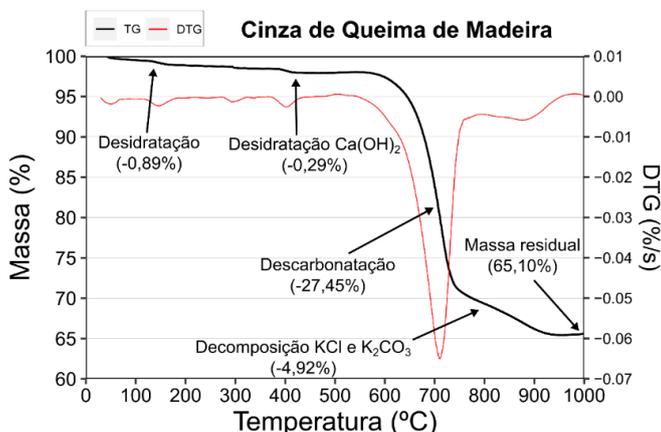


Figura 12 - Termogravimetria da CQM



A quarta faixa está relacionada principalmente à decomposição dos compostos de potássio, ocorrendo a partir de 760 °C até próximo dos 900 °C. Há registros de que a decomposição da silvita ocorra entre 700 °C e 800 °C, faixa também associada a uma mudança de coloração das cinzas, que passam a adquirir tons mais escuros, devido à provável liberação de componentes voláteis (THY *et al.*, 2006).

Misra, Ragland e Baker (1993) relataram que a decomposição do carbonato de potássio pode continuar além dos 900 °C, sendo também observado por Thy *et al.* (2006) decréscimo nos níveis de K₂O nessa faixa em cinzas semelhantes.

Apesar de ser considerada elevada, a PF obtida está dentro da faixa usualmente encontrada para cinzas de madeira e similares que não passaram por processo térmico de beneficiamento, valores estes que ficam entre 18% e 40% (ABDULKAREEM; RAMLI; MATTHEWS, 2019; HASSAN *et al.*, 2019), sendo totalmente possível se obterem características desejáveis da álcali-ativação de precursores com mais de 20% de PF, desde que se verifiquem as faixas ótimas de outras variáveis, como teor de álcalis e razões molares (SOUTSOS *et al.*, 2016).

O comportamento térmico do metacaulim é exposto na Figura 13. Sendo produto da desidroxilação de argilas caulínicas em altas temperaturas (entre 600 °C e 750 °C), é esperado que o metacaulim tenha baixa perda ao fogo, próximo a 3% (BUSARI; AKINMUSURU; DAHUNSI, 2019). Foi encontrado valor de 2,07%, dentro do esperado. Tal variação se deve principalmente à perda de água da amostra (desidratação), com pequena parcela de desidroxilação da caulinita remanescente do processo de fabricação.

Agregado miúdo

A curva da granulométrica da areia é apresentada na Figura 14, sendo sua dimensão máxima característica igual a 1,18 mm, massa específica de 2,61 g/cm³, massa unitária de 1,56 g/cm³, módulo de finura de 1,64 e teor de material pulverulento igual a 1,97%.

Figura 13 - Termogravimetria do metacaulim

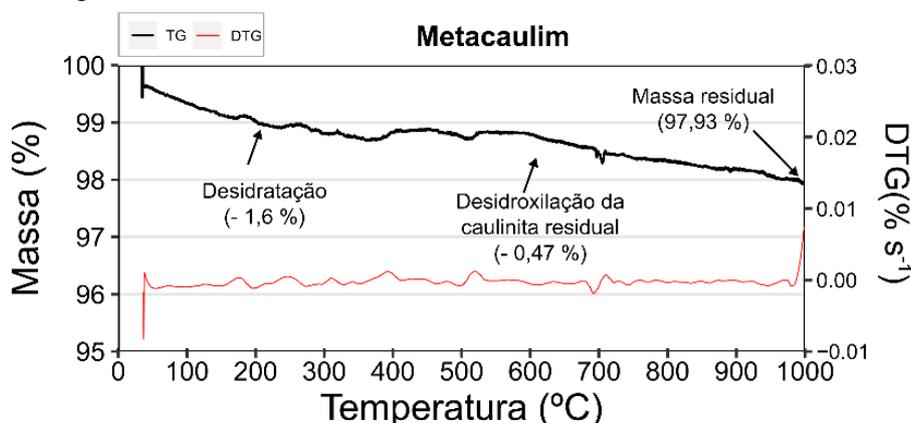
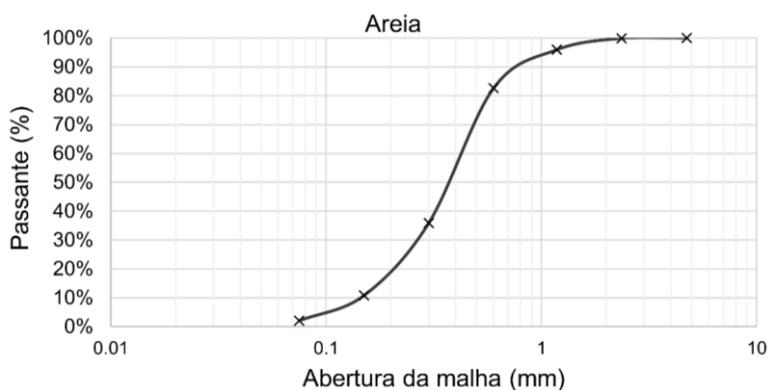


Figura 14 - Granulometria da areia



Aglomerantes

Resistência à tração na flexão

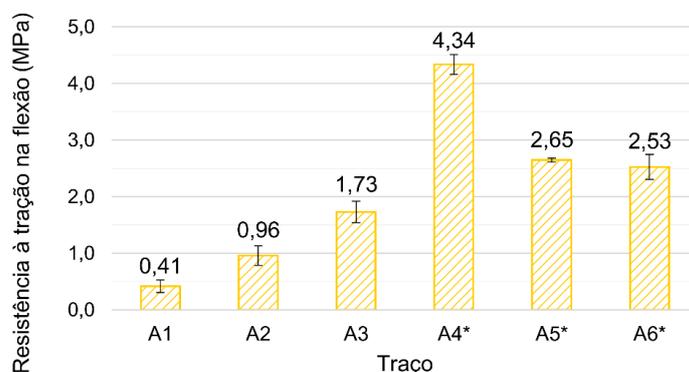
A Figura 15 apresenta a resistência à tração na flexão dos aglomerantes desenvolvidos. Os aglomerantes A1, A2 e A3 possuem idade de 7 dias, enquanto os aglomerantes A4, A5 e A6 foram ensaiados com 2 dias. A análise de variância (Tabela 5) confirmou que as variações de traço influenciaram significativamente a resistência à tração.

