



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS PEREIRA LIMA

**AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA À BASE DE CINZA
VOLANTE**

CRATEÚS

2020

LUCAS PEREIRA LIMA

AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA À BASE DE CINZA
VOLANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ms. Heloína Nogueira da Costa.

CRATEÚS

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L698a Lima, Lucas Pereira.
Avaliação de argamassa geopolimérica à base de cinza volante. / Lucas Pereira Lima. – 2020.
76 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2020.
Orientação: Prof. Me. Heloína Nogueira da Costa.
1. Argamassa geopolimérica. 2. Cinza volante. 3. Ativação alcalina. I. Título.

CDD 620

LUCAS PEREIRA LIMA

AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA À BASE DE CINZA VOLANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ma. Heloína Nogueira da Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais, Ferreira e Soraia.

Às minhas irmãs, Rosa e Iara.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me permitir concluir mais um ciclo da minha vida.

Aos meus familiares, meus pais Maria Soraia e Francisco Ferreira, por todo incentivo e por sempre me apoiar em todas as decisões tomadas, obrigado por nunca desistirem de mim. As minhas irmãs Rosa Nayara e Iara Lícia, pelas conversas, conselhos e incentivos durante todo esse tempo de irmandade, vocês são essenciais e indispensáveis na minha vida, conseqüentemente nessa trajetória.

A minha namorada, Brenda Luara, pelo qual temos mais de seis anos de convivência, cumplicidade e companheirismo, obrigado por ter me ajudado a entender a importância da responsabilidade com a graduação, sem você, todos os seus conselhos, apoio nas horas difíceis, seu afeto, creio que não estaria chegando onde estou hoje, você foi, você é e sempre será a peça chave e essencial que faltava na minha vida, obrigado por tudo. Te amo!

Gostaria de agradecer a minha orientadora, Heloína Nogueira da Costa, por ter me proporcionado por meio deste trabalho experiências vividas que servirão de aprendizado pro resto da vida, muito obrigado por toda a atenção, ensinamentos, paciência e disponibilidade para que este momento se tornasse real. Obrigado a minha banca examinadora Prof. Dr. Eduardo Cabral e Prof. Me. Jorge Luis, grandes docentes que tive o prazer de conhecer.

Aos primeiros amigos da UFC, Douglas, Felipe Seixas, Phablo e Mailson, que me acolheram e colocaram uma identidade pouco conhecida no *campus* Crateús, o apelido de OZangado, desejo todo o sucesso do mundo pra vocês meus companheiros. Agradeço aos amigos Moacir, Gleycianne, Daniel, Raul, Caio, Thamires e Lucas, por todas as conversas e companheirismo, desejo preservar nossa amizade, contem comigo pra o que precisar, admiro cada um de forma diferente, tenho orgulho de ter convivido com vocês, das pessoas e profissionais que se tornaram. Sentirei saudade da pergunta “E a janta?” toda noite.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará e ao professor Eduardo em disponibilizar o Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC e aos técnicos que compõe o respectivo ambiente, Helano, Manoel e Paulo Victor, ao laboratório de Solos, composto pelos técnicos Assis e Ricardo, vocês foram essenciais para que a produção experimental fosse realizada de forma correta e explicativa. Meu muito obrigado as mestrandas Ana e Cristina pelo apoio e ajuda em todo o período de experimentos laboratoriais, onde as mesmas disponibilizavam do seu tempo para qualquer tipo de ajuda.

Por fim, agradeço a Termoelétrica do Pecém por disponibilizar a cinza volante e a fábrica de cimento Apodi pelo apoio técnico.

“– Por que você quer tanto isso? – Porque me disseram que eu não iria conseguir.”

Homens de Honra (2000)

RESUMO

A Usina Termoeletrica do Pecém – UTE Pecém, é responsável por uma geração energética significativa do país, gerando toneladas de resíduos, entre eles a cinza volante, onde a mesma não tem um fim específico, destacando-se como um potencial substituto do cimento Portland. Argamassas geopoliméricas à base de cinza volante apresentam diversas vantagens, como menor emissão de poluentes, reuso de material, porém, a argamassa precisa apresentar resultados que se assemelhem a argamassas convencionais. Busca-se nesse estudo avaliar a argamassa geopolimérica no estado fresco e endurecido, com diferentes proporções de solução ativadora/cinza volante. Para isso foram confeccionados três traços de argamassa geopolimérica à base de cinza volante e um traço de referência composto de cimento Portland para fins comparativos. A cinza volante, oriunda da Termoeletrica do Pecém, foi caracterizada pela técnica de Fluorescência de Raios-X, granulometria à laser e massa específica. Os ativadores alcalinos, silicato de sódio e hidróxido de sódio, assim como, a areia natural e o cimento Portland foram utilizados para a produção das argamassas geopoliméricas e convencional. As amostras produzidas foram submetidas aos ensaios no estado fresco de consistência e plasticidade e *squeeze-flow*. No estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão, massa específica, absorção de água e índice de vazios, além da análise visual de efluorescência aos 28 dias. Conforme os resultados obtidos, as argamassas geopoliméricas, independente da relação ativador/cinza volante, apresentam boa trabalhabilidade, com desempenho superior ao da argamassa de referência. O ensaio de *squeeze-flow* demonstrou as maiores deformações, para a mesma carga, obtidas pelas argamassas geopoliméricas. A argamassa com maior razão solução ativadora/ cinza volante (A3) apresentou melhor desempenho mecânico, obtendo resultado superior, quando comparada a argamassa de referência, em até 145,87% na resistência à compressão axial e 229,37% na resistência à tração na flexão. O maior teor de sólidos presente na solução ativadora e o menor teor de água adicional propiciaram menor índice de vazios, absorção de água, influenciando na presença de efluorescência nas faces dos corpos de prova no período de cura.

Palavras-chave: Argamassa geopolimérica. Cinza volante. Ativação alcalina.

ABSTRACT

The Pecém Thermoelectric Plant - UTE Pecém, is responsible for a significant energy generation in Brazil, generating tons of waste, including fly ash, where it has no specific purpose, standing out as a potential substitute for Portland cement. Geopolymeric mortars based on fly ash have several advantages, such as lower emission of pollutants, reuse of material, however, the mortar needs to present results that resemble conventional mortars. This study seeks to evaluate the geopolymeric mortar in the fresh and hardened state, with different proportions of activating solution / fly ash. For this purpose, three lines of geopolymeric mortar were made based on fly ash and a reference line composed of Portland cement for comparative purposes. The fly ash, originated from the Pecém Thermoelectric, was characterized by the X-Ray Fluorescence technique, laser particle size and specific gravity. Alkaline activators, sodium silicate and sodium hydroxide, as well as natural sand and Portland cement were used for the production of geopolymeric and conventional mortars. The samples produced were subjected to tests in the fresh state of consistency and plasticity and squeeze-flow. In the hardened state, tests of resistance to axial compression and tensile strength in flexion, specific mass, water absorption and voids index were performed, in addition to the visual analysis of efflorescence at 28 days. According to the results obtained, geopolymeric mortars, regardless of the activator / fly ash ratio, have good workability, with superior performance to that of the reference mortar. The squeeze-flow test demonstrated the greatest deformations, for the same load, obtained by geopolymeric mortars. The mortar with a higher activating solution / fly ash ratio (A3) showed better mechanical performance, obtaining a superior result, when compared to the reference mortar, by up to 145,87% in axial compression strength and 229,37% in tensile strength in flexion. The higher content of solids present in the activating solution and the lower content of additional water provided a lower void index, water absorption, influencing the presence of efflorescence on the faces of the specimens during the curing period.

Keywords: Geopolymeric mortar. Fly ash. Alkaline activation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo simplificado de geopolimerização.	21
Figura 2 – Procedimento metodológico.	35
Figura 3 – Etapas da preparação da cinza volante: a) após secagem; b) após destorroamento; c) após peneiramento.	36
Figura 4 – Distribuição granulométrica da cinza volante.....	37
Figura 5 – Ativadores alcalinos: a) silicato de sódio; b) hidróxido de sódio em micropérolas.	38
Figura 6 – Ensaio de consistência.	42
Figura 7 – Ensaio de caracterização reológica (<i>Squeeze-flow</i>).	42
Figura 8 – Etapas da moldagem: a) fôrma prismática; b) moldagem.....	43
Figura 9 – Etapa: a) moldagem finalizada; b) corpos de prova desmoldados.....	43
Figura 10 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	44
Figura 11 – Ensaio de resistência à compressão axial.....	44
Figura 12 – Espalhamento das argamassas: a) Argamassa A1; b) argamassa A2; c) argamassa A3; d) argamassa AR.	47
Figura 13 – Análise visual de eflorescência da argamassa A1: a) topo; b) lateral 1; c) lateral 2; d) base.	56
Figura 14 – Análise visual de eflorescência da argamassa A2: a) topo; b) lateral 1; c) lateral 2; d) base.	56
Figura 15 – Análise visual de eflorescência da argamassa A3: a) topo; b) lateral 1; c) lateral 2; d) base.	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia natural.	39
Gráfico 2 – <i>Squeeze-flow</i> velocidade 3,0 mm/s.....	48
Gráfico 3 – <i>Squeeze-flow</i> velocidade 0,1 mm/s.....	49
Gráfico 4 – Resultados de resistência à tração na flexão.....	51
Gráfico 5 – Resultados de resistência à compressão axial.	52
Gráfico 6 – Massa específica, absorção de água e índice de vazios das argamassas.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estruturas tetraédricas.....	20
Tabela 2 – Classificação conforme a proporção Si:Al	20
Tabela 3 – Literatura analisada.....	33
Tabela 4 – Composição em óxidos da cinza volante.....	36
Tabela 5 – Características físicas da cinza volante.....	37
Tabela 6 – Características do silicato de sódio.....	38
Tabela 7 – Características da solução de hidróxido de sódio.....	38
Tabela 8 – Características da areia natural.....	39
Tabela 9 – Caracterização do cimento.....	40
Tabela 10 – Composições das argamassas.....	41
Tabela 11 – Resultados de consistência e plasticidade.....	46
Tabela 12 – Análise estatística de consistência e plasticidade.....	46
Tabela 13 – Dados 3,0 mm/s.....	48
Tabela 14 – Dados 0,1 mm/s.....	49
Tabela 15 – Análise estatística de resistência à tração na flexão.....	51
Tabela 16 – Análise estatística de resistência à compressão axial.....	53
Tabela 17 – Análise estatística massa específica, absorção de água e índice de vazios.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UTE	Usina Termoelétrica do Pecém
NaOH	Hidróxido de sódio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
CO ₂	Dióxido de carbono
Si	Silício
Al	Alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização e justificativa da pesquisa.....	15
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>17</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>17</i>
1.3	Delimitação.....	18
1.4	Estrutura de pesquisa.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Materiais geopoliméricos	19
2.2	Precursores.....	22
2.2.1	<i>Escória de alto forno</i>	<i>22</i>
2.2.2	<i>Metacaulim</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>Cinza volante.....</i>	<i>23</i>
2.3	Ativadores alcalinos.....	25
2.4	Argamassas geopoliméricas.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Materiais.....	35
3.1.1	<i>Cinza volante.....</i>	<i>35</i>
3.1.2	<i>Ativadores alcalinos.....</i>	<i>37</i>
3.1.3	<i>Areia natural.....</i>	<i>39</i>
3.1.4	<i>Cimento Portland.....</i>	<i>39</i>
3.2	Métodos de pesquisa.....	40
3.2.1	<i>Parâmetros de mistura.....</i>	<i>40</i>
3.2.2	<i>Ensaio realizados</i>	<i>41</i>
3.2.3	<i>Análise estatística dos dados</i>	<i>45</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Propriedades no estado fresco	46
4.1.1	<i>Consistência e Plasticidade</i>	<i>46</i>
4.1.2	<i>Caracterização reológica pelo método de squeeze-flow.....</i>	<i>48</i>
4.2	Propriedades no estado endurecido	50
4.2.1	<i>Resistência à tração na flexão.....</i>	<i>50</i>
4.2.2	<i>Resistência à compressão axial.....</i>	<i>52</i>

4.2.3	<i>Massa específica, absorção de água e índice de vazios</i>	54
4.3	Eflorescência	56
5	CONCLUSÃO	58
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA CONSISTÊNCIA E PLASTICIDADE	66
	APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPRESSÃO AXIAL	67
	APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA TRAÇÃO NA FLEXÃO	70
	APÊNDICE D – ABSORÇÃO DE ÁGUA	73
	APÊNDICE E – ÍNDICE DE VAZIOS	74
	APÊNDICE F – MASSA ESPECÍFICA	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa da pesquisa

O cimento Portland é um dos materiais de maior consumo na construção civil, usualmente utilizado em argamassas e concretos, materiais que podem ser empregados em diversas áreas da engenharia. Caracteriza-se como aglomerante hidráulico por seu processo de endurecimento ocorrer a partir da adição de água, no entanto, no estado fresco apresenta boa trabalhabilidade e moldabilidade, enquanto, no estado endurecido apresenta elevada resistência e durabilidade.

De acordo com os resultados preliminares de 2020 do Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento - SNIC (2020), o consumo de cimento no primeiro semestre no Brasil foi de 26,9 milhões de toneladas, tendo um crescimento de 3,6% em relação ao mesmo período do ano de 2019. Em termos de região nordeste, o estado do Ceará é o segundo maior produtor e consumidor de cimento, ficando atrás apenas do estado da Paraíba (SNIC, 2019). No entanto, a vasta produção de cimento Portland acarreta uma série de questões ambientais, como o alto consumo de recursos naturais e emissão de gases do efeito estufa.

De acordo com Borges *et al.* (2014), a queima do calcário e argilas a temperaturas próximas de 1500 °C para a clinquerização do cimento Portland tem causando preocupações, pois, eleva em demasia a emissão de dióxido de carbono – CO₂ para a atmosfera. Com a alta produção de cimento, a emissão de CO₂ aumenta de forma crítica. Dias (2008), estima que durante a produção de 1 tonelada de cimento, há uma produção de 1 tonelada de CO₂.

Diante desse contexto, a utilização de cimentos não convencionais pode propiciar a produção de argamassas e concretos alternativos, que geram menos impacto, tanto na emissão de gases, quanto na diminuição da agressividade ambiental. Alguns tipos de cimento utilizam resíduos de outras indústrias, como a siderúrgica, da indústria do papel e de usinas termoelétricas, como é o caso de materiais álcali ativados, que utilizam cinzas da combustão do carvão mineral, argilas calcinadas e escórias metalúrgicas.

A álcali ativação gera materiais com propriedades cimentícias e manipuláveis no estado fresco. Ocorre em condições altamente alcalinas, geralmente emprega materiais ricos em aluminossilicatos amorfos ou semicristalinos e soluções de hidróxido de sódio ou de potássio e silicato de sódio, podendo ser soluções simples ou compostas (SANTA, 2012). A base de aluminossilicatos, em forma de pó é denominada de precursor e a solução aquosa denominada de ativador (LONGHI, 2015).

Os materiais álcali ativados, geralmente, geram menores emissões de CO₂, com desempenho equiparado ou superior aos cimentos convencionais, possuem baixo teor de clínquer, usam ativadores sólidos ou líquidos, podem ser usados uma vasta gama de materiais ricos em alumínio, silício e cálcio (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO; REVUELTA, 2009). A disponibilidade de cálcio é considerada um fator importante na classificação dos materiais álcali ativados, os precursores com baixo teor de cálcio, como o metacaulim e as cinzas volantes, compõem uma classe mundialmente conhecida como geopolímeros.

Os materiais geopoliméricos caracterizam-se como um novo material, aglutinante, formando pasta cimentícia para concreto e materiais de revestimento (DAVIDOVITS, 2015). Esse tipo de cimento emite menos CO₂ na produção e utilização, quando comparados ao cimento Portland, onde estima-se uma redução de 40% à 90%, pelo fato de não dependerem do carbonato de cálcio (DAVIDOVITS, 2013). Outra vantagem é a aplicação de resíduos e coprodutos de outros processos produtivos como precursores em geopolímeros.

As cinzas volantes provenientes da queima do carvão mineral, em usinas termelétricas, são consideradas uma fonte de aluminossilicato. Na grande maioria são adequadas para sofrer ativação alcalina, devido à sua granulometria e estrutura amorfa. Cimentos à base de cinzas volantes emitem na faixa de 0,09 a 0,25 toneladas de CO₂ por tonelada, uma redução de 75% à 90%, comparada ao cimento convencional (DAVIDOVITS, 2013)

De acordo com Azevedo *et al.* (2017), pesquisas voltadas para a produção de ligantes geopoliméricos, utilizando cinzas volantes estão em crescimento, devido à grande produção e escassos fins de utilização. A cinza volante pode ser em composição com o clínquer, geralmente na produção de cimentos pozolânicos, bastante utilizada pela indústria cimentícia (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2011).

