

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Aedjota Matos de Jesus

**Desenvolvimento de peças de concreto
álcali-ativado para pavimentação de
passeio a partir de lodo de Estação de
Tratamento de Água**

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Tese orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço
Tese coorientada pelo Professor Dr. Alisson Clay Rios da Silva

Belém – Pará – Brasil

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Aedjota Matos de Jesus

Desenvolvimento de peças de concreto álcali-ativado para pavimentação de passeio a partir de lodo de Estação de Tratamento de Água

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção de título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coorientador: Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva

Belém – Pará – Brasil

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

J58d Jesus, Aedjota Matos de.
Desenvolvimento de peças de concreto álcali-ativado
para pavimentação de passeio a partir de lodo de Estação
de Tratamento de Água / Aedjota Matos de Jesus. — 2023.
169 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coorientador(a): Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2023.

1. Geopolímero. 2. Avaliação do ciclo de vida. 3.
Concreto álcali-ativado. 4. Pegada de carbono. I. Título.

CDD 624



DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS DE CONCRETO ÁLCALI-ATIVADO PARA PAVIMENTAÇÃO DE PASSEIO A PARTIR DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

AUTOR:

AEDJOTA MATOS DE JESUS

TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 27 / 06 / 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
MARCELO DE SOUZA PICANÇO
Data: 27/06/2023 09:40:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br ALISSON CLAY RIOS DA SILVA
Data: 27/06/2023 12:07:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Membro Externo (UFPA)

Mateus Antonio Nogueira Oliveira:07735649690
Assinado de forma digital por Mateus Antonio Nogueira Oliveira:07735649690
Dados: 2023.06.27 11:25:25 -03'00'

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO
Data: 27/06/2023 11:14:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Interno (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO DE SOUZA PICANÇO
Data: 27/06/2023 09:41:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à Universidade Federal do Pará pela acolhida nesta trajetória, proporcionando um ambiente propício para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

À minha esposa, Naiara Matos Gomes da Silva, sou imensamente grato por acreditar em mim ao longo desta jornada. Sua participação ativa, auxiliando nos ensaios e experimentos, e seu apoio constante nas minhas decisões foram fundamentais. Obrigado, meu amor, por estar ao meu lado!

Ao meu pai, Antônio Edmilson de Jesus, expresso minha gratidão por tudo o que ele fez e ainda faz por mim. Obrigado, meu querido pai!

Ao professor e orientador Dr. Marcelo de Souza Picanço por suas valiosas contribuições e por ter depositado confiança na ideia desta pesquisa. Além disso, agradeço por confiar constantemente minhas habilidades e me incentivar a alcançar resultados além das minhas expectativas. Muito obrigado, professor Marcelo, por seu apoio contínuo e por ser um mentor excepcional nesta jornada acadêmica!

Ao professor coorientador Dr. Alisson Clay Rios da Silva, expresso minha profunda gratidão por sua constante acolhida desde o primeiro momento. Agradeço por abrir as portas do laboratório e por incentivar a pesquisa, proporcionando um ambiente propício para o desenvolvimento deste trabalho. Desejo sinceramente que essa atitude acolhedora e colaborativa continue a ser um marco de sua carreira profissional. Muito obrigado, professor Alisson, por seu apoio inestimável e por contribuir significativamente para o meu crescimento como pesquisador.!

Ao professor Dr. Luiz Maurício Furtado pelos valiosos ensinamentos sobre construções sustentáveis, que não apenas enriqueceram o desenvolvimento de um dos capítulos deste trabalho, mas também proporcionaram motivação e novas perspectivas de pesquisa. Sua expertise e compromisso com a sustentabilidade foram verdadeiramente inspiradores. Muito obrigado, professor Luiz Maurício, por sua generosidade intelectual e pelo impacto positivo que você teve neste trabalho.

À professora Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro, agradeço pelo apoio prestado à pesquisa, pelas valiosas contribuições ao longo deste estudo e pela sua disposição em ajudar. Obrigado, professora Luciana, por ser um verdadeiro exemplo de pesquisadora e professora!

Aos amigos que fiz na UFPA: Sabino Alves de Aguiar Neto, Luis Felipe Alencar Brandão, Lucas Rezende Almeida, Diogo Pontes de Queiroz e Mario Henrique Moreira de Moraes. Suas ajudas inestimáveis, momentos de descontração e compartilhamento de conhecimentos foram fundamentais ao longo dessa jornada. A amizade e parceria de vocês completaram essa experiência ainda mais significativa e vivida. Muito obrigado, meus amigos, por estarem ao meu lado nesta jornada.