Como exposto na Tabela 1, a principal diferença entre os grupos A1, A2 e A3 é a razão molar CaO/SiO_2 , sendo registrada redução da quantidade de água extra na mistura, em virtude do menor teor de umidade da CQM em relação à CCD. No entanto, a variação é muito pequena, com diferença máxima de 5% em relação à massa de precursor entre os grupos A1 e A3. Comportamento semelhante foi observado entre os aglomerantes A4 e A5, cuja principal variação foi a razão CaO/SiO_2 , de 0,30 para 1,20. O maior teor de cálcio dessas misturas favorece a formação de C-S-H e de C-A-S-H como produtos de reação. Tais compostos precipitam nos microporos das matrizes, promovendo maior densificação, o que reflete a maior resistência mecânica dos aglomerantes (ABDULKAREEM; RAMLI; MATTHEWS, 2019; CHEAH *et al.*, 2017).

Também é observado que os aglomerantes A4, A5 e A6 apresentaram as maiores resistências, e de forma mais rápida (com 2 dias de cura), devido ao maior teor de alumínio disponível, representado pelas menores razões de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Há concordância entre estudos com cinzas semelhantes de que a maior disponibilidade de alumina na mistura produz compostos mais resistentes (MIJARSH; JOHARI; AHMAD, 2015). Em sistemas baseados em CCD, por exemplo, valores de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ inferiores a 10 têm sido observados em combinações com maior resistência (ISLAM *et al.*, 2014; MIJARSH; JOHARI; AHMAD, 2015; RANJBAR *et al.*, 2014b).

A Figura 16 apresenta a evolução da resistência à tração na flexão para os aglomerantes A4, A5 e A6 com 2 e 14 dias. A análise de variância entre os grupos apresentou valor-p menor que 5% em ambas as idades (Tabela 6), confirmando que o tipo de aglomerante influenciou significativamente a propriedade. Analisando a variação de idade de cada grupo (Tabela 7), foram obtidos valores-p maiores que 5% para A3 e A4. Desse modo, não se pode afirmar que houve variação entre as resistências, indicando que o ganho de resistência mecânica desses aglomerantes ocorreu de forma acelerada. Diferentemente, o aglomerante A6 apresentou valor-p inferior a 5%, indicando variação significativa ao longo do tempo.

Figura 15 - Resistência à tração na flexão



Nota: * Grupos A1, A2 e A3 com 7 dias. Grupos A4, A5 e A6 com 2 dias.

Tabela 5 - ANOVA: Resistência à tração dos aglomerantes

ANOVA						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	29,75769	5	5,95154	245,50785	7,86E-14	2,90129
Dentro dos grupos	0,36362	15	0,02424			
Total	30,12132	20				

Nota: fator de variação: tipo de aglomerante.

Figura 16 - Evolução da resistência à tração na flexão

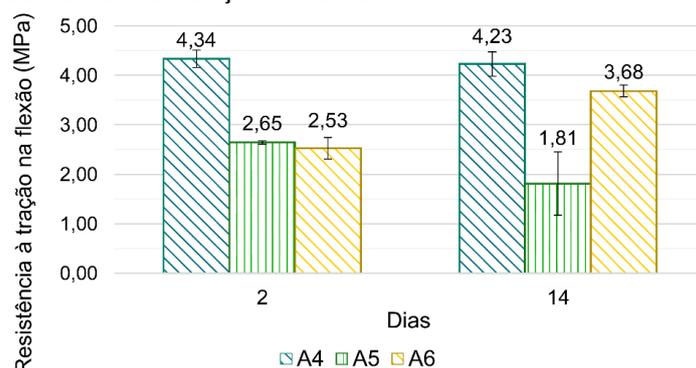


Tabela 6 - ANOVA: Evolução da resistência à tração na flexão por idade

ANOVA – Idade: 2 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	4,09773	2	2,04887	76,30788	0,00268	9,55209
Dentro dos grupos	0,08055	3	0,02685			
Total	4,17828	5				
ANOVA – Idade: 14 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	7,35339	2	3,67670	32,96503	0,00132	5,78614
Dentro dos grupos	0,55767	5	0,11153			
Total	7,91106	7				

Nota: fator de variação: tipo de aglomerante.

Tabela 7 - ANOVA: Evolução da resistência à tração na flexão por grupo

ANOVA – Aglomerante A4						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,01311	1	0,01311	0,25932	0,64568	10,12796
Dentro dos grupos	0,15169	3	0,05056			
Total	0,16481	4				
ANOVA – Aglomerante A5						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,69436	1	0,69436	3,38315	0,20724	18,51282
Dentro dos grupos	0,41048	2	0,20524			
Total	1,10484	3				
ANOVA – Aglomerante A6						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	1,61298	1	1,61298	63,63414	0,00411	10,12796
Dentro dos grupos	0,07604	3	0,02535			
Total	1,68902	4				

Nota: fator de variação: idade.

O ganho de resistência nas primeiras idades é influenciado pelas elevadas taxas de dissolução dos aluminossilicatos e condensação das fases gel causada pela elevada alcalinidade da mistura (refletida no indicador M+), juntamente com maior disponibilidade de aluminatos (CHEAH *et al.*, 2017; SOUTSOS *et al.*, 2016).

O comportamento do aglomerante A6 pode estar associado à menor disponibilidade inicial de álcalis na mistura em função da razão L/S reduzida, o que retardou o processo de dissolução dos aluminossilicatos e, consequentemente, o desenvolvimento de resistência (RANJBAR *et al.*, 2014b).

Resistência à compressão

A Figura 17 apresenta o valor médio das resistências à compressão axial encontradas para os aglomerantes aos 7 dias. De forma análoga à resistência à tração, foi encontrado valor-p menor que 5% (Tabela 8), confirmando que as variações entre os traços afetaram significativamente o desempenho mecânico.

Assim como na resistência à tração, houve crescimento da resistência com o aumento da razão molar CaO/SiO_2 , evidente pela variação entre A1, A2 e A3. Observa-se também a forte influência da razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, visto que os aglomerantes A4, A5 e A6 apresentam mais alumina na composição, sendo esta a principal diferença entre os aglomerantes A4 e A5.

Tal efeito se deve ao papel fundamental da disponibilidade de alumínio nas reações de condensação. Maiores concentrações de espécies de aluminatos possibilitam maiores taxas de condensação envolvendo aluminatos e silicatos do que aquelas que ocorrem apenas entre silicatos (RANJBAR *et al.*, 2014b). Em sistemas com significativo teor de cálcio, o papel dos aluminatos é ainda mais importante, visto que é a presença dos íons de alumínio que promove a conexão entre cadeias de C-S-H e a substituição de silicatos em seu arranjo estrutural, formando C-A-S-H (SALIH *et al.*, 2015a).