Usinas Termelétricas (UTE) do Brasil movidas a carvão mineral totalizam uma geração de energia com potência instalada de 3389 MW. A UTE do Pecém, localizada em São Gonçalo do Amarante – CE, é subdividida em Pecém I e Pecém II, totalizando uma potência de 1080 MW, em termos de porcentagem geram 32% da potência total do país, sendo a maior em termos de potência (SILVA, 2017).

A UTE do Pecém I recebe mensalmente dois navios de carvão mineral colombiano para suprirem uma potência de 720 MW e a UTE do Pecém II, um navio para suprir potência de 365 MW, com teor médio de cinzas de 8% à 10% (VASCONCELOS, 2018). O Complexo Termelétrico de Pecém tem uma produção diária de 1300 toneladas de resíduos, fracionadas

em 190 toneladas de cinza pesada, 900 toneladas de cinzas volantes e 210 toneladas de resíduos de dessulfuração (FGD), totalizando 474.500 toneladas anualmente (CIENTEC, 2016). Contudo, grande parte destes resíduos de UTE Pecém ainda não são reaproveitados, de acordo com Vasconcelos (2018), 60% de todo o resíduo de cinza são armazenados no pátio da própria usina, o restante é comercializado com cimenteiras locais.

Desse modo, para minimizar problemas ambientais é ideal que se execute um reaproveitamento desses resíduos como matéria-prima em outros processos produtivos. A inserção destes materiais no setor da construção civil, podem possibilitar a produção de novos materiais, tornando a construção civil mais econômica e sustentável (SAVASTANO; WARDEN, 2005). Por exemplo, argamassas geopoliméricas, que se diferenciam das argamassas convencionais pela substituição do cimento Portland pelo cimento geopolimérico.

As argamassas convencionais, geralmente, são constituídas por uma mistura de cimento Portland, areia e água, dependendo da sua funcionalidade, pode haver incorporação de aditivos químicos e adições minerais. No caso das argamassas geopoliméricas, os demais componentes são mantidos, somente o cimento é substituído pela mistura de precursores e uma solução alcalina. No entanto, esse tipo de ligante é pouco conhecido pela comunidade técnica e seu uso é pouco comum. Muitos questionamentos ainda são gerados a respeito do mesmo, entre eles, destaca-se a indagação: a argamassa de cimento geopolimérico atende as especificações técnicas, comparada as argamassas convencionais?

Em busca de respostas, a presente pesquisa busca analisar a influência das relação solução ativadora/cinza volante em propriedades físicas e mecânicas das argamassas geopoliméricas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a argamassa de cimento geopolimérico à base de cinza volante proveniente do carvão mineral da Usina Termoelétrica do Pecém e sua variação ativador/cinza.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as propriedades da argamassa no estado fresco por ensaio de consistência e plasticidade e *Squeeze-flow*;

- Avaliar as propriedades da argamassa no estado endurecido por resistência mecânica, massa específica, absorção de água e índice de vazios;
- Identificar a influência da relação solução ativadora/cinza volante na trabalhabilidade da argamassa geopolimérica.

1.3 Delimitação

A presente pesquisa se delimitou a utilizar a cinza volante como a principal fonte de aluminossilicato para a produção de material geopolimérico, uma vez que possui grande disponibilidade no município de São Gonçalo do Amarante, região do Porto do Pecém no estado do Ceará.

1.4 Estrutura de pesquisa

A pesquisa é dividida em cinco seções. Na seção 1 denominada de Introdução, está apresentada a contextualização e a justificativa de pesquisa, objetivos gerais e específicos e sua delimitação. A Seção 2 contém o referencial teórico, que é um estudo bibliográfico de conteúdos relevantes abordados para a efetivação da pesquisa, contendo a subseção denominada materiais geopoliméricos, com os tópicos de: precursores, ativadores e argamassas geopoliméricas.

A seção 3 aborda a metodologia para a confecção e execução de argamassas geopoliméricas, bem como seus respectivos ensaios. A Seção 4 traz os resultados da pesquisa e as discussões, a partir das análises da argamassa no estado fresco e endurecido. Por fim, a seção 5 contém as conclusões e sugestões de pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais geopoliméricos

A utilização de álcalis para produção de ligante, com resistência e endurecimento semelhantes ao cimento Portland, foi inicialmente descoberta por Purdon em 1940. Sua mistura continha areia, escória siderúrgica e álcalis, inicialmente utilizou o hidróxido de sódio como ativador alcalino, e posteriormente, o hidróxido de cálcio (MALONE; RANDALL, 1985).

Em 1950, o ucraniano Glukhovsky desenvolveu sistemas ativados com álcalis, com o uso de silicato de cálcio e aluminossilicatos (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007). Posteriormente, na década de 60, o mesmo pesquisador investigou ligantes à base de escórias, chegando à conclusão que outros ativadores poderiam ser usados, como fosfato, fluoretos e carbonatos, analisando efeitos do aquecimento e sua influência na alta resistência inicial e a formação de zeólitos durante o tratamento alcalino (MALONE; RANDALL, 1985).

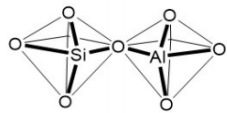
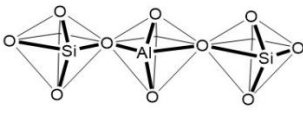
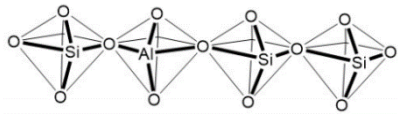
Os materiais álcali ativados caracterizam-se pela mistura entre ativadores alcalinos e precursores em pó ricos em aluminossilicatos. Os ativadores alcalinos podem ser caracterizados como sais alcalinos, enquanto os precursores podem ter origem de uma grande variedades de resíduos industriais e vários aluminossilicatos, como a escória de alto forno, cinzas volantes de carvão, metacaulim, sílica ativa, entre outros (SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011). Esses materiais têm uma vasta variedade de nomenclaturas na literatura, como: cimento ativado alcalinamente, geopolímeros, geo cimento, concreto de polímero inorgânico, cerâmica alcalina, entre outros (SEVERO *et al.*, 2013).

O desenvolvimento de materiais à base de aluminossilicatos, intitulado e patenteado por Davidovits (1999) de geopolímeros, foi motivado pela ocorrência de incêndios envolvendo plásticos na França, na década de 70. Buscou-se desenvolver novos materiais poliméricos inorgânicos, não inflamáveis e não combustíveis (DAVIDOVITS, 2002). Desse modo, os geopolímeros são basicamente formados por uma fonte de aluminossilicato que apresentem uma quantidade considerável de material amorfo e dimensão granulométrica adequada, portanto, as fontes de aluminossilicatos mais usuais são o metacaulim e as cinzas provenientes da queima de carvão mineral, também classificados como precursores com baixo teor de cálcio. Esses precursores quando misturados a um ativador alcalino, destacando-se silicatos e hidróxidos de pH elevado, tem o material amorfo dissolvido e posteriormente, formam redes tridimensionais de aluminossilicatos (LONGHI, 2015). São identificados como aglomerados de nanocristais compactos pela formação de gel amorfo no processo de enrijecimento, que

geralmente ocorre em temperatura ambiente ou superior (PROVIS; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005).

Redes de tetraedros compostas de SiO_4 e AlO_4 , que se ligam alternadamente e compartilham todos os oxigênios dos vértices, formam a matriz química dos geopolímeros, que foi intitulado de poli-sialato, onde, sialato é a abreviação de silico-oxo-aluminato (PINTO, 2004). Essas estruturas tetraédricas, constituídas de cadeias poliméricas tridimensionais, variando de amorfo a semicristalino, em três tipos, são eles: poli(sialato) (-Si-O-Al-O-), poli(sialato-siloxo) (Si-O-Al-O-Si-O) e poli(sialato-dissiloxo) (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O) (DAVIDOVITS, 1994). A representação das estruturas tetraédricas pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Estruturas tetraédricas.

Nome	Razão Si:Al	Unidade Repetidora	Estrutura 3D
Polissialato (M-PS)	1:1	- Si - O - Al - O -	
Polissialatossiloxo (M-PSS)	2:1	- Si - O - Al - O - Si - O -	
Polissialatodissiloxo (M-PSDS)	3:1	- Si - O - Al - O - Si - O - Si - O -	

Fonte: Adaptado de Davidovits (1994).

Legenda: Si – silício; Al – Alumínio; O- oxigênio

Davidovits (1999) afirma que a variação da relação de Si:Al influencia no tipo de aplicação do material geopolimérico, portanto, a classificação das aplicações conforme a proporção é demonstrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação conforme a proporção Si:Al

Si:Al	Aplicações
1:1	Tijolos
	Cerâmicas
	Proteção Contra fogo
2:1	Cimentos com baixa emissão de CO_2
	Retenção de resíduos tóxicos e radioativos
3:1	Compósitos com fibras resistentes ao fogo

	Equipamentos para fundição
>3:1	Aditivos para a indústria (200 a 600 °C)
	Equipamentos para a indústria aeronáutica
20:1 – 35:1	Compósitos com fibras resistentes ao fogo

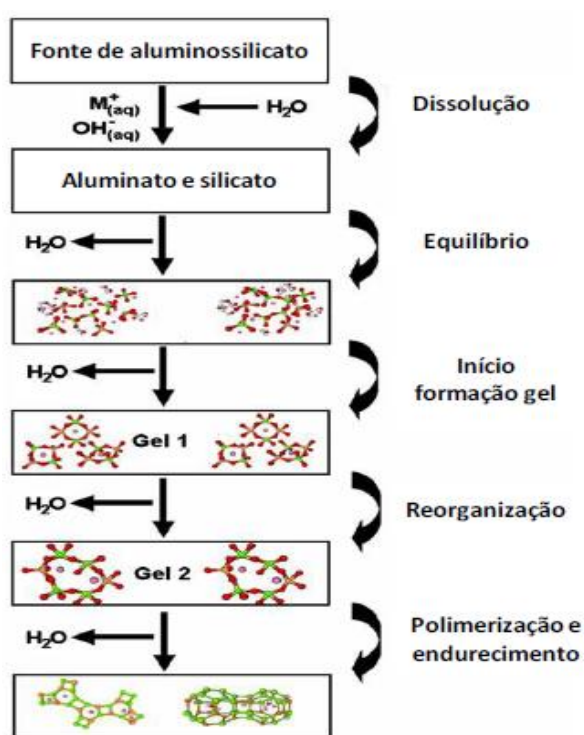
Fonte: Adaptado de Davidovits (1999).

A reação química dos minerais que contém sílica e alumina produz a ligação polimérica Si-O-Al-O, tornando a relação Si/Al a principal variável no processo de geopolimerização, que deve ser controlado por variações de temperatura, pressão e razões molares de seus componentes (DIAS, 2008).

A geopolimerização pode ser simplificada quando assume-se que sua ocorrência é dada pela transformação de uma fonte sólida de aluminossilicato em um aluminossilicato alcalino sintético. Quando a fonte sólida entra em contato com água, produz silicato e aluminato, portanto, a formação de gel ocorre em soluções alcalinas concentradas, liberando água, que desempenha um papel de reação, formando duas etapas sucessivas e controladoras da estrutura do gel. O processo de polimerização e endurecimento é o estágio que os cristais começam a se desenvolver e se solidificar (DUXSON *et al.*, 2007).

Na Figura 1 há um exemplo de como ocorre o processo conforme suas etapas explicitadas.

Figura 1 – Processo simplificado de geopolimerização.



Fonte: Adaptado de Duxson et al. (2007).

De acordo com a Figura 1, o aluminossilicato sólido é misturado à solução de ativação alcalina, passando pelo processo de dissolução. A concentração de aluminato e silicato aumenta no processo de dissolução até que se atinja a concentração ideal, para que se comece o a etapa de condensação (BUCHWALD; ZELLMANN; KAPS, 2011). A água é de suma importância nesse processo, pois, auxilia diretamente no processo de dissolução, garantindo a plasticidade da mistura, além de proporcionar a policondensação (DE AZEVEDO; DIAS; SOARES, 2019). Após a dissolução das partículas, ocorre a reorganização e gelificação, o que torna o processo de geopolimerização rápido, seu tempo de endurecimento varia dependendo da matéria-prima e condições de processamento, não permitindo a formação de estrutura cristalina (SANTA, 2012).

Há diferenças evidentes nas propriedades de geopolímeros de matérias-primas distintas, materiais compostos de cinzas volantes tem maior durabilidade, levando a crer que a fase aglutinante e o mecanismo de reação são diferentes dos geopolímeros à base de metacaulim, apesar de exibirem propriedades diferentes, contém semelhanças na estrutura molecular e na nanoestrutura, onde, tem a mesma ligação de silício e alumínio e formação do mesmo aglutinante de gel (DUXSON *et al.*, 2007). O resultado da geopolimerização aproxima-se de uma rocha sintética, onde, suas propriedades dependem da relação entre silício e alumínio, formando uma rede de átomos com estrutura tridimensional amorfa (BORGES *et al.*, 2014).

2.2 Precursores

2.2.1 Escória de alto forno

Um dos principais precursores de materiais álcali ativados é a escória de alto forno, subproduto obtido a partir da produção de ferro gusa, é uma combinação de minério de ferro e fluxo de calcário, após resfriado, forma uma granulometria muito fina, sua reatividade é de suma importância, sendo influenciada diretamente por suas propriedades como, composição química, mineralógica, teor de vidro, finura e tipo de ativação (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003).

Quando agentes de escória como cinzas de coque e calcário são utilizadas para remoção de impurezas do minério de ferro, a escória é derretida formando um líquido não metálico em suspensão, onde, contém principalmente em sua composição silicatos e aluminossilicatos de cálcio, posteriormente é separado do metal líquido e por fim, resfriada (LI; SUN; LI, 2010). A escória apresenta teores em torno de 15% de aluminossilicatos, basicamente

constituídos por óxido de alumínio e dióxido de silício, portanto, através destes teores é possível formular materiais álcali ativados a partir da sua composição química (SILVA *et al.*, 2014).

2.2.2 *Metacaulim*

O metacaulim também é um precursor bastante difundido, origina-se a partir da calcinação do caulim, um minério composto de silicatos hidratados de alumínio. O tempo de calcinação e temperatura a qual o caulim é submetido afeta diretamente a área superficial final, grau de desidroxilação e reatividade, a estrutura básica contém apenas silício e alumínio, porém a maioria dos metacaulins contém algum nível de impurezas. Os geopolímeros à base de metacaulim podem ser consistentes, com propriedades previsíveis durante a preparação (DUXSON *et al.*, 2007).

O caulim passa por tratamento térmico para sofrer desidroxilação e se tornar mais reativo e apropriado para sofrer ativação alcalina (SANTA, 2012). No sistema de calcinação para obtenção do metacaulim, a água é um dos produtos do processo, quando comparado ao processo de obtenção do clínquer utilizado na composição de cimento Portland, onde libera-se grande quantidade CO₂ no processo de calcinação. Desse modo, o metacaulim tem grande potencial, quanto ao que se refere a questões ambientais (BORGES *et al.*, 2014). Por esta razão, vem sendo estudado por diversos pesquisadores como uma das matérias-primas mais adequadas para a produção de geopolímeros.

2.2.3 *Cinza volante*

Entre os materiais com grande potencial de uso como precursores, destacam-se as cinzas volantes, que se originam do processo de combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado para produção de energia em usinas termoelétricas. As cinzas volantes apresentam uma propriedade denominada de atividade pozolânica, que é a capacidade de reagir com hidróxido de cálcio em presença de água, formando compostos com propriedades cimentícias, resultando em um material silicoso ou sílico-aluminoso ABNT NBR 12653 (2014)

Devido a propriedade pozolânica, as cinzas volantes tornam-se atrativas às indústrias cimenteiras, sendo utilizadas como adição suplementar ao cimento Portland. Também são consideradas uma alternativa para redução do consumo de cimento, sem que haja a necessidade de clínquer em sua composição, pois em meio fortemente alcalino adquire propriedades aglomerantes (VARGAS *et al.*, 2007). São constituídas basicamente de magnésio, sílica, alumina, titânio, óxido de ferro, cálcio, entre outros (VASCONCELOS, 2018).