Ao meu amigo Pietro Maria Silva Rossi, agradeço por seu por seu interesse contínuo e preocupação em relação a mim e minha pesquisa. Agradeço por estar sempre disponível para ouvir minhas ideias, compartilhar insights valiosos e oferecer palavras de incentivo. Obrigado, meu amigo!

Ao Instituto Federal de Rondônia (IFRO), expresso minha profunda gratidão, especialmente à professora Daniela Giovanini Manuel Pires e ao Técnico de Laboratório Iraquitã José do Nascimento Simões. Agradeço por permitirem o uso do laboratório e por fornecerem todo o apoio necessário para a realização desta pesquisa.

À professora Dra. Virginia Giacon, meu agradecimento por viabilizar os ensaios no laboratório de Materiais (LabMat) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Sua dedicação e apoio foram fundamentais para que os experimentos desta pesquisa pudessem ser realizados com sucesso.

Enfim, a todas as pessoas e colegas que direta ou indiretamente colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho, expresso minha profunda gratidão. Seu apoio e contribuições foram de valor inestimável.

RESUMO

JESUS, Aedjota Matos. **Desenvolvimento de peças de concreto álcali-ativado para pavimentação de passeio a partir de lodo de Estação de Tratamento de Água**. 2023. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

Atualmente, é evidente a tendência no desenvolvimento de pesquisas sobre materiais sustentáveis, visando reduzir os impactos ambientais causados pela indústria da construção. Dentre esses materiais, destacam-se os álcali-ativados, também conhecidos como cimentos álcali-ativados (CAAs). Geralmente, eles são produzidos a partir de uma mistura de dois componentes: precursor sólido e ativador alcalino. Com o intuito de promover a sustentabilidade, resíduos podem ser utilizados tanto como precursores quanto como ativadores alcalinos, a fim de reduzir o impacto ambiental decorrente da produção desses cimentos. Entretanto, são limitados os estudos sobre a durabilidade e o ciclo de vida dos cimentos álcali-ativados obtidos a partir de resíduos como precursor e ativador alcalino. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo desenvolver blocos de peças de concreto álcali-ativado para pavimentação, utilizando a substituição parcial de lodo calcinado de Estação de Tratamento de Água (LETA) por metacaulim. Além disso, a pegada de carbono associada à produção das peças de concreto foi avaliada. Para alcançar os objetivos, foram utilizados LETA da cidade de Porto Velho/RO e o metacaulim como precursores. Para ativação alcalina, foram utilizados dois ativadores: convencional e alternativo. O ativador alcalino convencional foi obtido pela mistura de hidróxido de sódio (NaOH) com silicato de sódio, enquanto o ativador alcalino alternativo foi produzido a partir da dissolução de sílica ativa em solução de NaOH. O CAA produzido foi utilizado no desenvolvimento de peças de concreto, que foram avaliadas em função das suas propriedades físicas, mecânica e de durabilidade, além de ser avaliado quanto a emissão de CO₂-eq. Com este estudo, espera-se contribuir para o avanço na utilização de resíduos para a produção de materiais sustentáveis na indústria da construção civil.

Palavras-chaves: Geopolímero. Avaliação do ciclo de vida. Concreto álcali-ativado. Pegada de carbono.

ABSTRACT

JESUS, Aedjota Matos. **Development of alkali-activated concrete pieces for sidewalk paving using water treatment plant sludge**. 2023. 169 f. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Civil Engineering Graduate Program, Federal University of Pará, Belém, 2023.

Currently, there is a clear trend in the development of research on sustainable materials, aiming to reduce the environmental impacts caused by the construction industry. Among these materials, alkali-activated materials, also known as alkali-activated cements (AACs), stand out. Generally, they are produced from a mixture of two components: solid precursor and alkali activator. In order to promote sustainability, waste materials can be used both as precursors and alkali activators, in order to reduce the environmental impact resulting from the production of these cements. However, there is a limited amount of studies on the durability and life cycle of alkali-activated cements obtained from waste materials as precursors and alkali activators. In this regard, the present study aims to develop blocks of alkali-activated concrete pieces for pavement, using partial replacement of calcined sludge from a Water Treatment Plant (WTP) with metakaolin. Additionally, the carbon footprint associated with the production of the concrete pieces was evaluated. To achieve the objectives, WTP sludge from the city of Porto Velho/RO and metakaolin were used as precursors. For alkali activation, two activators were used: conventional and alternative. The conventional alkali activator was obtained by mixing sodium hydroxide (NaOH) with sodium silicate, while the alternative alkali activator was produced by dissolving silica fume in NaOH solution. The produced AACs was used in the development of concrete pieces, which were evaluated based on their physical, mechanical, and durability properties, as well as their CO₂-eq emissions. With this study, it is expected to contribute to the advancement of using waste materials for the production of sustainable materials in the construction industry.