As relativamente baixas resistências encontradas podem ser fruto de dois efeitos: primeiro, o alto teor de K_2O nos materiais precursores. Em certas quantidades, a presença de tal composto é interessante por produzir hidróxido de potássio quando em solução, contribuindo para a alcalinidade da reação e para o processo de dissolução nos momentos iniciais, além de disponibilizar íons K^+ durante etapas posteriores, favorecendo o balanço de carga durante a polimerização (ABDULKAREEM; RAMLI; MATTHEWS, 2019). Contudo, Yuan *et al.* (2016) observaram expressiva redução de quase 93% da resistência mecânica em aglomerantes baseados em metacaulim com a variação da razão molar $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ de 2 para 1,2, devido à precipitação precoce de aluminossilicatos, que podem acabar prejudicando o contato entre as partículas de precursor e solução ativadora, bem como a difusão iônica e o rearranjo da microestrutura. Comparativamente, os aglomerantes desenvolvidos apresentaram razão $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ entre 0,24 e 0,38. Nesse entendimento, estas seriam demasiadamente baixas.

Figura 17 - Resistência à compressão axial aos 7 dias

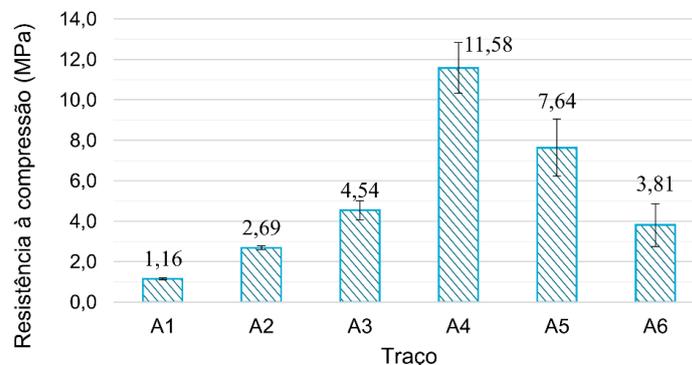


Tabela 8 - ANOVA: Resistência à compressão dos aglomerantes

ANOVA						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	214,30235	5	42,86047	87,72155	1,57E-11	2,81000
Dentro dos grupos	8,30615	17	0,48860			
Total	222,60850	22				

Nota: fator de variação: tipo de aglomerante.

O segundo, e provavelmente mais influente, efeito está relacionado ao elevado teor de matéria orgânica dos precursores. Com base nas proporções de dosagem, tem-se que aproximadamente 37,2% da massa final dos aglomerantes é composta de matéria orgânica não queimada. Tal parcela, evidenciada pela coloração escura das amostras, não contribui com os mecanismos de álcali-ativação, podendo, inclusive, prejudicar a coesão entre os grãos do material e, conseqüentemente, a resistência mecânica final (ŠKVARLA *et al.*, 2011). Resultados semelhantes da influência do teor de matéria orgânica foram relatados por Andini *et al.* (2008). Alguns estudos consideram 15% de matéria orgânica não queimada um teor potencialmente significativo para geração de impactos em propriedades como resistência mecânica e porosidade (SISOL; DRABOVÁ; MOSEJ, 2014; MEJÍA *et al.*, 2015).

A Figura 18 apresenta a evolução da resistência média à compressão axial, sendo registrada a mesma tendência exposta pela resistência à tração. A análise de variância confirmou a diferença significativa entre grupos, o comportamento de rápido ganho de resistência dos grupos A4 e A5 e o desenvolvimento progressivo para A6, conforme dados das Tabelas 9 e 10.

Observa-se que a menor razão L/S do aglomerante A6 foi preponderante no desenvolvimento da resistência à compressão quando comparado ao A3 nas primeiras idades, porém o maior teor de alumina se mostrou mais influente com o tempo, produzindo resistências progressivamente superiores, ainda mais notáveis aos 14 dias.

Figura 18 - Evolução da resistência à compressão axial

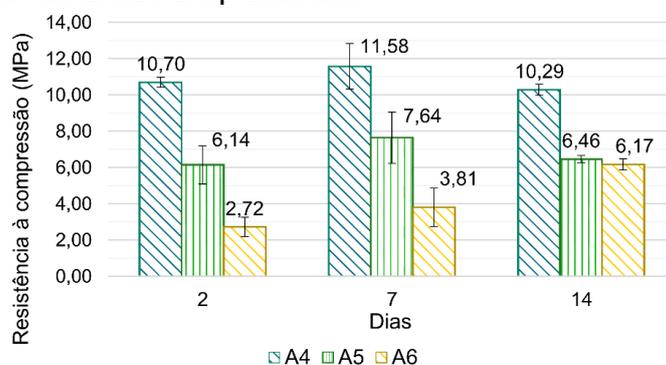


Tabela 9 - ANOVA: Evolução da resistência à compressão por idade

ANOVA – Idade: 2 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	96,05359	2	48,02679	98,45045	2,59E-05	5,14325
Dentro dos grupos	2,92696	6	0,48783			
Total	98,98055	8				
ANOVA – Idade: 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	73,42489	2	36,71244	23,52578	0,00286	5,78614
Dentro dos grupos	7,80260	5	1,56052			
Total	81,22749	7				
ANOVA – Idade: 14 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	31,83852	2	15,91926	228,45542	4,22E-07	4,73741
Dentro dos grupos	0,48777	7	0,06968			
Total	32,32629	9				

Nota: fator de variação: tipo de aglomerante.

Tabela 10 - ANOVA: Evolução da resistência à compressão por grupo

ANOVA – Aglomerante A4						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	2,02707	2	1,01353	2,64212	0,16481	5,78614
Dentro dos grupos	1,91803	5	0,38361			
Total	3,94510	7				
ANOVA – Aglomerante A5						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	3,59055	2	1,79528	1,99035	0,20684	4,73741
Dentro dos grupos	6,31394	7	0,90199			
Total	9,90449	9				
ANOVA – Aglomerante A6						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	18,69055	2	9,34528	18,78218	0,00261	5,14325
Dentro dos grupos	2,98537	6	0,49756			
Total	21,67592	8				

Nota: fator de variação: idade.