A cinza volante apresenta predominantemente fases vítreas, caracterizadas como materiais amorfos, porém, em quantidades menores possuem fases cristalinas, compostas de hematita, quartzo, magnetita e mulita (VARGAS, 2006). Podem ser classificadas como flutuantes, que são constituídas por esferas ocas, paredes finas e porosas, assim como, magnéticas, constituídas por esferas sólidas e grosseiras e de fundo que apresentam alto teor de silício e alumínio, com esferas de superfície vítrea (CIRINO, 2016).

A cinza volante é um material ideal para a produção de materiais álcali ativados, por se tratar de um resíduo, apresenta vantagens ecológicas, contudo, a problemática na utilização da cinza se dá pela variação das características químicas das cinzas, dependendo da origem, uma vez que cada usina possui suas particularidades, causando problemas no controle de parametrização e qualidade do produto final, desse modo, torna-se imprescindível a caracterização das mesmas para avaliar a eficácia nas misturas de geopolímeros (WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017).

Quanto melhor a qualidade das cinzas volantes, melhores as propriedades na pasta cimentícia, assim, torna-se importante a avaliação de propriedades e os tipos de cinzas volantes. O tipo de cinza volante depende diretamente de compostos a base de Si e Ca, vale salientar que o pH e o teor de óxido de cálcio – CaO influenciam diretamente no tempo de pega da pasta geopolimérica (RISDANARENI; PUSPITASARI; JANUARTI JAYA, 2017). A ASTM C 618 (ASTM, 2012) especifica requisitos químicos e físicos das cinzas volantes de carvão, classifica as cinzas tipo F e tipo C. Tipo F possuem propriedades pozolânicas, com baixo teor de cálcio e as cinzas do tipo C além de apresentar propriedades pozolânicas, possui algumas propriedades cimentícias, tem alto teor de cálcio.

A cinza volante ativada por solução alcalina forma um material forte com estrutura de rede, de superfície lisa, vítrea e brilhante. Durante a mistura apresenta boa trabalhabilidade, mesmo quando a relação líquido/sólido é baixa, tempo de cura que varia de 2 a 5 horas (PALOMO; GRUTZECK; BLANCO, 1999). A obtenção a alta resistência inicial de algumas misturas geopoliméricas foi amplamente divulgado como uma propriedade potencialmente vantajosa, todavia, em misturas de cinza volante curadas em temperatura ambiente essa característica é menos observada (PROVIS, 2014).

A resistência de pastas geopoliméricas está diretamente ligada a propriedade física e química da cinza volante, os fatores que afetam diretamente são a finura e a relação Silício/Alumínio (Si/Al), respectivamente. A relação Si/Al influencia na resistência e tempo de pega, onde, a resistência à compressão é considerada ótima quando a proporção é em torno de

dois, constata-se que a resistência diminuiu quando se aumenta a relação Si/Al (WIJAYA; EKAPUTRI; TRIWULAN, 2017).

2.3 Ativadores alcalinos

O ativador alcalino é essencial para que haja desenvolvimento das reações, geralmente, são utilizadas soluções de silicatos e hidróxidos de sódio ou de potássio para essa função. A solução ativadora está diretamente ligada ao desempenho mecânico dos geopolímeros, a escolha do ativador ideal depende da aplicação desejada, pelo fato de solução a base de sódio apresentarem maior resistência mecânica e a base de potássio uma maior resistência a altas temperaturas (DE AZEVEDO; DIAS; SOARES, 2019).

Devido ao baixo custo, ampla disponibilidade entre os hidróxidos alcalinos e baixa viscosidade, o uso de hidróxido de sódio – NaOH como ativador na síntese de geopolímeros é muito difundido, tanto na mistura com cinzas volantes como metacaulim, portanto, devido a problemas com corrosão causados pelo NaOH concentrado ou qualquer outro hidróxido alcalino, gerando problemas estruturais e de desempenho, a ativação de silicato é frequentemente preferida (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Geopolímeros ativados com silicato de sódio – Na_2SiO_3 apresentam maior resistência mecânica em relação aos constituídos com solução de silicato de potássio, no entanto, quando submetidos a elevadas temperaturas, as resinas à base de silicato de potássio se sobressaem, apresentando uma maior resistência residual (DE AZEVEDO; DIAS; SOARES, 2019).

Quando a solução ativadora contém em sua composição silicato de sódio ou de potássio, comparadas as de hidróxido de sódio e potássio, há maiores taxas de reações (PALOMO; GRUTZECK; BLANCO, 1999). Vale salientar que misturas ativadas por hidróxido podem apresentar uma melhor trabalhabilidade quando comparados aos ativados por silicato, o principal fator que influencia este parâmetro é a viscosidade das soluções concentradas de hidróxido, que é muito menor que as de soluções de silicato alcalino, onde são frequentemente muito altas (PROVIS; BERNAL, 2014).

Quando utilizado hidróxido de potássio (KOH) em comparação ao sistema com hidróxido de sódio (NaOH), o diagrama de fases é mais simples, é improvável que soluções ativadoras de hidróxido de potássio seja problemática no processo de obtenção de geopolímeros, contudo, forma-se uma estrutura porosa semelhante aos que contém NaOH (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Em termos de custo, torna-se mais viável a utilização de

hidróxido de sódio ao invés de hidróxido de potássio, uma vez, que este apresenta menor custo de produção (BORGES *et al.*, 2014).

Uma opção bastante requisitada é a solução ativadora com uso combinado de hidróxido e silicato de sódio (Na_2SiO_3). Amostras com silicato de sódio em sua composição apresentam maiores valores de resistência mecânica, quando comparados a amostras apenas com NaOH. A relação entre dióxido de silício (SiO_2) e óxido de sódio (Na_2O) promovem matrizes mais rígidas (AZEVEDO; STRECKER, 2017).

2.4 Argamassas geopoliméricas

Argamassa é a mistura composta de areia, água e aglomerantes, geralmente cimento Portland, destinados a assentamento de blocos cerâmicos ou de concreto, rejuntamento ou revestimentos, regularização e argamassa de reparo. O termo argamassa geopolimérica se dá pelo fato de não possuir o cimento Portland em sua composição, desse modo, o aglomerante é formado por um pó rico em aluminossilicato e solução ativadora alcalina.

Os agregados miúdos comumente utilizados são areias extraídas do leito de rio, de origem quartzosa, as mesmas utilizadas em argamassas convencionais. Os parâmetros de dosagem das argamassas geopoliméricas seguem a convencional relação cimento:areia:água. No entanto, outras variáveis podem ser modificadas por possuírem efeitos diretos no comportamento dessas argamassas, como a relação ativador/precursor, hidróxido/silicato, dióxido de silício/óxido de alumínio ($\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$), água total/ligante, água total/sólidos, consumo de ligante por metro cúbico, quantidade de água total, concentração molar do hidróxido de sódio, relação molar dos ativadores, teor de sólidos de ativadores, teores de cálcio dos precursor, entre outros. Além disso, as argamassas geopoliméricas também podem conter em sua mistura o cimento Portland e aditivos plastificantes, incorporadores de ar e agregado leve.

As argamassas geopoliméricas não tem uma norma específica, para que se obtenha a análise das propriedades, adota-se os parâmetros regidos pelas normas de argamassa de cimento Portland, a partir da mistura, moldagem, ensaios no estado fresco e endurecido.

Neste tópico serão abordadas pesquisas recentes com uso de cinza volante álcali ativada, buscando evidenciar os principais parâmetros de mistura e as principais propriedades avaliadas.

Entre os primeiros estudos com cinzas volantes álcali ativadas, está o importante trabalho de Fernández-Jiménez e Palomo (2003), que analisou propriedades mecânicas de

prismas 4 x 4 x 16 cm de argamassa à base de diferentes tipos de cinza volante do tipo F, originados da Espanha. O ativador alcalino utilizado foi de NaOH com concentração molar de 8M, as razões solução alcalina/precursor utilizadas foram: 0,35, 0,38, 0,33, 0,28, a relação agregado/precursor é de 2:1, cura térmica durante 20 horas à 85 °C, foram submetidas à ruptura compressiva em 1 e 28 dias. Os resultados demonstraram que todas as cinzas volantes são adequadas para a ativação, por obterem porcentagem de material não queimado menor que 5%, teor de óxido de ferro – Fe_2O_3 não superior a 10%, baixo teor de CaO, teor de sílica reativa entre 40-50%, porcentagem de partículas com dimensões inferiores a 45 μm entre 80% e 90%, em termos compressão na pior das hipóteses apresenta resistência de 30 MPa às 24 horas, aumentando a resistência aos 28 dias, para partículas muito finas menores que 45 μm , permite atingir resistência à compressão superior a 66 MPa às 24 horas.

Ainda na primeira década dos anos 2000, um estudo realizado no Brasil por Vargas *et al.* (2007) teve como objetivo analisar o desempenho de argamassas álcali-ativadas à base de cinzas volantes, tendo como ativador alcalino a combinação de NaOH e hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, as relações molares da Sílica (S), cálcio (C), sódio (N) e do Alumínio (A) presentes nos ativadores e na cinza volante (CV) foram: S/Al= 8,19; C/Al=0,22; N/Al= 2,47 e N/S=0,30, a relação água/aglomerante adotada foi de 0,54 e a ativador/agregado miúdo foi de 1:2, moldado em cubos de 5x5x5 cm. Com o intuito de analisar a resistência à compressão, foram submetidas amostras em dois ambientes distintos, à 70 °C por 12 horas em estufa, finalizadas à temperatura de 22 °C até a idade do ensaio, a outra mantida a 70°C até a idade de ensaio. Os ensaios da resistência à compressão foram em 4, 6, 8 ,10, 12, 24 e 48 horas, 7 e 28 dias. Na análise em estufa houve decréscimo de resistência em menor espaço de tempo quando comparado as amostras mantidas a 22 °C, indicando que a solução ativadora de NaOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provocou reações deletérias na matriz endurecida, influenciando em um decréscimo nos resultados de resistência a compressão. Realizada a caracterização microestrutural por meio do MEV/EDS não foi possível entender o mecanismo de reação deletéria provocada entre ativadores alcalinos e cinza volante.

Nos últimos cinco anos, as pesquisas com cinza volante se intensificaram, nesses estudos as variáveis controladas testadas são as mais diversas, contudo, a resistência mecânica é uma propriedade almejada. Atis *et al.* (2015) registraram alta resistência à compressão e tração de misturas de argamassa com cinzas volantes classe F e areia, na razão 1:3, água e NaOH como ativador. A concentração do sódio foi alterada de 4% para 20% com intervalos de 2%, portanto, a concentração de sódio é levada em consideração nesse estudo por conter água

adicional no NaOH, afetando diretamente a relação água/cinza que deve-se manter em 1/3. Outra variável em estudo foi a temperatura de cura de 45 a 115 °C com incremento de 10 °C, totalizando oito distintas temperaturas, as durações foram 24, 48 e 72 horas. Moldadas três amostras prismáticas 40 x 40 x 160 mm, totalizando 216 amostras, onde, cada variação de sódio/temperatura utilizava 3 amostras. Concluiu-se que a temperatura e concentração de sódio influenciam nas resistências, argamassas a 45 °C não desenvolveram resistência adequada, porém as maiores resistências à tração e à compressão ocorreram nas misturas curadas a 115 °C por 24 horas e concentração molar de sódio 14%, com valores de 14,9 MPa e 120MPa, respectivamente.

A pesquisa realizada por Kotwal *et al.* (2015) avaliou argamassa álcali ativada constituída de cinza volante, classe C, com consumo de 720 kg/m³, areia calcária, água, silicato de sódio e hidróxido de sódio. Para análises foram confeccionadas amostras cúbicas de 50mm e prismáticas 25 x 25 x 285 mm, variando a relação NaOH/precursor de 0,05, 0,075, 0,1, 0,125, Na₂SiO₃/precursor de 0,025, 0,050, 0,075, 0,1 e areia/precursor de 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, mantendo-se fixa a relação água/precursor em 0,50. As propriedades testadas foram trabalhabilidade, densidade, calor de hidratação e resistência à compressão quando submetidas a cura ambiente em idades precoces, atingindo 40 MPa aos 7 dias constatando que a resistência aumentou gradualmente como resultado da incorporação de NaOH e Na₂SiO₃, porém, a proporção ideal para ambas as relações é de 0,10, tornando assim a argamassa como uma alternativa ao cimento Portland, porém indica-se realizar outras análises imprescindíveis.

A resistência à compressão e o tempo de pega de argamassas geopolimérica foi avaliada por Helmy (2016), nesse estudo buscou-se identificar a influência do uso de silicato de sódio de baixa viscosidade e alta viscosidade, assim como do hidróxido de sódio, variando a concentração molar de 8, 12 e 16 M. A relação entre os ativadores foi de 1:2 em peso. Também se variou a proporção cinza/ativador, tempo de repouso e a adição de água, a relação cinza: areia foi de 1:2,75 com moldagem de corpos de prova com dimensões de 70,6 x 70,6 x 70,6 mm. A cura das argamassas foi realizada em quatro etapas, cada etapa com 6 horas em estufa a 70 °C e 18 horas em temperatura ambiente, com intervalos de descanso entre fases. Foram realizados ensaios de compressão nas idades de 24, 48, 72 e 96 horas e 7 dias, concluiu-se que a cura intermitente aumentou a resistência ao final de cada etapa, onde, treze corpos de prova apresentaram resistência superior a estipulada em norma de 27 MPa, enfatizando que o uso de silicato de alta viscosidade, um percentual líquido alcalino de 35% ou 48,5%, a qualquer

solução molar de NaOH, sem adição de água e repouso de 24 ou 72 horas podem garantir melhores resistências.

Um estudo de Saloma *et al.* (2016) produziu quatro misturas álcali ativadas à base de cinza volante de classe F, adicionadas soluções de silicato de sódio em gel com 58% de pureza e hidróxido de sódio em flocos com 98% de pureza, com razão de proporção entre ambas de 1,0 e a de ativador/cinza volante de 0,8. A variável de controle de cada argamassa é a molaridade de NaOH de 8, 12, 14 e 16 M. As amostras foram moldadas em fôrma de cubo 50 x 50 x 50 mm com processo de cura a vapor de 60 °C por 48 horas, enquanto, a relação areia/cinza volante é de 2,75. Foram realizados ensaios de *slump flow*, constatando que quanto maior a molaridade, menor será o escoamento, entretanto, a variância de NaOH influência no tempo de pega, onde, maiores molaridades, mais rápido é o tempo de endurecimento, quando se avaliou a resistência à compressão, os corpos de prova foram rompidos aos 3, 7, 14 e 28 dias, resultando em maiores valores em todas as idades na amostra de 14 M, atingindo um pico de 10,06 MPa e menores na amostra de 8 M, onde o maior valor foi de 3,95 MPa.

Jeyalakshmi *et al.* (2017) realizaram a análise dos efeitos do tratamento térmico em argamassas álcali ativadas com cinzas volante classe F e solução de silicato de sódio e hidróxido de sódio há 5 e 10 M. Em duas misturas utilizou-se como aditivo o óxido de zircônio (ZrO_2) em 2%. A relação de cinza:areia em 1:2 e cinza/solução alcalina de 0,55 e 0,60. Foram moldados 4 corpos de prova para cada traço, totalizando 8 corpos cilíndricos de dimensões 50 x 100 mm e 8 utilizando o tamanho da amostra 22 x 11 x 7 cm, curadas a 80 °C durante 24 horas, porém em seu estudo as amostras foram submetidas aos 7 dias a aquecimento de temperatura elevada por um período de 2 a 4 horas, variando de 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C. As análises realizadas foram resistência à compressão, TGA / DTA, microestrutura e medição da condutividade térmica. A microestrutura mostrou-se intacta mesmo a elevadas temperaturas, o ZrO_2 melhorou a resistência térmica, notou-se que argamassas sem adição de ZrO_2 apresentaram ganho de resistência aos 200 °C e uma perda gradativa conforme aumentava a temperatura, já nas adicionadas ZrO_2 com concentração molar de 10 M apresentaram maiores resistências em temperaturas de 600 – 800 °C.