Keywords: Geopolymer. Life cycle assessment. Alkali-activated concrete. Carbon footprint.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al_2O_3	Alumina ou óxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância
BaOH	Hidróxido de bário
CA	Concreto álcali-ativado obtido a partir de ativador alcalino alternativo
CAA	Cimento álcali-ativado
CC	Concreto álcali-ativado obtido a partir de ativador alcalino convencional
CCAA	Concreto de cimento álcali-ativado
CeSiO_3	Silicato de cério
ETA	Estação de Tratamento de Água
K_2CaO_3	Carbonato de sódio
K_2SiO_3	Silicato de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
LiOH	Hidróxido de lítio
LiSiO_3	Silicato de lítio
MAA	Material álcali-ativado
MK	Metacaulim
Na_2SiO_3	Silicato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
SiO_2	Sílica ou óxido de silício

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2 PROBLEMA.....	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1 Objetivo geral.....	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
1.5 DELIMITAÇÕES.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 INTRODUÇÃO	17
2.2 METODOLOGIA.....	18
2.3 CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO	18
2.3.1 Precursores	20
2.3.2 Ativadores alcalinos	27
2.3.3 Reação de álcali-ativação	31
2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	34
2.4.1 Contexto e definições	34
2.4.2 Metodologia da avaliação do ciclo de vida	36
2.4.3 Ciclo de vida dos cimentos álcali-ativados	38
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
3 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS	42
3.1 INTRODUÇÃO	42
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.2.1 Materiais	43
3.2.2 Planejamento experimental de dosagem dos cimentos álcali-ativados.....	47
3.2.3 Preparo das pastas de cimento álcali-ativado	49
3.2.4 Ensaios de caracterização	51
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.3.1 Caracterização dos materiais.....	51
3.3.2 Caracterização dos cimentos álcali-ativados.....	56

3.3.3	Avaliação estatística da dosagem dos cimentos álcali-ativados.....	68
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
4	INFLUÊNCIA DO ATIVADOR ALCALINO NAS PROPRIEDADES DOS CAAS.	73
4.1	INTRODUÇÃO	73
4.2	METODOLOGIA.....	75
4.2.1	Materiais	75
4.2.2	Planejamento experimental.....	77
4.2.3	Ensaio de caracterização	78
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.3.1	Tempo de pega.....	79
4.3.2	Massa específica	81
4.3.3	Absorção de água, índice de vazios e massa específica real	81
4.3.4	Resistência à compressão	83
4.3.5	Durabilidade.....	85
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5	CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO ÁLCALI-ATIVADOS	91
5.1	INTRODUÇÃO	91
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	92
5.2.1	Materiais	92
5.2.2	Planejamento experimental de dosagem do concreto de cimento álcali-ativado.....	94
5.2.3	Preparo do concreto de cimento álcali-ativado.....	95
5.2.4	Ensaio de caracterização das peças de concreto	97
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
5.3.1	Caracterização dos agregados	98
5.3.2	Caracterização dos concretos álcali-ativados	102
5.3.3	Caracterização das peças de concretos álcali-ativados	105
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
6	PEGADA DE CARBONO DAS PEÇAS DE CONCRETO	113
6.1	INTRODUÇÃO	113
6.2	METODOLOGIA.....	114
6.2.1	Definição de objetivo.....	115
6.2.2	Definição de escopo	115
6.2.3	Requisitos dos dados.....	117

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	120
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	125
7 CONCLUSÃO.....	126
REFERÊNCIAS	129
APÊNDICES	143
APÊNDICE A: PROGRAMA DOS ENSAIOS CARACTERIZAÇÃO.....	143
APÊNDICE B: RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTÁTISTICAS DA SEÇÃO 4	155
APÊNDICE C: RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTÁTISTICAS DA SEÇÃO 5	157
APÊNDICE D: MEMÓRIA DE CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO	161

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A indústria da construção civil vem sendo motivada a adotar soluções inteligentes que visam atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos na Agenda 2030 pela Organização das Nações Unidas (ONU). Uma dessas soluções é a redução das emissões de gases do efeito estufa, cuja produção do cimento Portland é a que mais contribui. Soomro, Tam e Evangelista (2023) apontam que a produção de uma tonelada de cimento Portland gera cerca de 0,79 tonelada de CO₂.