Resistência em função das razões molares

A Figura 19 mostra os resultados de resistência mecânica de cada grupo de aglomerante em função das razões molares CaO/SiO_2 , $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Na}_2\text{O/SiO}_2$. Observando os resultados dos aglomerantes A3 e A4, que possuem razão CaO/SiO_2 próximo de 1,20 e $\text{Na}_2\text{O/SiO}_2$ próximo de 0,40, fica evidente que a maior disponibilidade de alumínio na mistura (evidenciada pelas menores razões $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) conduziu a maiores resistências mecânicas, como já discutido. Tal observação é reforçada pelo comportamento aos 14 dias do aglomerante A6, que também possui razão CaO/SiO_2 próximo a 1,20 e maior teor de alumínio em comparação ao A3.

Comportamento semelhante é visto entre os aglomerantes A1 e A5, que possuem a mesma razão molar CaO/SiO_2 e razão $\text{Na}_2\text{O/SiO}_2$ próxima.

O ganho significativo de resistência à compressão do aglomerante A6 dos 7 aos 14 dias expõe uma observação interessante sobre o efeito da razão molar $\text{Na}_2\text{O/SiO}_2$. Esse grupo apresentou resistência à compressão inferior àquela do grupo A3 aos 7 dias, ainda que possuísse razão CaO/SiO_2 próxima e maior teor de alumínio. A principal diferença entre ambos residiu na reduzida razão $\text{Na}_2\text{O/SiO}_2$ do grupo A6, resultante da menor quantidade de solução ativadora empregada para sua ativação (denotada pela razão L/S). Dessa forma, é possível que o aglomerante A6 tenha disposto de menor taxa de dissolução dos materiais precursores durante os primeiros 7 dias de cura pela quantidade inferior de solução ativadora, o que retardou seu desenvolvimento de resistência no curto prazo, efeito compensado pelo maior tempo de cura.

Destaca-se ainda a influência da razão CaO/SiO_2 nas misturas, sendo identificado comportamento semelhante, rumo à maior resistência com o acréscimo da razão molar, entre os aglomerantes A1, A2 e A3, e entre os grupos A4 e A5, que possuem razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ próxima entre si.

Tais observações se aproximam do relatado por Huseien *et al.* (2016) e Islam *et al.* (2014), em que os aglomerantes com razão CaO/SiO_2 próximo a 1 apresentaram maiores resistências mecânicas quando suas razões $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ se aproximavam de 4.

Argamassas

Resistência mecânica

A Figura 20 apresenta a resistência à tração na flexão, sendo obtido valor-p menor que 5% quanto à variação entre grupos (Tabela 11). Como esperado, não houve variação significativa entre as idades (Tabela 12). É notável que o acréscimo de agregado promoveu redução da resistência, sendo a adição de água mais prejudicial do que a solução de hidróxido de sódio.

A argamassa AR25 satisfaz os requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005c) para uso como argamassa de assentamento e revestimento, com resistência à tração na flexão superior a 3,5 MPa.