O trabalho de Gooma *et al.* (2017) relata as propriedades de tempo de pega, trabalhabilidade e resistência à compressão aos 7 dias de argamassas geopoliméricas de cinzas volantes do tipo C de duas fontes distintas, utilizando silicato de sódio e hidróxido de sódio 10 M, com razões entre ambos de 0,5, 1,0, 1,5, 2,5, água/precursor variou de 0,35 a 0,45, solução alcalina/precursor variou de 0,25 a 0,30 e relação precursor:areia de 1:2,75. Utilizou-se dois

regimes de cura, em estufa a 70 °C por 24 horas e cura ambiente a 23 °C. Foram produzidos 13 misturas para cada tipo de cinza e corpos de provas cúbicos de 50 x 50 x 50 mm. Constatou-se que o tempo de pega e a trabalhabilidade diminuíram com o aumento da relação solução alcalina/precursor e diminuição da proporção água/precursor. A resistência em cura ambiente atingiu 20,80 MPa e em estufa 40,10 MPa, a proporção silicato e hidróxido de sódio ideal é de 1,0, apresentando melhor tempo de pega e resistência.

Os pesquisadores Dasseekpo *et al.* (2017) utilizaram cinza volante classe F, areia, silicato e hidróxido de sódio 14 M, água e plastificante para produzir argamassa geopolimérica. As proporção adotadas foram as seguintes: relação cinza/areia de 2:1, solução ativador/cinza de 0,48, utilizou-se 60 gramas de aditivo plastificante e 260 gramas de água, misturados e moldados em cubos de 70,7 x 70,7 x 70,7 mm, adotando período de descanso de 24 horas, após o período, deixados em cura a 60 °C até o seu rompimento aos 7, 14 e 28 dias. Os resultados mostram que a adição sequencial de hidróxido de sódio, silicato de sódio, plastificante e água aumenta consideravelmente a resistência à compressão, resultando em 21,13 MPa aos 28 dias, demonstrando claramente que há uma influência significativa da adição sequencial dos componentes das argamassas.

Firdaus, Yunus e Rosidawani (2017) analisaram diferentes tipos de cinzas volantes aplicadas em misturas de argamassas geopoliméricas, essas cinzas foram caracterizadas por meio de fluorescência de raios X (XRF), difração de raios X (DRX) e tamanho de partículas. A mistura também continha areia, superplastificante e os ativadores NaOH e Na₂SiO₃, as proporções de ativador/precursor foram de 0,25, 0,35 e 0,45, a relação água/precursor foi fixado em 0,4 e a relação superplastificante/precursor de 0,7% foi usado para melhorar a trabalhabilidade. Foram moldados três corpos de prova para cada uma das quatro amostras de cinza, os testes de compressão foram realizados em 7, 21 e 28 dias. Os resultados apontam as argamassas com relação de 0,45 entre ativador e precursor com melhores resultados de resistência à compressão, além de indicar que a finura das cinzas influencia significativamente a resistência à compressão, pois, cinzas com melhor filtragem, continham melhores teores de alumínio e silício, alcançando 10,84, 12,48 e 28,2 MPa em 28 dias.

O trabalho realizado por Hadi, Al-Azzawi e Yu (2018) analisou cinzas volantes do tipo F de cinco fontes distintas na produção de argamassas geopoliméricas, analisou-se a difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (XRF) e distribuição de tamanho de partículas. Misturadas a areia, álcali ativadores como o hidróxido de sódio com molaridade de 12, 14 e 16 M e silicato de sódio com proporções em razão de peso entre ambas de 1,5, 2,0 e

2,5, a relação ativador alcalino/cinzas volantes em quatro razões de peso que são 0,4, 0,5, 0,6 e 0,7, cinzas volantes:areia em 1:2,75, com dimensões cilíndricas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. As misturas foram subdivididas de acordo com a fonte em cinco grupos cada grupo contém 36 misturas, totalizando 180 amostras de argamassas geopoliméricas, mantidos a temperatura ambiente por 24 horas e curadas a 70 ° C por 24h. Testadas à resistência à compressão aos 7 dias, os resultados indicaram que o aumento de SiO₂, partículas maiores e a proporção ativador/precursor influenciam negativamente na resistência, constatando que a proporção ideal é entre 0,50 e 0,60, independentemente da razão Na₂SiO₃/NaOH, as amostras apresentaram resistência na faixa de 7 MPa e 67 MPa.

O estudo de Kaur, Singh e Kaur (2018) verificou a variação da resistência em argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes de classe F, foi utilizada areia em condição de superfície saturada. A solução ativadora usada teve a razão Na₂SiO₃/NaOH de 2,0 e a molaridade do hidróxido de sódio variou em 12, 14 e 16 M. A proporção de cinza volante: areia foi de 1:3 e a razão ativador/precursor de 0,45. A cura ocorreu em estufa a 80 °C por 24 horas. Foram moldadas 6 amostras em cubo 70,6 x 70,6 x 70,6 mm, onde, 3 somente com NaOH e o restante com a mistura entre Na₂SiO₃/NaOH. Os ensaios de resistências foram realizados nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Os resultados mostram que o aumento da molaridade gera um tendência de crescimento da resistência à compressão, assim como o tempo de cura, obtendo valores de 40,42 MPa obtida pela incorporação de silicato misturado a hidróxido de sódio com 16 M, tendo valores 1,2 vezes maiores quando comparadas as argamassas que só tinham NaOH em sua composição.

Saxena, Kumar e Singh (2018) avaliaram as influências na combinação de diferentes ativadores nas propriedades mecânicas de argamassas geopoliméricas compostas de cinza volante, areia siltosa, e como ativadores, hidróxido de sódio (NaOH) e de hidróxido de potássio (KOH) ambas com concentrações 8, 10, 12 e 14 M, silicato de sódio (Na₂SiO₃) e silicato de lítio (Li₂SiO₃). A proporção cinza:areia foi de 1:3, enquanto a proporção de NaOH/KOH:Na₂SiO₃/Li₂SiO₃ foi de 1:2 e ativador alcalino/cinza volante foi mantida em 0,6 em todas as misturas. Foram moldados 144 corpos de prova em cubos de 7,5 cm³ para análise de resistência à compressão, todos foram curados em um forno a 80 ° C por 30 minutos e depois desmoldados, metade deles curados a 80 °C por 4, 8 e 12 horas e a outra metade em forno de micro-ondas por 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos. Os resultados apontam que a combinação de KOH a 14 M e Na₂SiO₃ apresentaram maiores resistências nos tempos de cura de 60 minutos e

12 horas, porém, quando comparadas entre si, a amostra submetida a 60 minutos de cura obteve resistência à compressão superior.

Um estudo experimental realizado por Cornelis *et al.* (2019) sobre argamassas à base de cinza volante do tipo C, curadas em temperatura ambiente, avalia a trabalhabilidade e a resistência mecânica. A mistura é composta por areia, hidróxido de sódio (NaOH) 10 M e silicato de sódio (Na₂SiO₃), a proporção de NaOH:Na₂SiO₃ é 1:2, variando a relação ativador/ligante em 0,30, 0,35 e 0,40 em massa, também variou-se a relação pasta/areia de 1, 1,25, 1,5 e 2. A argamassa fresca foi submetida a ensaio de mesa de consistência, moldada posteriormente para teste de resistência à tração e em molde de cubo 50 mm³ para testes de compressão. Os moldes foram removidos após 24 horas e corpos de prova mantidos em cura ambiente, protegidos com folha de vinil até a data dos testes aos 28 dias, para garantir um ambiente estável. As argamassas tiveram uma boa trabalhabilidade, porém os maiores valores de resistência à compressão e tração não estão ligadas as maiores proporções, foram de 60 e 2,8 MPa respectivamente, com as proporções NaOH:Na₂SiO₃ de 0,35 e pasta/areia de 1,5.

A pesquisa de Firdaus, Rosidawani e Yunus (2019) utiliza quatro tipos distintos de cinzas volantes, afim de determinar a finura dos grãos e a razão ideal de ativador/cinza para o tempo de pega e resistência à compressão de argamassas geopoliméricas. A mistura contém areia, acelerador de pega, hidróxido de sódio e silicato de sódio, alternando as proporções de acelerador/cinza em 0%, 0,5%, 1%, 1,5% e 2%, e fixando a razão água/cinza em 0,4, totalizando cinco misturas com base nas composições que foram diferenciadas, analisando em minutos sua variação de tempo de pega final e inicial. Os resultados constataram que o a finura dos grãos e a relação acelerador/cinza afetam o tempo de pega e resistência à compressão.

Os pesquisadores Nuaklong *et al.* (2019) analisaram as propriedade de tempo de pega, porosidade e absorção de água, resistência à compressão e a resistência ao ataque de ácidos sulfúricos de argamassa geopolimérica. Utilizou-se diferentes proporções entre cinzas volantes de alto e de baixo teor de cálcio para produzir quatro misturas de com proporção de precursor/areia de 1:2,75, substituindo os teores de cinza de alto teor de cálcio por cinza de baixo teor nas proporções de 0%, 25%, 50% e 100%, com razão ativador / precursor de 0,55 e relação NaOH (10M) / Na₂SiO₃ de 1,0. Os resultados foram comparados as amostras moldadas de argamassas de cimento Portland com relação água cimento de 0,50. A mistura de cinzas 50:50 forneceu alta resistência inicial e mostrou excelente potencial em ambiente ácido.

A pesquisa de Al-Basyar, Tjaronge e Amiruddin (2020) tem como objetivo determinar a influência da cinza volante e da cal (hidróxido de cálcio) na resistência à

compressão de argamassas. contendo areia na condição de superfície saturada seca, água e hidróxido de sódio 7 M. As argamassas foram preparadas com as seguintes relações: cinza volante:hidróxido de cálcio de 1:1, cinza:areia de 1:3 e água/ligante de 0,5. Foram moldados corpos de prova cilíndricos medindo 10 x 20 cm, desmoldadas após 24 horas, foram adotados dois métodos de cura, submerso em água e ao ar livre, sendo rompidos aos 3 e 7 dias. Os resultados mostraram que a resistência aumenta com a idade, independentemente do método de cura, para cura em água registrou-se 2,12 e 2,73 MPa e para cura ao ar 1,89 e 2,63 MPa aos 3 e 7 dias, respectivamente.

Com base na literatura, nota-se que argamassas geopoliméricas são usualmente curadas em fornos de temperaturas elevadas. De forma resumida a Tabela 3 apresenta o tempo e temperatura de cura das pesquisas analisadas neste trabalho.

Tabela 3 – Literatura analisada.

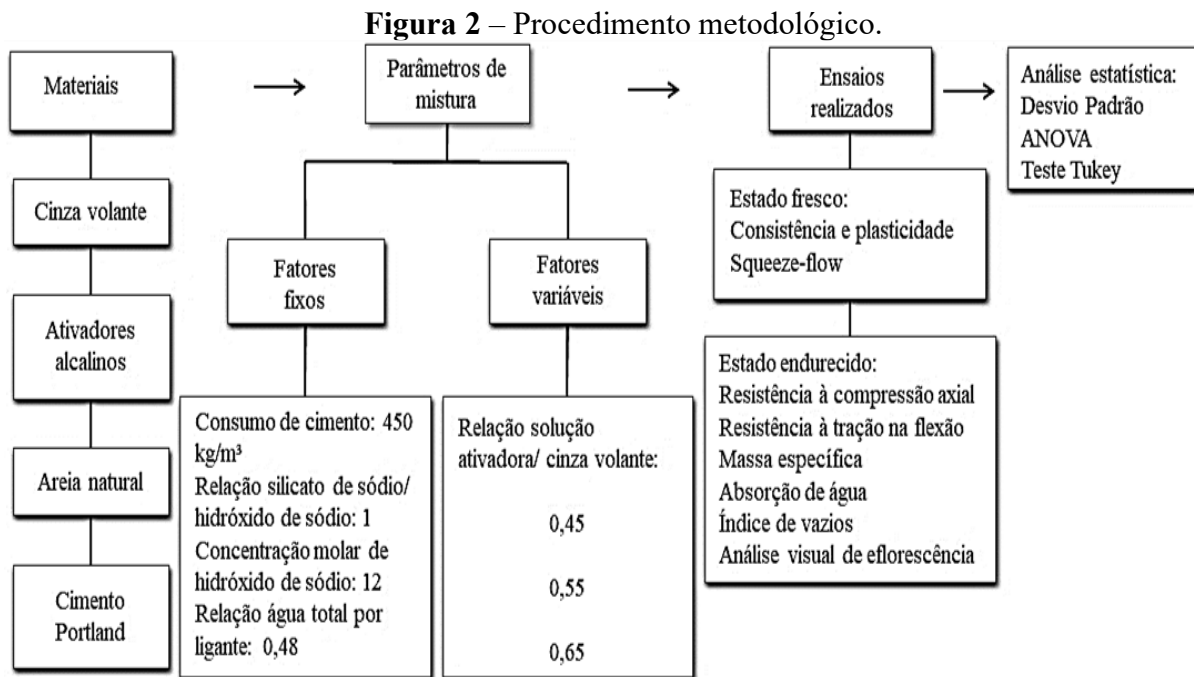
Autor	Temperatura	Tempo de cura
Fernández-Jiménez e Palomo (2003)	85 °C	20 horas
Vargas <i>et al.</i> (2007)	70 °C	12 horas
Vargas <i>et al.</i> (2007)	22 °C	4, 6, 8, 10, 12, 24 e 48 horas, 7 e 28 dias
Atis <i>et al.</i> (2015)	45, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 115 °C	24, 48 e 72 horas
Kotwal <i>et al.</i> (2015)	Ambiente	7 dias
Helmy (2016)	70 °C	6, 12, 18, 24, 30 horas
Saloma <i>et al.</i> (2016)	60 °C	48 horas
Jeyalakshmi <i>et al.</i> (2017)	80 °C	24 horas
Gomaa <i>et al.</i> (2017)	70 °C	24 horas
Gomaa <i>et al.</i> (2017)	Ambiente	7 dias
Dassekpo <i>et al.</i> (2017)	60 °C	7, 14 e 28 dias
Hadi, Al-Azzawi e Yu (2018)	70 °C	24 horas
Kaur, Singh e Kaur (2018)	80 °C	24 horas
Saxena, Kumar e Singh (2018)	80 °C	30 minutos
Cornelis <i>et al.</i> (2019)	Ambiente	28 dias
Al-Basyar, Tjaronge e Amiruddin (2020)	Ambiente	3 e 7 dias

Fonte: Autor (2020).

De acordo com a Tabela 3, poucos trabalhos foram realizados com a temperatura ambiente, pelo fato do seu processo de enrijecimento ser de forma lenta quando comparado ao processo de cura sujeito a altas temperaturas. Deste modo, vale ressaltar que o trabalho em temperatura de cura ambiente torna-se semelhante a aplicação real, visto que a aplicação *in loco* seria limitada a utilização de estufas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os procedimentos experimentais utilizados na pesquisa. Inicialmente foram caracterizados os materiais empregados, seguido da definição dos parâmetros de mistura, ensaios realizados e análise estatística dos dados. A Figura 2 apresenta de forma resumida a metodologia adotada.



Fonte: Autor (2020).

Os procedimentos descritos na Figura 2 foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus do Pici, em Fortaleza – CE. A seguir apresentam-se as características dos materiais utilizados no estudo.

3.1 Materiais

3.1.1 Cinza volante

A cinza volante foi obtida da queima do carvão mineral na Usina Termoelétrica do Pecém, localizada no município de São Gonçalo do Amarante, pertencente a Região Metropolitana de Fortaleza – CE.

A cinza volante coletada foi submetida à secagem em estufa à 105°C±5°C por um período de 24 horas, devido a presença de umidade. Após o período de secagem, observou-se torrões em sua formação conforme a Figura 3.a, desse modo, realizou-se seu destorroamento em moinho de bolas por 30 minutos, resultando sua formação conforme a Figura 3.b,

posteriormente, foi peneirado em malha 150 μm conforme a Figura 3.c. O processo de secagem e peneiramento foram realizados no Laboratório de Solos –DET/UFC e a moagem do material no LMCC/UFC.

Figura 3 – Etapas da preparação da cinza volante: a) após secagem; b) após destorroamento; c) após peneiramento.



Fonte: Autor (2020).