Figura 19 - Resistência mecânica em função das razões molares

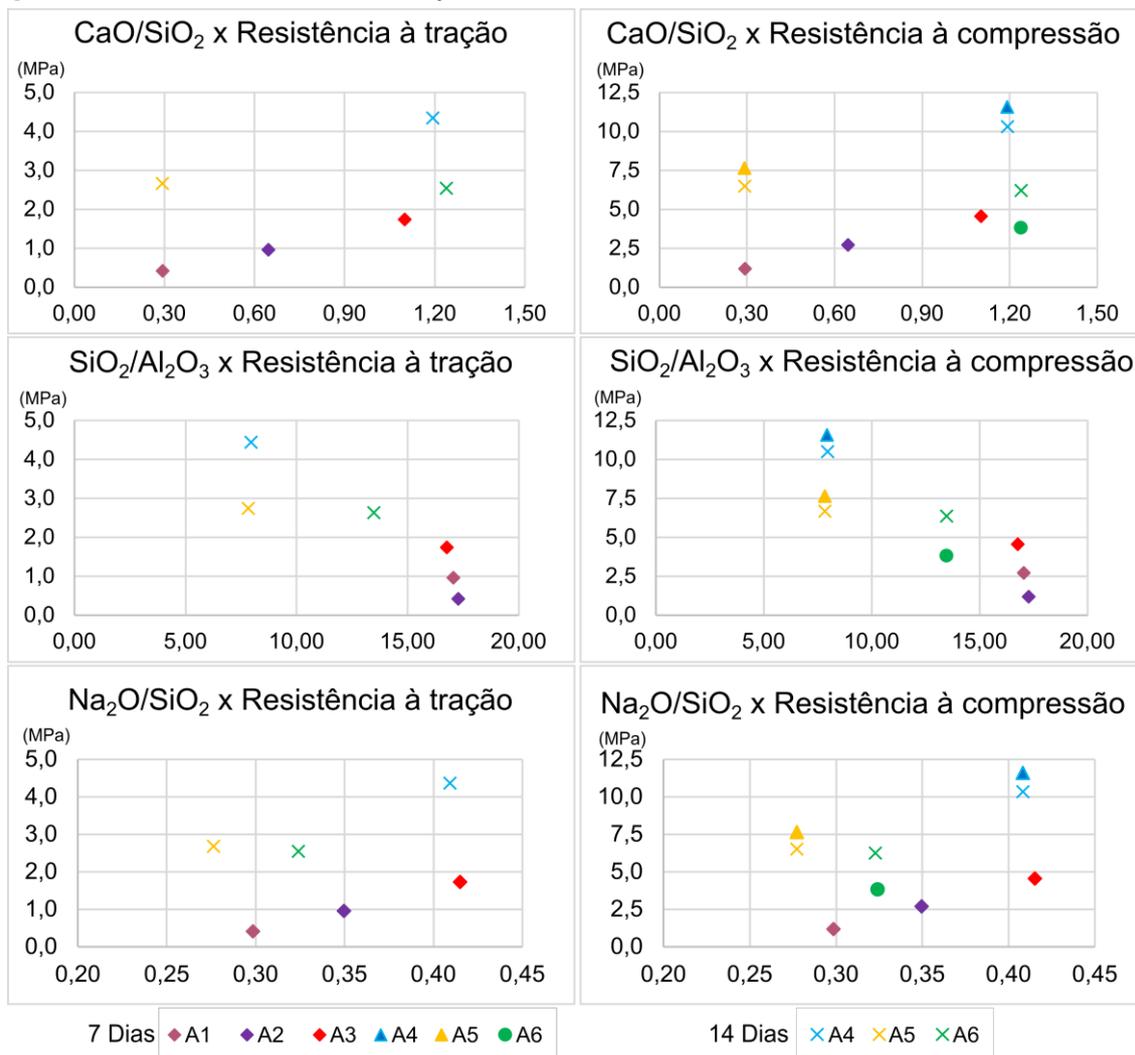


Figura 20 - Resistência à tração na flexão das argamassas

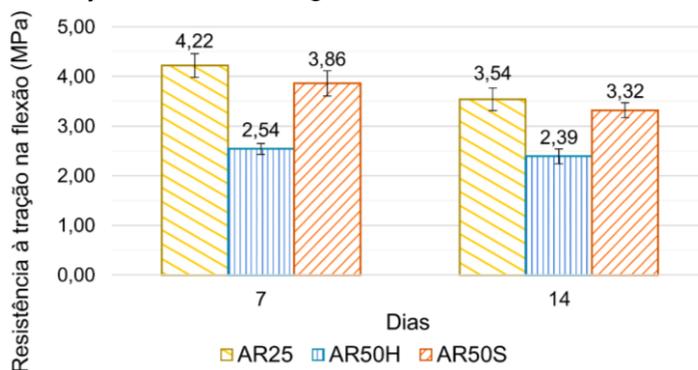


Tabela 11 - ANOVA: Resistência à tração na flexão das argamassas por idade

ANOVA – Idade: 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	5,43859	2	2,71930	55,88078	1,99E-05	4,45897
Dentro dos grupos	0,38930	8	0,04866			
Total	5,82789	10				
ANOVA – Idade: 14 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	2,36814	2	1,18407	31,78507	6,41E-04	5,14325
Dentro dos grupos	0,22351	6	0,03725			
Total	2,59165	8				

Nota: fator de variação: tipo de argamassa.

Tabela 12 - ANOVA: Resistência à tração na flexão das argamassas por grupo

ANOVA – Argamassa AR25						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	1,01496	1	1,01496	18,09023	3,78E-03	5,59145
Dentro dos grupos	0,39274	7	0,05611			
Total	1,40770	8				
ANOVA – Argamassa AR50H						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,03202	1	0,03202	1,86104	2,44E-01	7,70865
Dentro dos grupos	0,06881	4	0,01720			
Total	0,10083	5				
ANOVA – Argamassa AR50S						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,35766	1	0,35766	7,09338	7,61E-02	10,12796
Dentro dos grupos	0,15126	3	0,05042			
Total	0,50892	4				

Nota: fator de variação: idade.

A Figura 21 apresenta as resistências à compressão das argamassas. É notável a variação entre os grupos, confirmada sua expressividade estatística pela análise de variância (Tabela 13). Também se pode observar que o traço AR25 desenvolveu o máximo de resistência já aos 7 dias, com valor-p de 0,5304 na análise por idade (Tabela 14). Os grupos AR50H e AR50S apresentaram valores-p muito menores que 5% na mesma análise, indicando perda de resistência ao longo do tempo. No caso do grupo AR50H, a diferença é relativamente pequena e pode estar associada à variabilidade dos materiais e ao processo de moldagem. Por outro lado, a variação no grupo AR50S é expressiva e supostamente relacionada a problemas de adensamento devido à rápida secagem, que já apresentava sinais de ganho de resistência ainda no misturador, sendo possível que a formação da microestrutura dos corpos de prova tenha sido comprometida.

Como a resistência do grupo AR25 foi estatisticamente igual à do aglomerante A4, pode-se afirmar que o uso de 25% de agregado não prejudica as propriedades mecânicas do aglomerante. Contudo, o uso de 50% de agregado está associado à redução da resistência devido à necessidade de água extra na mistura, produzindo argamassas mais porosas e diluindo o aglomerante (HUSEIEN *et al.*, 2016).

A argamassa AR25 satisfaz os requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005c) quanto à resistência à compressão para uso como argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos. Similarmente, também foram satisfeitos os requisitos de desempenho mecânico da NBR 15270 (ABNT, 2017) para uso como tijolos de vedação e estrutural.

Absorção por imersão

As amostras da argamassa AR50S apresentaram estrutura interna altamente porosa e friável, fragmentando-se sob o peso próprio durante as etapas do ensaio de absorção, não sendo obtida uma amostra representativa. Tal comportamento é derivado, provavelmente, da secagem acelerada dessa mistura, que pode ter afetado a

aderência entre as camadas das amostras, levando à desagregação do corpo de prova após saturação. Com base na Figura 22, tem-se que o aumento do volume de agregado não alterou a taxa de absorção por imersão das argamassas.

A Figura 23 mostra que o índice de vazios da argamassa AR50H foi ligeiramente superior ao do grupo AR25. Dada a taxa de absorção similar entre as misturas, pode-se inferir que o maior índice de vazios está associado ao uso de água extra, que pode ter facilitado a formação de mais poros na microestrutura. Tal observação encontra apoio na variação da resistência à compressão entre os traços, uma vez que estruturas mais porosas tendem a apresentar menor resistência mecânica.

Figura 21 - Resistência à compressão axial das argamassas

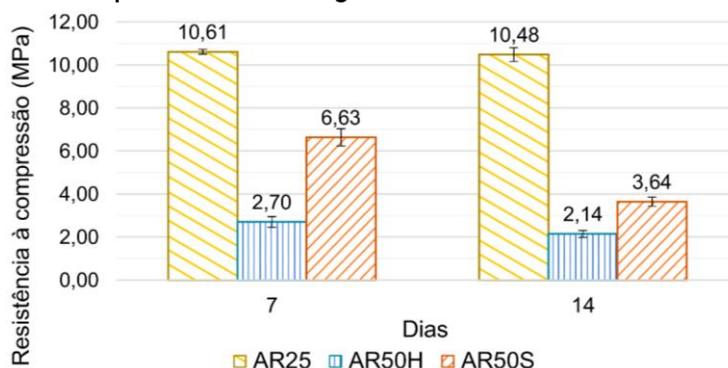


Tabela 13 - ANOVA: Resistência à compressão das argamassas por idade

ANOVA – Idade: 7 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	129,05576	2	64,52788	902,74246	4,26E-11	4,25649
Dentro dos grupos	0,64332	9	0,07148			
Total	129,69908	11				
ANOVA – Idade: 14 dias						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	149,70151	2	74,85076	1696,42561	1,91E-16	3,80557
Dentro dos grupos	0,57359	13	0,04412			
Total	150,27511	15				

Nota: fator de variação: tipo de argamassa.

Tabela 14 - ANOVA: Resistência à compressão das argamassas por grupo

ANOVA – Argamassa AR25						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,02708	1	0,02708	0,47051	0,530	7,70865
Dentro dos grupos	0,23026	4	0,05757			
Total	0,25735	5				
ANOVA – Argamassa AR50H						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,99345	1	0,99345	23,84335	4,85E-04	4,84434
Dentro dos grupos	0,45832	11	0,04167			
Total	1,45177	12				
ANOVA – Argamassa AR50S						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	17,88518	1	17,88518	236,96633	1,18E-06	5,59145
Dentro dos grupos	0,52833	7	0,07548			
Total	18,41351	8				

Nota: fator de variação: idade.