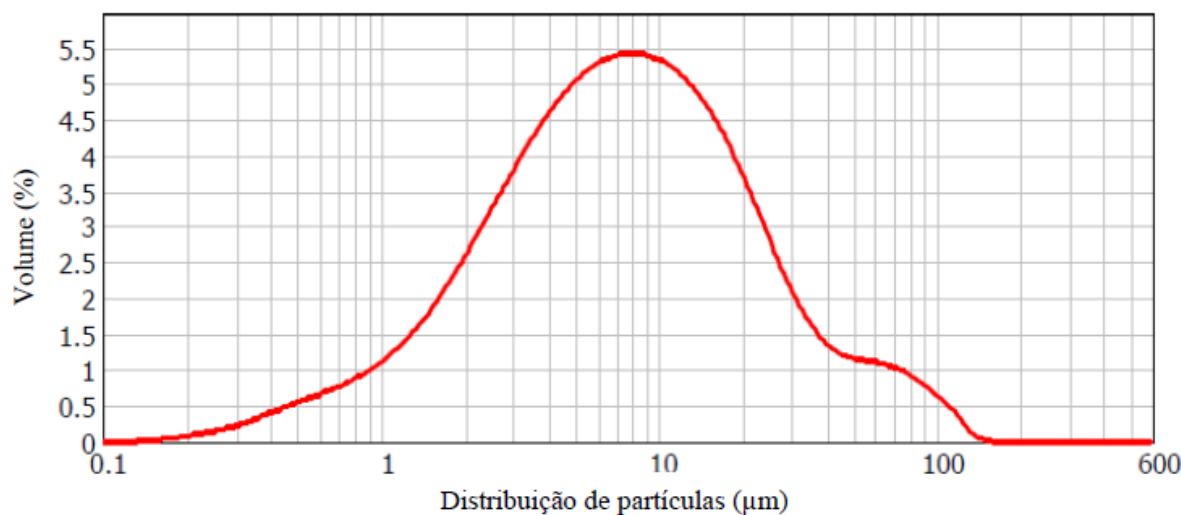
No intuito de identificar os elementos químicos e a composição em óxido da cinza volante foi realizada a técnica de Fluorescência de Raios-X no Laboratório de Raios-X – Departamento de Física/UFC. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos na análise.

Tabela 4 – Composição em óxidos da cinza volante.

Componentes	% de óxidos
SiO ₂	41,49
Al ₂ O ₃	14,49
CaO	9,54
Fe ₂ O ₃	24,95
K ₂ O	4,54
MnO	0,17
SO ₃	0,29
P ₂ O ₃	0,44
TiO ₂	3,26
CuO	0,11
ZnO	0,14
SrO	0,55

Fonte: Costa (2020).

A Figura 4 apresenta a curva granulométrica obtida por granulometria à laser da cinza volante. A Tabela 5 apresenta concentração de partículas por tamanho, dados extraídos da curva granulométrica e a massa específica da cinza volante. O ensaio foi realizado no Laboratório da Cimento Apodi, em Quixeré – CE.

Figura 4 – Distribuição granulométrica da cinza volante.

Fonte: Costa (2020).

Tabela 5 – Características físicas da cinza volante.

Característica	Diâmetro (%)	Partícula
Distribuição granulométrica	D10%	1,612 μm
	D50%	7,376 μm
	D90%	30,506 μm
	Dmédio	13,164 μm
Massa Específica (ABNT NBR 16605:2017)		2,56 g/cm ³

Fonte: Costa (2020).

Na Tabela 4 torna-se possível identificar qual componente químico prevalece na composição da cinza volante. A Figura 4 e Tabela 5 permitem analisar a distribuição granulométrica de forma precisa.

3.1.2 Ativadores alcalinos

Para a preparação da solução ativadora foram utilizados silicato de sódio líquido comercial, da marca Kalim e hidróxido de sódio PA na forma de microperólas da marca Nox, com 97% de pureza. Na Tabela 6 estão especificadas as características da solução de silicato de sódio.

Tabela 6 – Características do silicato de sódio.

Parâmetros	Resultados
Na ₂ O (%)	15,08
SiO ₂ (%)	32,69
Sólidos Totais (%)	47,77
Relação SiO ₂ / Na ₂ O	2,17
Massa Específica (g/cm ³)	1,57
Viscosidade (cp)	1,074

Fonte: Fabricante (2019).

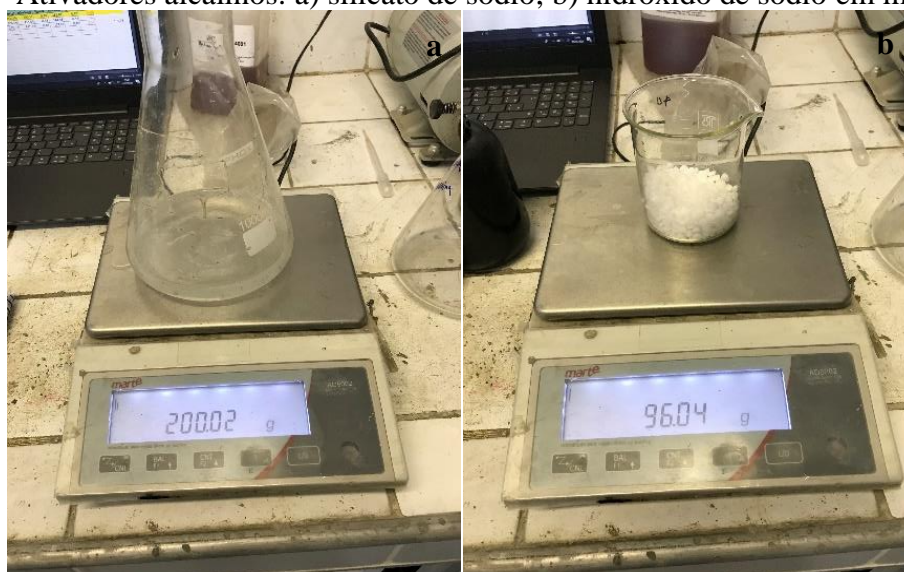
A solução de hidróxido de sódio foi preparada com água destilada na concentração molar 12 M. Na Tabela 7 são apresentadas as características da solução.

Tabela 7 – Características da solução de hidróxido de sódio.

Parâmetros	12M
Sólidos Totais -Na ₂ O (%)	35,5
H ₂ O (%)	64,5
Relação H ₂ O / Na ₂ O	1,81
Massa Específica (g/cm ³)	1,35

Fonte: Fabricante (2019).

As Figuras 5.a e 5.b, mostram as pesagens de silicato de sódio e hidróxido de sódio em micropérolas, respectivamente.

Figura 5 – Ativadores alcalinos: a) silicato de sódio; b) hidróxido de sódio em micropérolas.

Fonte: Autor (2020)

Posteriormente o hidróxido de sódio em micropérolas era diluído em água destilada e mantidas em repouso por um período de 24 horas.

3.1.3 Areia natural

Foi utilizado areia natural de leito de rio. Suas características físicas são representadas na Tabela 8.

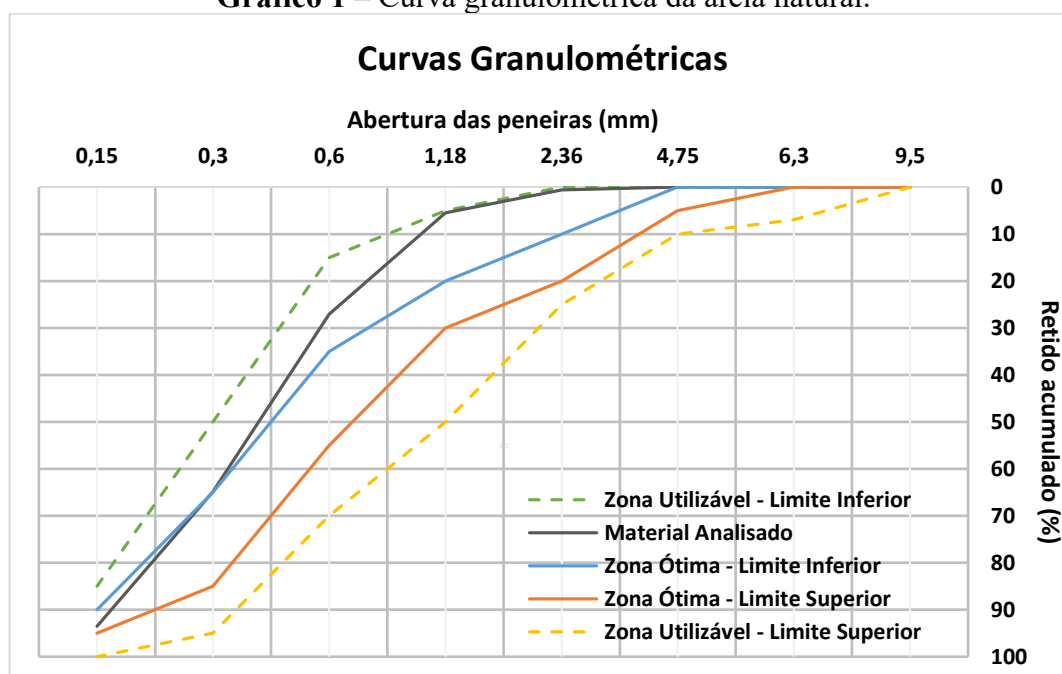
Tabela 8 – Características da areia natural.

Ensaio realizado	Resultado	Norma Vigente
Massa específica	2597 kg/m ³	DNER-ME 194/98
Massa unitária	773 kg/ m ³	ABNT NBR NM 45 (2006)
Teor de material pulverulento	2,36 %	ABNT NBR NM (2003)
Dimensão máxima característica	2,4	ABNT NBR NM 248 (2003)
Módulo de finura	1,92	ABNT NBR NM 248 (2003)

Fonte: Autor (2020)

O gráfico 1 apresenta a curva granulométrica obtida seguindo os parâmetros dispostos na ABNT NBR NM 248 (2003).

Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia natural.



Fonte: Autor (2020).

3.1.4 Cimento Portland

Para a confecção da argamassa de referência o cimento utilizado foi o CP II Z – 32 Poty da fabricante Votorantim, do tipo composto com adição de pozolana. A Tabela 9 apresenta as características químicas, físicas e mecânicas, conforme especificados na ABNT NBR 16697 (2018).

Tabela 9 – Caracterização do cimento.

Propriedades químicas, Físicas e Mecânicas	Especificação
Perda ao fogo – PF	5,61%
Óxido de magnésio – MgO	2,85%
Na ₂ O	0,14%
K ₂ O	0,92%
Trióxido de enxofre – SO ₃	3,33%
Resíduo insolúvel – RI	2,54%
Finura – Resíduo na peneira de 0,075 mm (# 200)	2,60%
Finura – Resíduo na peneira de 0,044 mm (# 325)	10,80%
Área específica – Blaine	3871 cm ² /g
Início de pega	2:43 h:min
Fim de pega	3:34 h:min
Expansibilidade a quente	0,8 mm
Resistência aos 3 dias	19,20 MPa
Resistência aos 7 dias	25,60 MPa
Resistência aos 28 dias	34,00 MPa
Massa Específica (ABNT NBR 16605:2017)	2,76 g/cm ³

Fonte: Fabricante (2020)

Realizada a análise, constata-se que o cimento fornecido pela fabricante, possui um desempenho satisfatório e atende os limites estabelecidos pela norma.

3.2 Métodos de pesquisa

3.2.1 Parâmetros de mistura

A seleção dos parâmetros de mistura baseou-se nos trabalhos de Naghizadeh e Ekolu (2019) e Costa (2020) que indicam os principais fatores que influenciam as propriedades das argamassas geopoliméricas. Por questões de viabilidade de tempo e recursos, as argamassas de cinza volante foram produzidas com os seguintes parâmetros fixos: concentração molar do hidróxido de sódio de 12M, relação silicato de sódio/ hidróxido de sódio igual a 1, consumo de cinza de 450 Kg/m³.

A relação solução ativadora/cinza variou em 0,45, 0,55 e 0,65. O traço da argamassa foi fixado na proporção de 1:3:0,48 (cimento: agregado miúdo: água). No entanto, o total de sólidos da solução ativadora variou de acordo com a relação solução ativadora/ cinza

volante, por esta razão foi realizado o ajuste de água, garantindo a relação água total/ ligante de 0,48, as quantidades adicionadas estão apresentadas na Tabela 10.

Os traços de argamassas foram produzidos no LMCC, conforme a ABNT NBR 7215 (2019).

A Tabela 10 mostra a nomenclatura das misturas de argamassa e suas variáveis de estudo, obtidos com base no trabalho de Costa (2020), bem como o traço de referência.

Tabela 10 – Composições das argamassas.

Misturas	A1	A2	A3	AR
Ativador/cinza	0,45	0,55	0,65	0
Água adicional	45,29%	33,31%	20,98%	100%
Cinza volante	100%	100%	100%	0%
Cimento Portland	0%	0%	0%	100%

Fonte: Costa (2020).

Legenda: A1 – Argamassa 1; A2 – Argamassa 2; A3 – Argamassa 3; AR – Argamassa de referência.

Após a definição dos parâmetros, os materiais foram pesados e misturados em argamassadeira planetária, inicialmente colocando-se o precursor, o ativador e parte da água, depois adicionada a areia e o restante da água.

3.2.2 Ensaios realizados

Os ensaios de avaliação de desempenho no estado fresco foram o ensaio de consistência e plasticidade e *squeeze-flow*. No estado endurecido foram medidas a resistência à tração na flexão, à compressão axial, massa específica, absorção de água e índice de vazios.

A Figura 6 apresenta a execução do ensaio de consistência e plasticidade no estado fresco, medido através de mesa de consistência, conforme a ABNT NBR 13276 (2016), com aplicabilidade em argamassa de revestimento de paredes e tetos.

Figura 6 – Ensaio de consistência.



Fonte: Autor (2020).

A Figura 7 mostra a execução do ensaio de caracterização reológica pelo método de *squeeze-flow*, realizado na Máquina Universal de Ensaios EMIC DL. Esse ensaio é adequado para argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos, conforme prescreve a ABNT NBR 15839 (2010), em máquina de ensaios que exerça um limite máximo de carga a ser atingido no ensaio de 1 kN, devendo ser executado em duas velocidades de deslocamento 0,1 mm/s e 3 mm/s, em corpos de prova distintos no estado fresco e realizados em um intervalo de até 10 minutos após misturado o material.

Figura 7 – Ensaio de caracterização reológica (*Squeeze-flow*).



Fonte: Autor (2020).

Para cada traço foram confeccionados 09 corpos de prova prismáticos, totalizando 36 corpos de prova, em fôrmas de dimensões 4 cm de altura x 4 cm de largura x 16 cm de

comprimento. As mesmas foram limpas e retiradas qualquer saliência em sua superfície, além disso, suas paredes internas foram recobertas com um filme de acetato, com intuito de evitar a corrosão no material metálica e manter a uniformidade superficial do corpo de prova. Nas juntas externas foi utilizado plasticina para evitar qualquer vazamento, conforme demonstrado na Figura 8.a, enquanto a Figura 8.b mostra a etapa de moldagem.

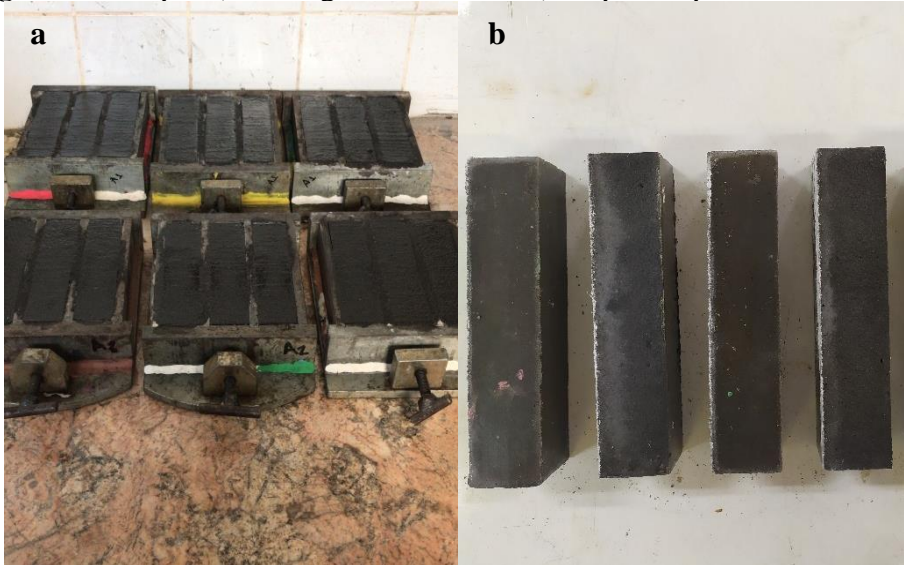
Figura 8 – Etapas da moldagem: a) fôrma prismática; b) moldagem.



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 9.a mostra-se os corpos de prova moldados e na Figura 9.b os corpos de prova enrijecidos e desmoldados.

Figura 9 – Etapa: a) moldagem finalizada; b) corpos de prova desmoldados.



Fonte: Autor (2020).

A cura foi realizada em temperatura ambiente até a data dos ensaios, porém todos os corpos de prova desmoldados aos 7 dias.

A Figura 10 apresenta o momento da execução do ensaio de resistência à tração na flexão, realizado no estado endurecido, conforme a ABNT NBR 13279 (2005).

Figura 10 – Ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Autor (2020).

A Figura 11 mostra o ensaio de resistência à compressão axial. Conforme a ABNT NBR 13279 (2005), este ensaio é realizado utilizando as metades dos corpos de prova do ensaio de flexão, posicionando-as de modo que a face rasada não fique em contato com o dispositivo de apoio e de carga.

Figura 11 – Ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Autor (2020).

A ruptura à tração na flexão e à compressão axial ocorreram nas idades de 1, 7 e 28 dias, com velocidade de aplicação de carga igual a 500 N/s. O ensaio foi realizado na Máquina

Universal de Ensaio EMIC DL com capacidade de 300 kN no Laboratório de Materiais de Construção Civil –LMCC-UFC.

O ensaio de massa específica, absorção de água e índices de vazios foram realizadas conforme a ABNT NBR 9778 (2005).

Aos 28 dias pode-se identificar visualmente a presença de eflorescência nos corpos de prova de argamassa geopolimérica e realizado registros fotográficos de todas as faces das amostras.

3.2.3 *Análise estatística dos dados*

Com o intuito de comprovar a eficiência e confiabilidade dos resultados, foram realizados o cálculo de análise de variância – ANOVA e o teste de múltiplas médias – Tukey com auxílio do *software* Statistica 10, aplicados nos resultados de consistência e plasticidade, resistência à compressão axial e tração na flexão, massa específica, absorção de água e índice de vazios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de desempenho das argamassas geopoliméricas e da argamassa de referência.

4.1 Propriedades no estado fresco

4.1.1 Consistência e Plasticidade

A Tabela 11 apresenta os valores das médias em milímetros de três medidas de espalhamento das argamassas obtidos na mesa de consistência.

Tabela 11 – Resultados de consistência e plasticidade.

Espalhamento (mm)				
Especificação	A1	A2	A3	AR
Medida 1	215	215	218	93
Medida 2	213	213	217	95
Medida 3	216	212	220	102
Média	215	213	218	97

Fonte: Autor (2020).

Os dados da Tabela 11 foram tratados estatisticamente por meio da análise de variância significativa (ANOVA) e teste Tukey, conforme demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise estatística de consistência e plasticidade¹.

Especificação	ANOVA – Significância da variação dos tipos de argamassa	Tukey – Grupos homogêneos
A1	Significativo	A1, A2 e A3
A2		
A3		
AR		

Fonte: Autor (2020).

A ANOVA aponta diferença significativa entre os grupos nos resultados de consistência e plasticidade, no entanto, com a análise complementar da variação de múltiplas médias - teste Tukey, verifica-se que somente a argamassa AR apresenta diferença estatística em relação a A1, A2 e A3, apresentam diferenças nas consistências que não são significativas.

¹ As tabelas das análises estatísticas de consistência e plasticidade estão no Apêndice A deste trabalho.

A Figura 12.a, 12.b, 12.c e 12.d mostra o espalhamento das argamassas A1, A2, A3 e AR, respectivamente.

Figura 12 – Espalhamento das argamassas: a) Argamassa A1; b) argamassa A2; c) argamassa A3; d) argamassa AR.



Fonte: Autor (2020).

Sabe-se que relação água/ligante exerce bastante influência para a trabalhabilidade das argamassas, a relação 0,48 não foi adequada para a argamassa de referência. Contudo, as argamassas geopoliméricas apresentaram melhor desempenho do ponto de vista, devido a presença de silicato e hidróxido de sódio. Nestas, salienta-se a variação do teor de sólidos da solução ativadora (Tabelas 6 e 7), tendo a argamassa A1 como referência, teve um aumento de 22,22% e 44,44% quando aumenta-se a relação solução ativadora/cinza de 0,55 para 0,65, respectivamente, no entanto, não ocorreu alterações significativas no ensaio de consistência e plasticidade.

No estudo de Leong *et al.* (2016), as argamassas à base de cinza volante tiveram uma melhor trabalhabilidade quando aumentada a proporção solução ativadora/cinza, porém, a

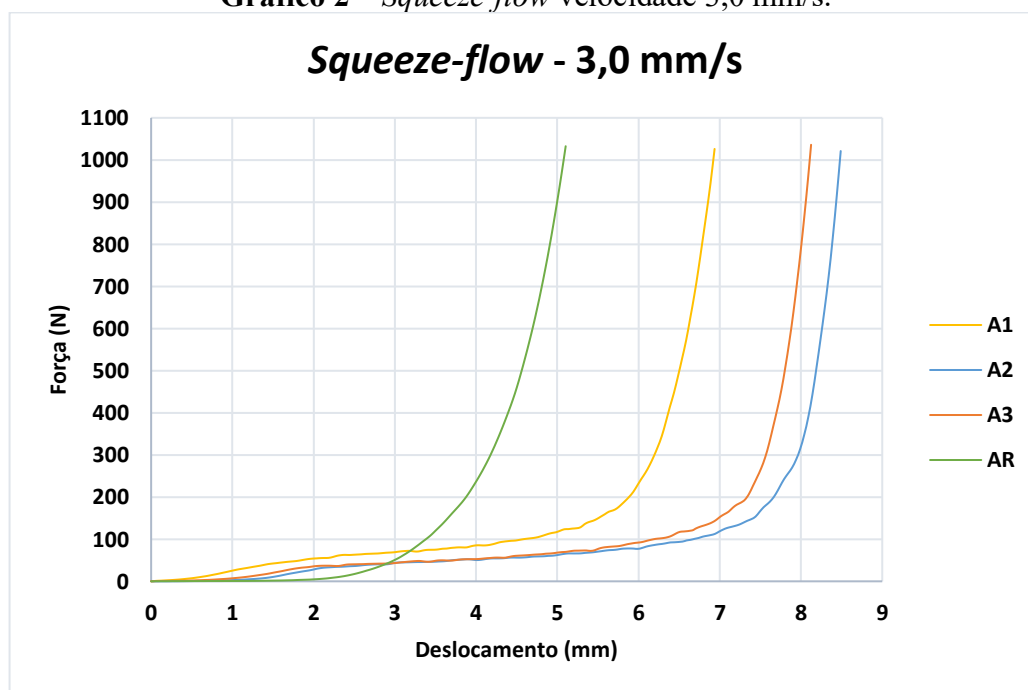
razão entre os ativadores foi variável no estudo, onde constatou-se que o silicato de sódio aumenta a viscosidade da mistura, reduzindo a trabalhabilidade, inversamente, o hidróxido de sódio aumenta a trabalhabilidade, por ter características mais fluidas, vale salientar que as proporções agregados/cinza volante foram fixados.

Para Gomaa *et al.* (2017), a trabalhabilidade depende diretamente das relações de água/cinza volante, ativador/cinza volante e a proporção hidróxido de sódio:silicato de sódio, onde, constatou-se que quando há aumento da relação água/cinza volante, há também um aumento da trabalhabilidade, porém, na análise com água/cinza e hidróxido de sódio/silicato de sódio constantes, o aumento de ativador/cinza diminuiu a trabalhabilidade da argamassa. Cornelis *et al.* (2019) constaram que a trabalhabilidade aumenta conforme a proporção hidróxido de sódio/silicato de sódio e a razão pasta/areia crescem.

4.1.2 Caracterização reológica pelo método de squeeze-flow

O Gráfico 2 apresenta os resultados do *squeeze-flow* realizados na velocidade de 3,0 mm/s, e a Tabela 13 os dados de deslocamento após 1000N.

Gráfico 2 – Squeeze-flow velocidade 3,0 mm/s.



Fonte: Autor (2020).

Tabela 13 – Dados 3,0 mm/s.

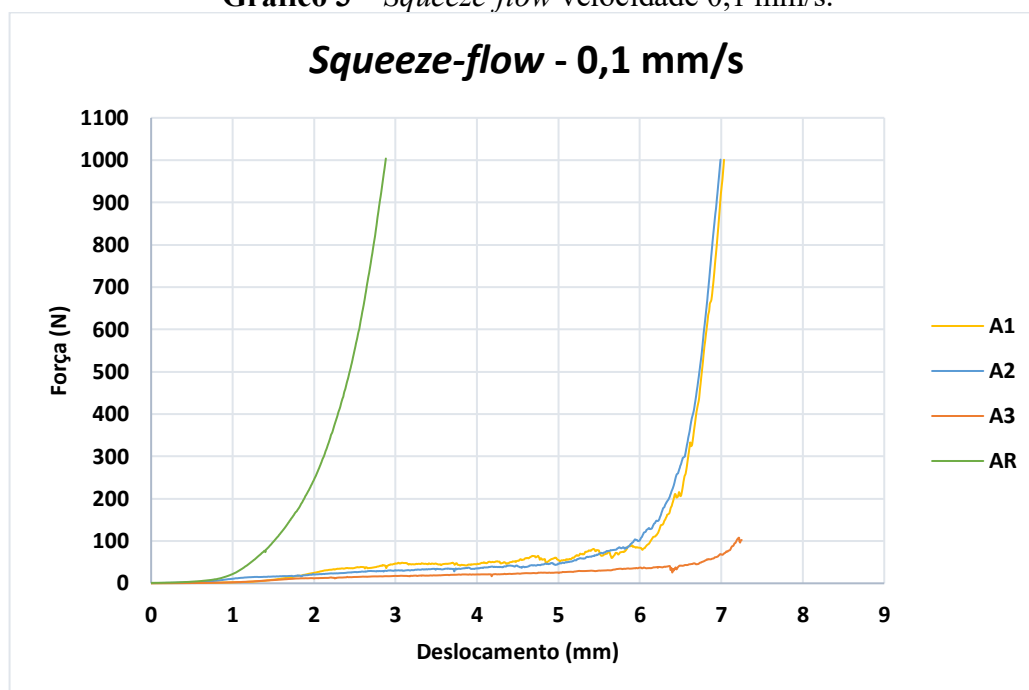
Amostra	Força (N)	Deslocamento (mm)
A1	1026,2	6,93
A2	1021,2	8,49

A3	1036,1	8,12
AR	1032,7	5,10

Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 3 apresenta os resultados do *squeeze-flow* realizados na velocidade de 0,1 mm/s, e a Tabela 14 os dados de deslocamento após 1000N.

Gráfico 3 – Squeeze-flow velocidade 0,1 mm/s.



Fonte: Autor (2020).

Tabela 14 – Dados 0,1 mm/s.

Amostra	Força (N)	Deslocamento (mm)
A1	1000,9	7,03
A2	1001,3	6,99
A3	102,54	7,24
AR	1003,9	2,88

Fonte: Autor (2020).

As curvas das argamassas A1, A2 e A3, inicialmente na velocidade 3,0 mm/s (Gráfico 2), apresentam um espalhamento constante por um determinado período de tempo, gerando grandes deformações com baixos acréscimos de carga e curvas pouco acentuadas, porém, quando comparadas aos resultados de velocidade 0,1 mm/s (Gráfico 3), a força aplicada gera inicialmente curvas quase lineares, isso ocorre por causa do espalhamento lento, havendo mais tempo para o deslocamento das partículas.

Ao atingir as deformações quase máximas, analisadas nos gráficos 2 e 3, em intervalos de cargas de 100 N a 200 N, inicia-se um grande acréscimo de carga e uma menor

deformação, isso se dá pelo fato de grande parte do material ter se espalhado quase que totalmente no disco, dificultando a movimentação das partículas, devido o atrito dos grãos de areia entre a parte inferior e o disco, formando uma estrutura quase estável.

De acordo com Cardoso, Pileggi e John (2017) há três estágios a serem analisados nas curvas de carga *vs.* deslocamento no ensaio de *squeeze-flow*. No primeiro estágio tem-se uma deformação elástica, caracterizada por apresentar deformações lineares, isso ocorrer por estar relacionado a tensão de escoamento do material. O segundo estágio é considerando como uma deformação plástica, resultando em uma curva de deformação radial e de cisalhamento, caracterizada pelo material sofrer grandes deformações sem que haja um aumento significativo das forças, no terceiro estágio denominado de enrijecimento por deformação, a curva passa a aumentar exponencialmente de forma expressiva, aumento as cargas e diminuindo o deslocamento, tornando as forças de atrito predominantes.

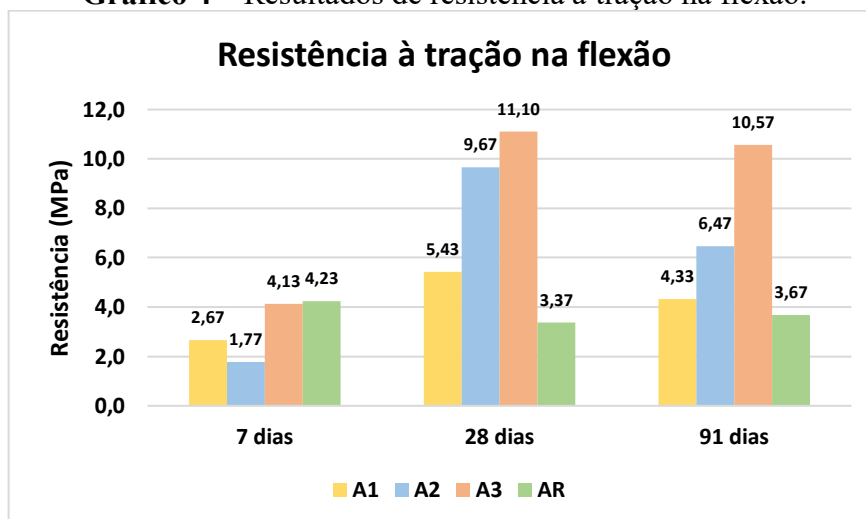
No gráfico 3, a curva da argamassa A3 apresenta-se no estágio de deformação predominantemente plástica até a finalização do ensaio, onde seu comportamento no gráfico deveria ser similar as outras argamassas geopoliméricas, isso pode ter acontecido por um provável erro na operação da prensa, não observado durante a execução do ensaio e percebido durante o tratamento dos dados, portanto, inviabilizando a repetição da medida.

De modo geral, nota-se que as argamassas geopoliméricas apresentaram maiores deformações, quando comparadas a argamassa de referência, implicando na melhor trabalhabilidade dessas argamassas para o traço estudado.

4.2 Propriedades no estado endurecido

4.2.1 Resistência à tração na flexão

O gráfico 4 apresenta a média dos resultados de resistência à tração na flexão aos 7, 28 e 91 dias, os maiores resultados em todas as idades foi da argamassa A3, sendo 10,57 MPa aos 91 dias, os menores resultados foram da argamassa A1 aos 91 dias com 4,33 MPa, respectivamente.

Gráfico 4 – Resultados de resistência à tração na flexão.

Fonte: Autor (2020).

De acordo com a análise estatística apresentado na Tabela 15, na ANOVA, todos os resultados são significativos, nessa análise os grupos diferem entre si. Porém, no teste de Tukey, aos 7 dias a argamassa A2 difere de A3 e AR, aos 28 dias A2 difere somente de AR e aos 91 dias A2 e A3 diferem de A1 e AR. A Tabela 13 mostra os grupos que são considerados estatisticamente iguais.

Tabela 15 – Análise estatística de resistência à tração na flexão².

Especificação	ANOVA – Significância da variação dos tipos de argamassa	Tukey – Grupos homogêneos
A1 – 7 dias	Significativo	A1 e A2 A1, A3 e AR
A2 – 7 dias		
A3 – 7 dias		
AR – 7 dias		
A1 – 28 dias	Significativo	A1 e A2 A1 e AR A2 e A3
A2 – 28 dias		
A3 – 28 dias		
AR – 28 dias		
A1 – 91 dias	Significativo	A1 e AR
A2 – 91 dias		
A3 – 91 dias		
AR – 91 dias		

Fonte: Autor (2020).