Figura 22 - Taxa de absorção por imersão

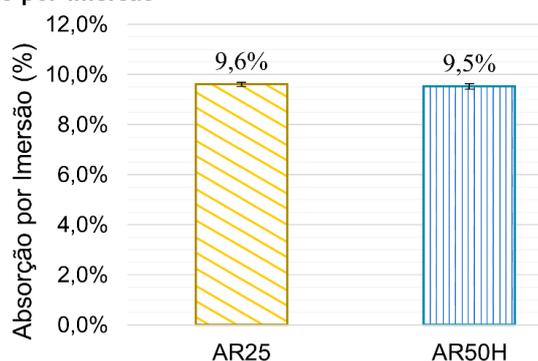
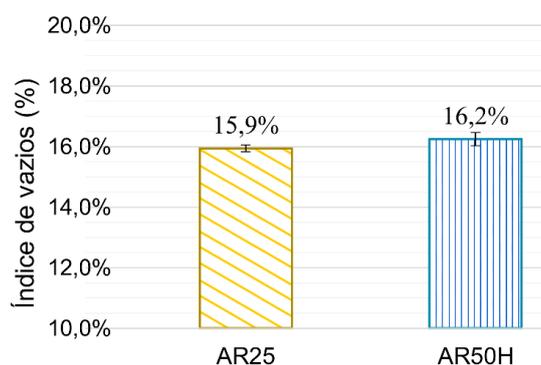


Figura 23 - Índice de vazios



A Figura 24 apresenta a massa específica seca média das argamassas. O traço AR50H apresentou massa 3% superior à do traço AR25, provavelmente devido à maior quantidade de areia na mistura. Os resultados estão dentro da faixa preconizada pela NBR 13281 (ABNT, 2005c) para a classe M5, que é de 1,60 g/cm³ a 2,00 g/cm³.

Eflorescência acelerada

Conforme exposto pela Figura 25, o grupo com maior ocorrência de eflorescência foi o AR25. Isso se deve a seu maior teor de aglomerante por volume, logo mais álcalis estão disponíveis para migrarem pela matriz e serem depositados na superfície quando ocorre a evaporação da água, sendo este o principal fator para ocorrência do fenômeno (ZHANG *et al.*, 2014). Dessa forma, pode-se afirmar que o aumento no teor de agregado promoveu redução na formação de eflorescência das argamassas, uma vez que a porosidade entre os grupos AR25 e AR50H foi semelhante.

A baixa ocorrência de eflorescência apresentada pelo grupo AR50S trabalha a favor da hipótese de problemas na estrutura devido ao endurecimento acelerado. Por ser o traço com maior quantidade de álcalis (M+ = 14,9%), era esperado que apresentasse a maior taxa de eflorescência durante o ensaio (SALIH *et al.*, 2013). O resultado adverso sugere a existência de prejuízos para a migração dos álcalis pela estrutura, que podem ser associados a problemas na formação da microestrutura, refletidos na desagregação durante ensaio de absorção e nas variações de resistência mecânica.

Ainda que 40% da área total seja uma região significativa a ser afetada pela eflorescência, observa-se que a ocorrência do fenômeno nas argamassas foi leve, havendo apenas a mudança de cor em certas regiões dos corpos de prova, devido à formação de pequenos cristais esbranquiçados, como pode ser visto no comparativo entre as superfícies expostas do traço AR25 antes e após ensaio (Figura 26). Usualmente, em argamassas alcali-ativadas, são observados resultados mais agressivos, com formação de camadas proeminentes de cristais que se projetam a partir das superfícies expostas e podem alcançar centímetros de espessura em poucas horas (DIAS; DE ANDRADE SILVA, 2019; ZHANG *et al.*, 2018). Desse modo, conclui-se que as argamassas desenvolvidas apresentaram boa resistência ao surgimento de eflorescência.

Figura 24 - Massa específica seca

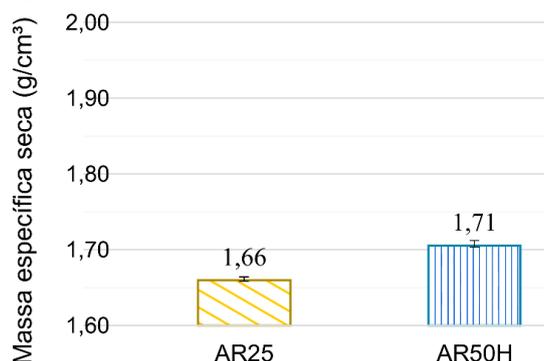


Figura 25 - Média das áreas afetadas pela eflorescência

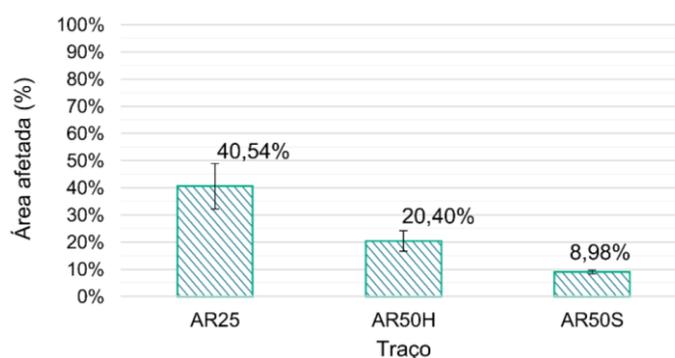
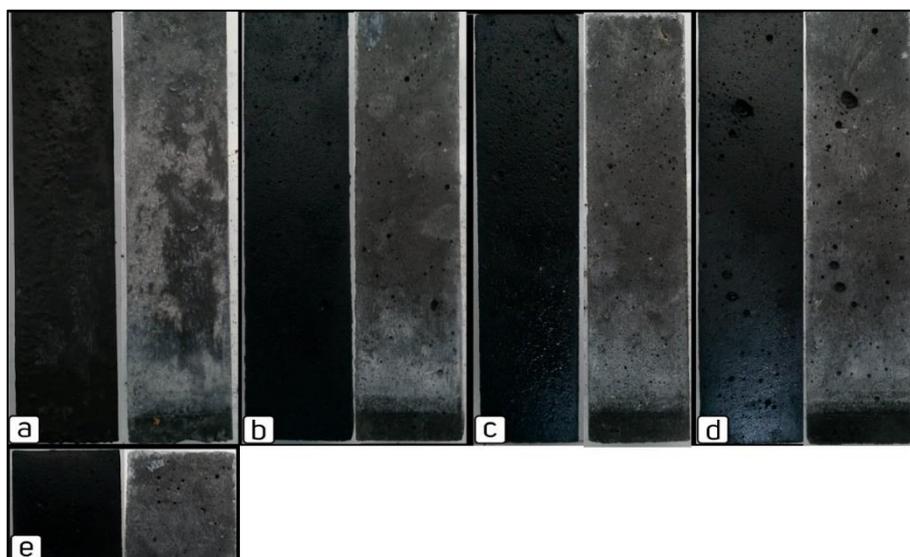


Figura 26 - Comparativo - traço AR25



Nota: (a) Face frontal; (b) face lateral direita; (c) face posterior; (d) face lateral esquerda; e (e) face superior.