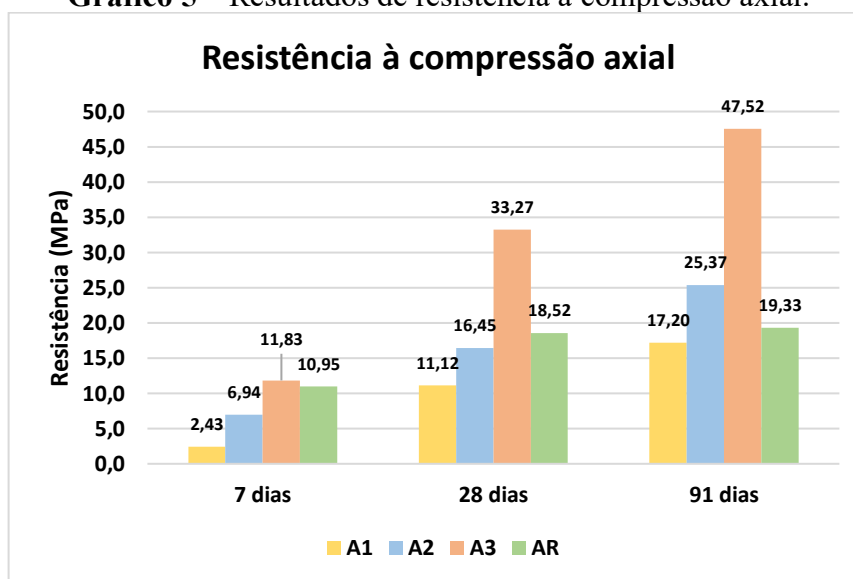
² As tabelas das análises estatísticas de resistência à tração na flexão estão no Apêndice C deste trabalho.

Conforme o Gráfico 4, a argamassa A3 obteve melhores resistências comparada a argamassa de referência AR e as argamassas A1 e A2. Em relação a AR, houve uma resistência inferior aos 7 dias de 2,36%, porém aos 28 e 91 dias houve acréscimo percentual de 229,37% e 188,01%, respectivamente. Em relação as argamassas A1 e A2 o aumento de A3 aos 91 dias foi de 144,11% e 63,36%, respectivamente.

4.2.2 Resistência à compressão axial

O gráfico 5 apresenta a média dos resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias. Os maiores resultados em todas as idades foram da argamassa A3, chegando a 47,52 MPa aos 91 dias. Enquanto, a argamassa A1 apresentou os menores valores, atingindo o máximo de 17,20 MPa aos 91 dias.

Gráfico 5 – Resultados de resistência à compressão axial.



Fonte: Autor (2020).

A análise estatística dos dados do ensaio de resistência à compressão axial encontra-se na Tabela 16. A ANOVA mostra que há diferença significativa entre os grupos, entretanto no teste Tukey, aos 7 dias A1 e A2 diferem de A3 e AR, aos 28 dias A3 difere de A1, A2 e AR e aos 91 dias A2 e A3 diferem de A1 e AR. A Tabela 14 mostra que alguns grupos são considerados homogêneos entre si, sendo assim, considerados estatisticamente iguais.

Tabela 16 – Análise estatística de resistência à compressão axial³.

Especificação	ANOVA – Significância da variação dos tipos de argamassa	Tukey – Grupos homogêneos
A1 – 7 dias	Significativo	A3 e AR
A2 – 7 dias		
A3 – 7 dias		
AR – 7 dias		
A1 – 28 dias	Significativo	A1 e A2 A2 e AR
A2 – 28 dias		
A3 – 28 dias		
AR – 28 dias		
A1 – 91 dias	Significativo	A1 e AR
A2 – 91 dias		
A3 – 91 dias		
AR – 91 dias		

Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 5 demonstra que a argamassa A3 obteve maiores resultados de resistência à compressão axial em relação a argamassa de referência AR e as argamassas A1 e A2. O acréscimo percentual aos 7, 28 e 91 dias foi de 8,03%, 79,64% e 145,87%, respectivamente, quando comparados com AR. Quando comparadas com A1 e A2, nos percentuais aos 91 dias, tem-se um acréscimo de 176,27% e 87,45%, respectivamente.

De acordo com a Tabela 10, a argamassa A3 tem o menor percentual de água adicional para atingir relação água total/ ligante fixa de 0,48, além disso, possui maior teor de sólidos de Na₂O e SiO₂, isso pode justificar o seu melhor desempenho em relação as argamassas A1 e A2, na resistência à compressão axial, assim como, na resistência à tração na flexão.

De acordo com Provis e Van Deventer (2009), a alta resistência à compressão está associada a menor quantidade de água utilizada para produzir geopolímeros à base de cinza volante, ocasionando em uma diminuição do volume de poros, onde os espaços vazios são preenchidos pelos produtos da reação.

O aumento da razão ativador/cinza volante resultou numa maior resistência à compressão, significando um aumento de álcalis e silicatos solúveis, conseqüentemente uma

³ As tabelas das análises estatísticas de resistência à compressão axial estão no Apêndice B deste trabalho.

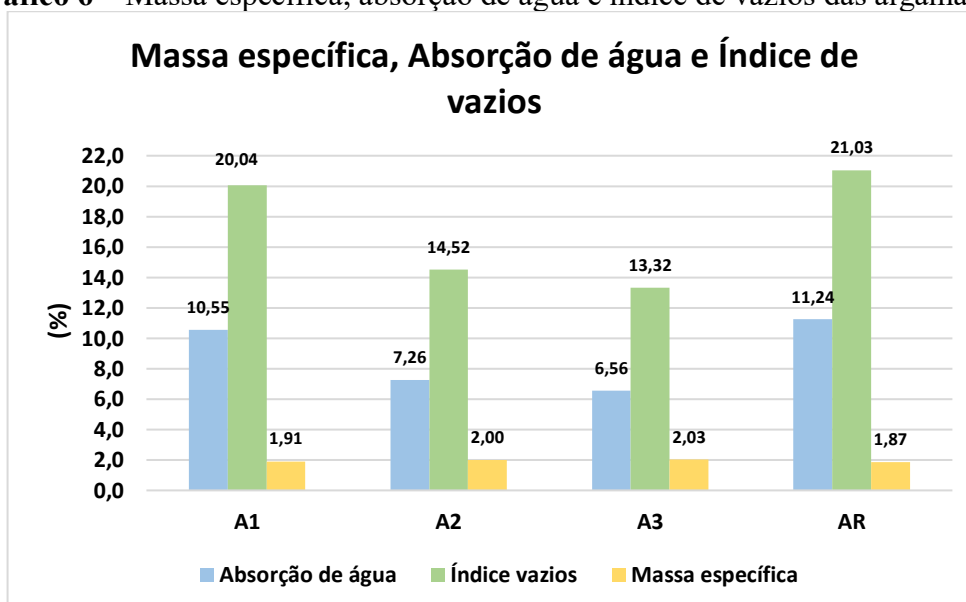
taxa de reação mais alta, constatando-se que tem uma influência significativa na resistência das argamassa à base de cinza volante (LAW *et al.*, 2008).

Segundo Hadi, Al-Azzawi e Yu (2018) para que se possa atingir uma resistência à compressão ideal, cada cinza volante tem uma relação ativador/cinza adequada, pois, a quantidade de finos da cinza volante afetam diretamente o processo de geopolimerização, onde, a diminuição da resistência pode estar relacionado a uma proporção ativador/precursor inferior ao ideal, bem como a quantidade insuficiente e excessiva de ativador alcalino. Para Al Bakri *et al.* (2012) a mudança do fator ativador alcalino, afeta a formação de silício, sódio e água de base, fatores que influenciam diretamente no processo de geopolimerização e na resistência, aumentando a razão $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ e ocasionando em maiores resistências.

4.2.3 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

O gráfico 6 apresenta os resultados referentes ao ensaio de massa específica, absorção de água e índice de vazios das amostras analisadas.

Gráfico 6 – Massa específica, absorção de água e índice de vazios das argamassas.



Fonte: Autor (2020).

Conforme o Gráfico 6, as argamassas geopoliméricas A1, A2 e A3 possuem maior massa específica em relação à argamassa de referência AR, os acréscimos correspondem a 1,96%, 6,78% e 8,42%, respectivamente. Quando comparadas as argamassas geopoliméricas entre si, os traços das argamassas A2 e A3 apresentaram massa específica superior a argamassa A1 em 4,72% e 6,34%, respectivamente.

A absorção de água das argamassas A1, A2 e A3, quando comparadas à AR, apresentam uma redução de 6,14%, 35,40% e 41,62%, respectivamente. O traço A2 e A3, quando comparados com A1, tem-se uma redução de 31,17% e 37,80%, respectivamente.

Com relação aos índices de vazios expostos, o traço A1, A2 e A3, comparando-os com AR, observou-se redução em todos os traços, com percentual de 4,71%, 30,98% e 36,66%, respectivamente. Já entre si, tendo como referência a argamassa A1, o índice de vazios da A2 e A3 são 27,56% e 33,52% menores, respectivamente.

Na análise estatística apresentada na Tabela 17, na ANOVA todos os grupos tiveram variância significativa, contudo no teste de Tukey, na absorção de água e no índice de vazios, a argamassa A3 difere somente da argamassa AR. Nas análises de massa específica A2 e A3 diferem de AR, alguns grupos foram considerados homogêneos, portanto, considerados estatisticamente iguais.

Tabela 17 – Análise estatística massa específica, absorção de água e índice de vazios⁴.

Especificação	Ensaio	ANOVA – Significância da variação dos tipos de argamassa	Tukey – Grupos homogêneos
A1	Absorção de água (%)	Significativo	A1, A2 e A3 A1, A2 e AR
A2			
A3			
AR			
A1	Índice de vazios (%)	Significativo	A1, A2 e A3 A1, A2 e AR
A2			
A3			
AR			
A1	Massa específica (g/cm ³)	Significativo	A1, A2 e A3 A1 e AR
A2			
A3			
AR			

Fonte: Autor (2020).

⁴ As tabelas das análises estatísticas absorção de água, índice de vazios e massa específica estão nos Apêndices D, E e F deste trabalho, respectivamente.

Com base nos resultados vistos no Gráfico 7, a argamassa A3 apresenta as menores taxas de absorção de água e de índice de vazios, corroborando com os melhores valores de resistência à compressão e à tração na flexão.

4.3 Eflorescência

Durante o processo de cura foi identificado a presença de eflorescência nos corpos de prova. Aos 28 dias foi realizado registro fotográfico de todas as faces dos corpos de prova a fim de identificar aquelas com maiores incidências de sais. Os registros de eflorescência nas faces das argamassas A1, A2 e A3 estão presentes nas Figuras 13, 14 e 15, respectivamente.

Figura 13 – Análise visual de eflorescência da argamassa A1: a) topo; b) lateral 1; c) lateral 2; d) base.



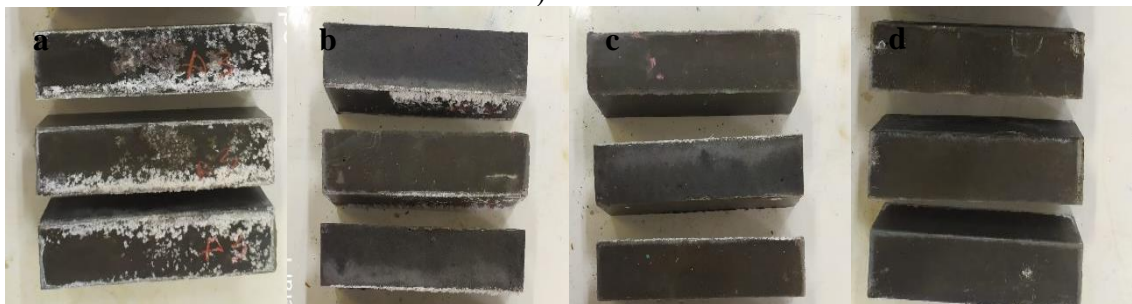
Fonte: Autor (2020).

Figura 14 – Análise visual de eflorescência da argamassa A2: a) topo; b) lateral 1; c) lateral 2; d) base.



Fonte: Autor (2020).

Figura 15 – Análise visual de eflorescência da argamassa A3: a) topo; b) lateral 1; c) lateral 2; d) base.



Fonte: Autor (2020).

De acordo com as imagens das Figuras 13, 14 e 15, o topo dos corpos de prova apresentaram maior ocorrência de eflorescência, isso se dá pela ocorrência de exsudação, quando há maior abertura de poros, conseqüentemente, tornando o caminho mais provável de evaporação da água, direcionando os sais cristalizados para face externa do corpo de prova.

De acordo com Zhuang *et al.* (2016), o fenômeno de eflorescência em geopolímeros à base de cinza volante está diretamente ligado ao tipo de solução ativadora, teor de cálcio e temperatura de cura, onde, a porosidade contribui diretamente na migração do álcalis. Longhi *et al.* (2019) afirma que é uma reação química entre álcalis lixiviados livres com CO₂ em uma estrutura porosa, possibilitando os álcalis livres serem transportados. Provis e Van Deventer (2009), Fernández-Jiménez, Palomo e Revuelta (2009) associam a geopolímeros ativados com uma alta concentração de soluções ativadoras, geralmente hidróxidos, havendo reação do álcali com CO₂ atmosférico, nem sempre é prejudicial, porém em alguns casos aumenta a eflorescência e assim aumentando a fragilidade.

É necessário estudar a eflorescência de modo aprofundado, desde sua estrutura de poros, reações químicas, umidade, método de moldagem e processo de carbonatação. De acordo com Zhuang *et al.* (2016), argamassas geopoliméricas à base de cinza volante apresentam alta resistência mecânica, resistência a íons cloreto, sulfato e ácidos e pouca presença de eflorescência quando no seu processo de moldagem propicia amostras compactas e densas. O uso do material como alternativa ao cimento Portland, se torna necessário a compreensão do fenômeno, com intuito de que não afete a resistência mecânica e durabilidade. Uma alternativa é impermeabilização da superfície da argamassa.

5 CONCLUSÃO

No estado fresco as argamassas geopolimérica apresentaram melhores desempenhos, tanto no ensaio de consistência e plasticidade quanto na caracterização reológico pelo *squeeze-flow*. Conclui-se que as argamassas geopoliméricas apresentaram resultados de espalhamento semelhantes, porém quando comparadas com a argamassa de referência AR, obteve um acréscimo percentual máximo de 125,74%. No teste de *squeeze-flow*, as argamassas A2 e A3 apresentaram maiores deformações para o ensaio nas velocidades de 3mm/s e 0,1mm/s, respectivamente.

No estado endurecido, o desempenho mecânico da argamassa A3, com relação ativador/cinza volante de 0,65, foi superior as demais argamassas. Na resistência à compressão axial obteve um valor máximo de 47,52 MPa aos 91 dias. Em termos percentuais, em relação as argamassas A1 e A2, obteve acréscimos de 176,27% e 87,45%, respectivamente. Quando comparada com a argamassa de referência AR, há um acréscimo aos 91 dias de 145,87%. Na resistência à tração na flexão, A3 atingiu 10,57 MPa, aos 91 dias. comparando-a com as demais argamassas, tem-se um acréscimo de 144,11% em relação a A1 e 63,36% em relação a A2. Quando comparada com AR o valor atinge 188,01%.

A argamassa A1 apresentou maior índice de vazios, conseqüentemente um maior percentual de absorção de água. Por outro lado, a argamassa A3 apresentou um menor índice de vazios e menor absorção de água, contendo uma estrutura com poucos poros. Conclui-se que quanto maior o teor de sólidos contido na solução ativadora e menor teor de água adicional na mistura, menor quantidade de poros no produto final.

Conforme a análise visual, a presença de eflorescência nas faces dos corpos de prova da argamassa A1 foi mais acentuada, principalmente no topo do corpo de prova, face não confinada na forma de moldagem. Portanto, pode-se associar a maior presença de eflorescência à maior porosidade dessa argamassa. De modo geral, argamassas geopoliméricas com os menores índices de vazios, menor absorção de água e maior a resistência mecânica apresentam menor presença de eflorescência ao longo do tempo. Contudo, são necessários estudos mais aprofundados para avaliar esse fenômeno e outras características ligadas a durabilidade do material.

De modo geral, a variação de ativador/cinza volante influencia significativamente nas propriedades do estado endurecido, conforme a análise estatística. Salienta-se ainda que, as argamassas geopoliméricas apresentaram resultados satisfatórios nas propriedades analisadas,

garantindo em seu estado fresco boa trabalhabilidade e apresentando resultado de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão superiores ao da argamassa de referência.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Realizar um estudo sobre o tempo de pega das argamassas geopoliméricas.
- Analisar as fases microestruturais formadas na geopolimerização.
- Avaliar a influência de outros parâmetros de dosagem.
- Avaliar a viabilidade da aplicação na construção civil em paredes de alvenaria e contrapisos.
- Estudar a eflorescência e uma forma de solucionar essa problemática.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 46**: Agregados: Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos: Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- AL-BASYAR, M. H.; TJARONGE, M. W.; AMIRUDDIN, A. A. Feasibility of using slacked lime in producing high calcium fly ash based geopolymer mortar. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 419, n. 1, 2020.
- AL BAKRI, A. M. M. et al. Optimization of alkaline activator/fly ash ratio on the compressive strength of manufacturing fly ash-based geopolymer. **Applied Mechanics and Materials**, v. 110–116, p. 734–739, 2012.

ASTM. American Society for Testing and Materials - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. **C618 - 12a.**, p. 5, 2012.

ATIŞ, C. D. et al. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 673–678, 2015.

AZEVEDO, A.; STRECKER, K. Influência da Composição Química das Soluções Alcalinas Ativadoras na Produção de Geopolímeros a Base de Cinza Volante. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 12, p. 39–46, 2017.

BORGES, P. H. R. et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 153–168, 2014.

BUCHWALD, A.; ZELLMANN, H. D.; KAPS, C. Condensation of aluminosilicate gels-model system for geopolymer binders. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 357, n. 5, p. 1376–1382, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.12.036>.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: manual de utilização. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Downloads/fvm939e.pdf>.

CIENTEC. Quantificação Das Cinzas De Carvão Fóssil Produzidas No Brasil. p. 40, 2016. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2014/06/BT-111.pdf%0Awww.cientec.rs.gov.br>.

CIRINO, M. A. G. Estudo de pastas de cimento portland com adições de cinzas de carvão mineral para uso na cimentação de poços de petróleo. 2016.

CORNELIS, R. et al. Workability and Strength Properties of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. **MATEC Web of Conferences**, v. 258, p. 01009, 2019.

COSTA, H. N. da. **Cimento álcali ativado à base de cinzas do carvão mineral e escória de aciaria**. 2020. (Tese em publicação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Federal do Ceará, 2020.

DASSEKPO, J. B. M. et al. The effects of the sequential addition of synthesis parameters on the performance of alkali activated fly ash mortar. **Results in Physics**, v. 7, p. 1506–1512, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.04.019>.

DAVIDOVITS, J. Properties of Geopolymer Cements. **First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**, p. 131–149, 1994.

DAVIDOVITS, J. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. **The Geopolymere '99 International Conference**, 1999.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Cement a review. **Institut Geopolymer**, n. 0, p. 1–11, 2013.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry & Applications 4th ed. **Institut Geopolymer**, p. Cap. 01, Pag. 4, 2015.

DAVIDOVITS, P. J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs . **Geopolymer 2002 Conference**, p. 1–16, 2002.

DE AZEVEDO, G. S. et al. Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃. **Cerâmica**, v. 63, n. 366, p. 143–151, 2017.

DE AZEVEDO, J. S.; DIAS, D. P.; SOARES, J. C. Efeito da temperatura em resinas geopoliméricas à base de metacaulim ativado por diferentes combinações entre silicatos e hidróxidos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, p. 1–13, 2019.

DIAS, A. D. A. **Estudo da degradação de argamassa Geopolimérica por ácido acético e sulfúrico**. 2008. (Dissertação). Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2008.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, v. 82, n. 18, p. 2259–2265, 2003.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; REVUELTA, D. Alkali activation of industrial by-products to develop new Earth-friendly cements. **11th International Conference on Non-conventional Materials And Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK. CD-ROM proceedings**, n. September, p. 6–9, 2009.

FIRDAUS; ROSIDAWANI; YUNUS, I. The effects of fineness level of fly ash and accelerator on the setting time and the compressive strength of geopolymer mortar. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1376, n. 1, 2019.

FIRDAUS; YUNUS, I.; ROSIDAWANI. Contribution of Fineness Level of Fly Ash to the Compressive Strength of Geopolymer Mortar. **MATEC Web of Conferences**, v. 103, 2017.

GOMAA, E. et al. Fresh properties and compressive strength of high calcium alkali activated fly ash mortar. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 29, n. 4, p. 356–364, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2017.06.001>.

HADI, M. N. S.; AL-AZZAWI, M.; YU, T. Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 41–54, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.092>.

HELMY, A. I. I. Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 54–64, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.007>.

JEYALAKSHMI, R. et al. Fire Related Temperature Resistance of Fly Ash Based

Geopolymer Mortar. **MATEC Web of Conferences**, v. 97, 2017.

KAUR, M.; SINGH, J.; KAUR, M. Synthesis of fly ash based geopolymer mortar considering different concentrations and combinations of alkaline activator solution. **Ceramics International**, v. 44, n. 2, p. 1534–1537, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.071>.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 14, p. 1261–1277, 2007.

KOTWAL, A. R. et al. Characterization and Early Age Physical Properties of Ambient Cured Geopolymer Mortar Based on Class C Fly Ash. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 9, n. 1, p. 35–43, 2015.

LAW, D. W. et al. Durability Properties of Geopolymer Mortars. **11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul, Turkey**, n. May, 2008.

LEONG, H. Y. et al. The effect of different Na₂O and K₂O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 500–511, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.141>.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 9, p. 1341–1349, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>.

LONGHI, M. A. **Álcali-Ativação De Lodo De Caulim Calcinado E Cinza Pesada Com Ativadores Convencionais E Silicato De Sódio Alternativo**. 2015. (Dissertação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

LONGHI, M. A. et al. Efflorescence of alkali-activated cements (geopolymers) and the impacts on material structures: A critical analysis. **Frontiers in Materials**, v. 6, n. April, p. 1–13, 2019.

MALONE, P. G.; RANDALL, C. A. Potential applications of alkali-activated aluminosilicate binders in military operations. **Department Of The Army Assistant Secretary Of The Army (R&D)** [s.l: s.n.]

NAGHIZADEH, A.; EKOLU, S. O. Method for comprehensive mix design of fly ash geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 704–717, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.185>.

NUAKLONG, P. et al. Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate. **Heliyon**, v. 5, n. 9, p. e02513, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02513>.

PAL, S. C.; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 9, p. 1481–1486, 2003.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1323–1329, 1999.

PINTO, A. T. **Sistemas ligante obtidos por ativação alcalina do metacaulino**. 2004. (Tese) Universidade do Minho, 2004.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 47, n. 1–2, p. 11–25, 2014.

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.

PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? a reexamination of existing results. **Chemistry of Materials**, v. 17, n. 12, p. 3075–3085, 2005.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, S. J. **Geopolymers - Structure, processing, properties and industrial applications**. [s.l: s.n.]

RISDANARENI, P.; PUSPITASARI, P.; JANUARTI JAYA, E. Chemical and Physical Characterization of Fly Ash as Geopolymer Material. **MATEC Web of Conferences**, v. 97, 2017.

SALOMA et al. Geopolymer Mortar with Fly Ash. **MATEC Web of Conferences**, v. 78, p. 1–6, 2016.

SANTA, R. A. A. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. (Dissertação). Departamanto de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

SAVASTANO, H.; WARDEN, P. G. Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 517, maio 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504001556>.

SAXENA, S. K.; KUMAR, M.; SINGH, N. B. Influence of alkali solutions on properties of pond fly ash-based geopolymer mortar cured under different conditions. **Advances in Cement Research**, v. 30, n. 1, p. 1–7, 2018.

SEVERO, C. G. S. et al. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 82, p. 55–67, 2013. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/334/276>.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.

SILVA, A. M. et al. Sódio na síntese de geopolímero usando a escória como precursor. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. p. 1–8, 2014.

SILVA, D. A. A. **Avaliação das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto com cinzas da termelétrica do Pecém/CE**. 2017. (Dissertação). Pós- Graduação em Engenharia Civil: Estrutura e Construção Civil. Universidade Federal do Ceará, 2017.

SNIC. **Produção e distribuição nacional de cimento por regiões e estados**. p. 2019, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>.

SNIC. **Relatório Anual do Sindicato Nacional das Indústria de Cimento**. p. 40, 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=50>.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 2, p. 247–276, 2011.

VARGAS, A. S. et al. Cinzas volantes álcali-ativadas com solução combinada de NaOH e Ca(OH)₂. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 12, n. 3, p. 462–469, 2007.

VARGAS, A. S. de. **Cinzas volantes álcali-ativadas para a obtenção de aglomerantes especiais**. 2006. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/88128/000608293.pdf?sequence=1>.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos**. 2018. (Dissertação). Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estrutura e Construção Civil. Universidade Federal do Ceará, 2018.

WIJAYA, A. L.; EKAPUTRI, J. J.; TRIWULAN. Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste. **MATEC Web of Conferences**, v. 138, 2017.

ZHUANG, X. Y. et al. Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 253–267, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>.

APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA CONSISTÊNCIA E PLASTICIDADE

ANOVA

Univariate Tests of Significance for Medidas consistência (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	4140,368	1	4140,368	56459,56	0,000000
Argamassas	317,836	3	105,945	1444,71	0,000000
Error	0,587	8	0,073		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable Medidas consistência (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,07333, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	21,467	0,928344	0,402254	0,000231
2	A2	0,928344		0,186752	0,000231
3	A3	0,402254	0,186752		0,000231
4	AR	0,000231	0,000231	0,000231	

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable Medidas consistência (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,07333, df = 8,0000				
Cell No.	Argamassas	Medidas consistência Mean	1	2
4	AR	9,66667		****
2	A2	21,33333	****	
1	A1	21,46667	****	
3	A3	21,83333	****	

Fonte: Statistica 10 (2020).

APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPRESSÃO AXIAL

7 DIAS

ANOVA

Univariate Tests of Significance for fc 7 dias (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	775,3776	1	775,3776	1391,790	0,000000
Argamassas	166,6187	3	55,5396	99,693	0,000001
Error	4,4569	8	0,5571		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable fc 7 dias (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,55711, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	2,4300	0,000532	0,000231	0,000231
2	A2	0,000532		0,000385	0,000951
3	A3	0,000231	0,000385		0,506601
4	AR	0,000231	0,000951	0,506601	

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable fc 7 dias (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,55711, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	fc 7 dias Mean	1	2	3
1	A1	2,43000		****	
2	A2	6,94000			****
4	AR	10,95000	****		
3	A3	11,83333	****		

Fonte: Statistica 10 (2020).

28 DIAS

ANOVA

Univariate Tests of Significance for fc 28 dias (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	4723,904	1	4723,904	1101,560	0,000000
Argamassas	808,551	3	269,517	62,848	0,000007
Error	34,307	8	4,288		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable fc 28 dias (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 4,2884, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	11,120	16,453	33,267	18,523
2	A2		0,053600	0,000231	0,010243
3	A3	0,000231	0,000250		0,000302
4	AR	0,010243	0,630132	0,000302	

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable fc 28 dias (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 4,2884, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	fc 28 dias Mean	1	2	3
1	A1	11,12000	****		
2	A2	16,45333	****	****	
4	AR	18,52333		****	
3	A3	33,26667			****

Fonte: Statistica 10 (2020).

91 DIAS

ANOVA

Univariate Tests of Significance for fc 91 dias (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	8980,647	1	8980,647	1958,075	0,000000
Argamassas	1734,477	3	578,159	126,058	0,000000
Error	36,692	8	4,586		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable fc 91 dias (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 4,5865, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	17,203	25,370	47,523	19,330
2	A2		0,007087	0,000231	0,634653
3	A3	0,000231	0,000231		0,035253
4	AR	0,634653	0,035253	0,000231	

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable fc 91 dias (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 4,5865, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	fc 91 dias Mean	1	2	3
1	A1	17,20333	****		
4	AR	19,33000	****		
2	A2	25,37000		****	
3	A3	47,52333			****

Fonte: Statistica 10 (2020).

APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA TRACÇÃO NA FLEXÃO

7 DIAS

ANOVA

Univariate Tests of Significance for ff 7 dias (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	122,8800	1	122,8800	278,7448	0,000000
Argamassas	12,8333	3	4,2778	9,7038	0,004833
Error	3,5267	8	0,4408		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable ff 7 dias (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,44083, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	2,6667	1,7667	4,1333	4,2333
2	A2	0,401391	0,401391	0,100889	0,077794
3	A3	0,100889	0,010413	0,010413	0,008234
4	AR	0,077794	0,008234	0,997651	0,997651

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable ff 7 dias (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,44083, df = 8,0000				
Cell No.	Argamassas	ff 7 dias Mean	1	2
2	A2	1,766667		****
1	A1	2,666667	****	****
3	A3	4,133333	****	
4	AR	4,233333	****	

Fonte: Statistica 10 (2020).

28 DIAS

ANOVA

Univariate Tests of Significance for ff 28 dias (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	655,6408	1	655,6408	148,5030	0,000002
Argamassas	116,8892	3	38,9631	8,8252	0,006437
Error	35,3200	8	4,4150		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable ff 28 dias (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 4,4150, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	5,4333	0,140734	0,043518	0,641143
2	A2	0,140734	9,6667	0,836537	0,026104
3	A3	0,043518	0,836537	11,100	0,008688
4	AR	0,641143	0,026104	0,008688	3,3667

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable ff 28 dias (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 4,4150, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	ff 28 dias Mean	1	2	3
4	AR	3,36667	****		
1	A1	5,43333	****	****	
2	A2	9,66667		****	****
3	A3	11,10000			****

Fonte: Statistica 10 (2020).

91 DIAS

ANOVA

Univariate Tests of Significance for ff 91 dias (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	470,0008	1	470,0008	1116,834	0,000000
Argamassas	87,0825	3	29,0275	68,976	0,000005
Error	3,3667	8	0,4208		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable ff 91 dias (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,42083, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	4,3333	0,016169	0,000233	0,610890
2	A2	0,016169	6,4667	0,000438	0,003417
3	A3	0,000233	0,000438	10,567	0,000231
4	AR	0,610890	0,003417	0,000231	3,6667

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable ff 91 dias (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,42083, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassas	ff 91 dias Mean	1	2	3
4	AR	3,66667	****		
1	A1	4,33333	****		
2	A2	6,46667		****	
3	A3	10,56667			****

Fonte: Statistica 10 (2020).

APÊNDICE D – ABSORÇÃO DE ÁGUA

ANOVA

Univariate Tests of Significance for Absorção de água (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	895,6224	1	895,6224	363,0019	0,000000
Argamassa	41,2090	3	13,7363	5,5674	0,023288
Error	19,7381	8	2,4673		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable Absorção de água (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 2,4673, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassa	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	9,4933	0,364762	0,180312	0,552290
2	A2	0,364762		0,945176	0,057372
3	A3	0,180312	0,945176		0,026845
4	AR	0,552290	0,057372	0,026845	

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable Absorção de água (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 2,4673, df = 8,0000				
Cell No.	Argamassa	Absorção de água Mean	1	2
3	A3	6,56000	****	
2	A2	7,26000	****	****
1	A1	9,49333	****	****
4	AR	11,24333		****

Fonte: Statistica 10 (2020).

APÊNDICE E – ÍNDICE DE VAZIOS

ANOVA

Univariate Tests of Significance for Índice de vazios (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	3383,185	1	3383,185	483,0396	0,000000
Argamassa	112,229	3	37,410	5,3412	0,025902
Error	56,032	8	7,004		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable Índice de vazios (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error. Between MS = 7,0039, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassa	{1}	{2}	{3}	{4}
1	A1	18,280	14,523	13,323	21,037
2	A2		0,36601	0,17868	0,60134
3	A3		0,36601	0,94254	0,06527
4	AR		0,17868	0,94254	0,03005

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable Índice de vazios (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error. Between MS = 7,0039, df = 8,0000				
Cell No.	Argamassa	Índice de vazios Mean	1	2
3	A3	13,3233	***	
2	A2	14,5233	***	***
1	A1	18,2800	***	***
4	AR	21,0366		***

Fonte: Statistica 10 (2020).

APÊNDICE F – MASSA ESPECÍFICA

ANOVA

Univariate Tests of Significance for Massa específica (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	46,17763	1	46,17763	26899,59	0,000000
Argamassa	0,04403	3	0,01468	8,55	0,007072
Error	0,01372	8	0,00172		

Fonte: Statistica 10 (2020).

Teste Tukey (comparação múltiplas de médias)

Tukey HSD test; variable Massa específica (Spreadsheet1) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,00172, df = 8,0000					
Cell No.	Argamassa	{1}	{2}	{3}	{4}
		1,9400	2,0033	2,0300	1,8733
1	A1		0,31083	0,10749	0,27438
2	A2	0,31083		0,85792	0,02070
3	A3	0,10749	0,85792		0,00743
4	AR	0,27438	0,02070	0,00743	

Fonte: Statistica 10 (2020).

Tukey HSD test; variable Massa específica (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00172, df = 8,0000				
Cell No.	Argamassa	Massa específica Mean	1	2
4	AR	1,873333		****
1	A1	1,940000	****	****
2	A2	2,003333	****	
3	A3	2,030000	****	

Fonte: Statistica 10 (2020).