Conclusão

Os resultados confirmaram o potencial de uso da mistura de cinza de caldeira de dendê e de cinza de queima de madeira, beneficiadas apenas com moagem e peneiramento, como principal fonte de aluminossilicatos para a produção de compostos álcali-ativados. Tal ocorrência sugere uma destinação potencialmente benéfica tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico para tais resíduos, sendo também evidenciados critérios

importantes a serem considerados durante a formulação de tais materiais. Entre as principais observações, destaca-se que:

- (a) o uso de 25% de agregado em volume produziu argamassas com boa trabalhabilidade e baixa taxa de absorção de água, apresentando massa específica e resistência mecânica adequadas para uso como argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos conforme critérios da NBR 13281 (ABNT, 2005c);
- (b) o uso de 50% de agregado produziu misturas demasiadamente secas, e o emprego de água extra para torná-las trabalháveis prejudicou suas propriedades mecânicas;
- (c) as argamassas desenvolvidas apresentaram pouco desenvolvimento de efluorescência, sendo registrados manchamentos brancos nas superfícies dos corpos de prova, sem a formação de depósitos cristalinos de espessura considerável;
- (d) a elevada presença de matéria não queimada das cinzas afetou o desenvolvimento de resistência dos aglomerantes, sendo evidenciada na coloração escura das amostras;
- (e) foram encontradas maiores resistências mecânicas para a razão molar CaO/SiO_2 próximo de 1,2 e $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ próximo de 8, tendo os traços com maior disponibilidade de alumina ganhado resistência rapidamente, estando aptos para desforma em apenas 2 h;
- (f) as misturas com metacaulim apresentaram rápido ganho de resistência aos 2 dias, sem variações significativas até os 14 dias; e
- (g) o uso de solução de hidróxido de sódio como fonte de água extra de mistura acelerou demasiadamente o ganho de resistência, o que prejudicou a moldagem das argamassas.

Referências

- ABDULKAREEM, O. A.; RAMLI, M.; MATTHEWS, J. C. Production of geopolymer mortar system containing high calcium biomass wood ash as a partial substitution to fly ash: an early age evaluation. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 106941, May 2019.
- ABOSHIA, A. M. A. *et al.* Early age shrinkage cracking of restrained metakaolin-slag-palm oil fuel ash binder geopolymer mortars. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 7, n. 5, p. 271-295, 2018.
- AL-MULALI, M. Z. *et al.* The incorporation of oil palm ash in concrete as a means of recycling: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 129-138, 2015.
- ALTOMARE, A. *et al.* QUALX2.0: a qualitative phase analysis software using the freely available database POW_COD. **Journal of Applied Crystallography**, v. 48, p. 598-603, 2015.
- ANDINI, S. *et al.* Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. **Waste Management**, v. 28, n. 2, p. 416-423, 2008.
- APRIANTI, E. *et al.* Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes: a review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176-187, 2015.
- ARIFFIN, M. A.; HUSSIN M. W.; BHUTTA, M. A. Mix design and compressive strength of geopolymer concrete containing blended ash from agro-industrial wastes. **Advanced Materials Research**, v. 339, p. 452-457, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão: índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75: procedimento. Rio de Janeiro, 2003a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- BEM, D. H. de; MEDEIROS, R. A. Uma revisão da literatura sobre ensaios acelerados para avaliação da formação de eflorescências em argamassas. **Revista Técnico-Científica**, ed. especial, set. 2019.
- BEZERRA, A. C. S. *et al.* Alkaline activation of high-calcium ash and iron ore tailings and their recycling potential in building materials. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 99-112, jul./set. 2019.
- BUSARI, A.; AKINMUSURU, J.; DAHUNSI, B. Strength and durability properties of concrete using metakaolin as a sustainable material: review of literatures. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 10, n. 1, p. 1893-1902, 2019.
- CAPASSO, I. *et al.* Reuse of mining waste as aggregates in fly ash-based geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 65-73, 2019.
- CASTRO, P. B. **Avaliação do comportamento mecânico e da durabilidade de argamassas alcali-ativadas para uso como material de reparo**. Salvador, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.
- CHEAH, C. B. *et al.* The use of high calcium wood ash in the preparation of ground granulated blast furnace slag and pulverized fly ash geopolymers: a complete microstructural and mechanical characterization. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 114-123, 2017.
- COELHO, V. A. *et al.* Dosagem de aglomerantes alcali-ativados com resíduos industriais por meio de sistemas lineares com implementação em planilha. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 4., Salvador, 2022. **Anais [...]** Feira de Santana, 2022.
- COELHO, V. A. *et al.* Evaluation of mortar properties obtained through partial substitution of Portland cement by ashes of oil palm empty fruit bunch. **Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 359-365, 2019.
- CRIADO, M. **The corrosion behaviour of reinforced steel embedded in alkali-activated mortar**. Madrid: Woodhead, 2015.
- DEMBOVSKA, L. *et al.* The use of different by-products in the production of lightweight alkali activated building materials. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 315-322, 2017.
- DIAS, D. P.; DE ANDRADE SILVA, F. Effect of Na₂ O/SiO₂ and K₂ O/SiO₂ mass ratios on the compressive strength of non-silicate metakaolin geopolymeric mortars. **Materials Research Express**, v. 6, n. 7, p. 075514, 2019.
- ELBASIR, O. M. M.; MEGAT JOHARI, M. A.; AHMAD, Z. A. Effect of fineness of palm oil fuel ash on compressive strength and microstructure of alkaline activated mortar. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 23, n. 2, p. 136-152, 2019.
- FERNANDES, B. *et al.* Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 838-863, 2017.
- GAGG, C. R. Cement and concrete as an engineering material: an historic appraisal and case study analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 40, p. 114-140, 2014.
- GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. **An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders**. Madrid: Woodhead, 2014.

- GERALDO, R. H. *et al.* Study of alkali-activated mortar used as conventional repair in reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 914-919, 2018.
- HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, 2001.
- HASSAN, H. S. *et al.* Cleaner production of one-part white geopolymer cement using pre-treated wood biomass ash and diatomite. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 1420-1428, 2019.
- HUSEIEN, G. F. *et al.* Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1229-1240, 2016.
- HUSSIN, M. W. *et al.* Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 3, p. 709-720, 2015.
- IDRIS, S. S.; RAHMAN, N. A.; ISMAIL, K. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). **Bioresource Technology**, v. 123, n. 2012, p. 581-591, 2012.
- ISLAM, A. *et al.* The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. **Materials and Design**, v. 56, p. 833-841, 2014.
- KABIR, S. M. A. *et al.* Performance evaluation and some durability characteristics of environmental friendly palm oil clinker based geopolymer concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 477-492, 2017.
- KHANKHAJE, E. *et al.* On blended cement and geopolymer concretes containing palm oil fuel ash. **Materials and Design**, v. 89, p. 385-398, 2016.
- MATOS, S. R. C. **Desenvolvimento de argamassa álcali-ativada para utilização em sistemas de reparo com incorporação de cinza agroindustrial**. Salvador, 2018. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.
- MEJÍA, J. M. *et al.* Preparation and characterization of a hybrid alkaline binder based on a fly ash with no commercial value. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 346-352, 2015.
- MIJARSH, M. J. A.; JOHARI, M. A. M.; AHMAD, Z. A. Compressive strength of treated palm oil fuel ash based geopolymer mortar containing calcium hydroxide, aluminum hydroxide and silica fume as mineral additives. **Cement and Concrete Composites**, v. 60, p. 65-81, 2015.
- MILOVANOVIĆ, B. *et al.* Wood biomass ash as a raw material in concrete industry. **Gradjevinar**, v. 71, n. 6, p. 505-514, 2019.
- MISRA, M. K.; RAGLAND, K. W.; BAKER, A. J. Wood ash composition as a function of furnace temperature. **Biomass and Bioenergy**, v. 4, n. 2, p. 103-116, 1993.
- PASSUELLO, A. *et al.* Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 680-689, 2017.
- PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, n. 1, p. 299-327, 2014.
- RANJBAR, N. *et al.* Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 114-121, 2014a.
- RANJBAR, N. *et al.* Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. **Materials and Design**, v. 59, p. 532-539, 2014b.
- SALIH, M. A. *et al.* Development of high strength alkali activated binder using palm oil fuel ash and GGBS at ambient temperature. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 289-300, 2015a.
- SALIH, M. A. *et al.* Effect of different curing temperatures on alkali activated palm oil fuel ash paste. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 116-125, 2015b.
- SALIH, M. A. *et al.* Properties of fresh palm oil fuel ash based geopolymer material. **Advances in Environmental Biology**, v. 7, n. 12, p. 3572-3579, 2013.

- SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, p. 671-675, 2012.
- SI, R.; GUO, S.; DAI, Q. Influence of calcium content on the atomic structure and phase formation of alkali-activated cement binder. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 102, n. 3, p. 1479-1494, 2019.
- SISOL, M.; DRABOVÁ, M.; MOSEJ, J. Alkali activation of fresh and deposited black coal fly ash with high loss on ignition. **Gospodarka Surowcami Mineralnymi**, v. 30, n. 2, p. 103-115, June 2014.
- ŠKVARLA, J. *et al.* The potential use of fly ash with a high content of unburned carbon in geopolymers. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 8, n. 2, p. 123-132, 2011.
- SONG, D. *et al.* Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain. **Applied Energy**, v. 164, p. 916-923, 2016.
- SOUTSOS, M. *et al.* Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 355-368, 2016.
- SULTHAN, F. Literature review on geopolymer mortar using agricultural waste as precursor. **International Journal of Scientific & Technology Research**, v. 8, p. 232-236, 2019.
- TAY, J. H.; SHOW, K. Y. Use of ash derived from oil-palm waste incineration as a cement replacement material. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 13, n. 1, p. 27-36, 1995.
- THOMAS, B. S.; KUMAR, S.; AREL, H. S. Sustainable concrete containing palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 550-561, Apr. 2017.
- THY, P. *et al.* High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes. **Fuel**, v. 85, n. 5-6, p. 783-795, 2006.
- TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 125-130, 2013.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Oilseeds: world markets and trade**. Set. 2019.
- WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **WBA global bioenergy statistics 2018**. Disponível em: <https://worldbioenergy.org/global-bioenergy-statistics>. Acesso em: 9 out. 2019.
- YAHYA, Z. *et al.* Chemical and physical characterization of boiler ash from palm oil industry waste for geopolymer composite. **Chimie**, v. 12, p. 32-34, 2013.
- YANG, K. H.; SONG, J. K.; SONG, K. I. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 265-272, 2013.
- YUAN, J. *et al.* Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers. **Ceramics International**, v. 42, n. 14, p. 16184-16190, 2016.
- YUSUF, M. O. *et al.* Evolution of alkaline activated ground blast furnace slag-ultrafine palm oil fuel ash based concrete. **Materials and Design**, v. 55, p. 387-393, 2014.
- YUSUF, M. O. Performance of slag blended alkaline activated palm oil fuel ash mortar in sulfate environments. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 417-424, 2015.
- ZHANG, Z. *et al.* Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 92, p. 165-177, 2018.
- ZHANG, Z. *et al.* Fly ash-based geopolymers: the relationship between composition, pore structure and efflorescence. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 30-41, 2014.

Vinícius Almeida Coelho

Conceitualização, Análise e curadoria de dados, Pesquisa, Metodologia, Experimentos, Design e apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica | Universidade Federal da Bahia | Rua Prof. Aristides Novis, 2, Federação | Salvador - BA - Brasil | CEP 40210-630 | Tel.: (71) 3283-9702 | E-mail: mrvoelho@gmail.com

Raildo Alves Fiuza Junior

Conceitualização, Análise de dados, Metodologia, Experimentos, Redação - revisão e edição.

Departamento de Química Geral e Inorgânica, Instituto de Química | Universidade Federal da Bahia | Rua Barão de Jeremoabo, Campus Universitário de Ondina | Salvador - BA - Brasil | CEP 40170-115 | Tel.: (71) 3283-6820 | E-mail: raildofiuza@ufba.br

Francisco Gabriel Santos Silva

Conceitualização, Análise de dados, Metodologia, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Construção e Estruturas | Universidade Federal da Bahia | Rua Prof. Aristides Novis, 2, Federação | Salvador - BA - Brasil | CEP 40210-630 | Tel.: (71) 3283-9526 | E-mail: fgabriel.ufba@gmail.com

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.