Em 2019, estima-se que foram produzidos 4,1 bilhões de toneladas de cimento Portland em todo o mundo, o que resultou na liberação de aproximadamente 3,24 bilhões de toneladas de CO₂ na atmosfera (MISHRA; SARSAIYA, GUPTA, 2022; SOOMRO; TAM; EVANGELISTA, 2023). Ademais, espera-se que a produção anual de cimento cresça cerca de 50% até 2050, o que terá um impacto significativo no aumento das emissões de gases do efeito estufa (BENHELAL; SHAMSAEI; RASHID, 2021).

Neste contexto, a sustentabilidade na construção civil pode ser alcançada de três maneiras diferentes. A primeira delas é por meio da redução no consumo de energia bruta, aprimorando, por exemplo, a eficiência energética das usinas industriais de produção de cimento. A segunda maneira é por meio da redução das emissões poluentes, o que pode ser alcançado por meio do uso de tecnologias de captura de CO₂. Por fim, a terceira maneira é por meio da diminuição do consumo de recursos naturais não renováveis, como a redução da relação clínquer/cimento ou o uso de materiais suplementares (COPPOLA *et al.*, 2018a; POUDYAL; ADHIKARI, 2021).

Entretanto, a sustentabilidade na construção civil pode ser alcançada por meio do uso de cimentos alternativos, como os cimentos álcali-ativados (CAAs). Esses cimentos possuem propriedades tecnicamente compatíveis com o cimento Portland, como elevada resistência mecânica e durabilidade. Além disso, a produção de CAAs emite uma quantidade significativamente menor de CO₂ na atmosfera e demanda um consumo de energia menor, quando comparado com a produção do cimento Portland. Essas características tornam os CAAs uma opção mais sustentável para a indústria da construção civil (PROVIS, 2017; WU *et al.*, 2019; GÖKÇE; TUYAN; NEHDI, 2021).

A sustentabilidade dos CAAs é ainda mais relevante pelo fato de ter a capacidade incorporar resíduos em seu processo de produção. Apesar de o metacaulim ser o principal precursor para produção de CAAs (ABABNEH; MATALKAH; AQEL; 2020), diversos resíduos podem ser utilizados, como os provenientes de termoeletricas (BAJPAI *et al.*, 2020), de siderúrgicas (MEHTA *et al.*, 2020), de processamento de minérios (HERTEL; PONTIKES, 2020), da agroindústria (AKBAR *et al.*, 2021), de sólido urbano (CHEN *et al.*, 2018), de tratamento de água (GERALDO; FERNANDES; CAMARINI, 2017; JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; BOURZIK *et al.*, 2022), entre outros (AMIN *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2019).

1.2 PROBLEMA

Os CAAs podem ser uma alternativa ambientalmente competitiva ao cimento Portland, especialmente no que diz respeito às emissões de CO₂ no meio ambiente. Todavia, a sustentabilidade de qualquer produto, processo ou serviço somente pode ser atestada por meio de análise técnico-científica, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O ACV é uma ferramenta importante para o desenvolvimento sustentável, por permitir a identificação de pontos críticos no ciclo de vida de um produto, bem como a adoção de medidas para reduzir os impactos ambientais e melhorar o desempenho econômico e social.

Avaliações do ciclo de vida de CAAs, bem como de produtos derivados aplicados à construção civil, mostram esse material reduz potencial de aquecimento global em comparação com o cimento Portland. Todavia, o ativador alcalino impacta significativamente a sustentabilidade do material. Isso ocorre pelo fato do ativador alcalino, que convencionalmente é produzido a partir de hidróxido de sódio e silicato de sódio, demanda elevado consumo de energia e emite gases de efeito estufa durante sua produção (WEIL; DOMBROWSKI; BUCHWALD, 2009; SALAS *et al.*, 2018; BAJPAI *et al.*, 2020).

Uma solução para minimizar o impacto do ativador alcalino no ciclo de vida dos CAAs é o uso de ativadores alternativos produzidos a partir de resíduos. Pesquisas apontam que CAAs desenvolvidos com ativadores alcalinos derivados de resíduos possuem propriedades mecânicas semelhantes aos CAAs produzidos com ativadores convencionais (MENDES *et al.*, 2020; RATHOD; CHIPAGIRI; RALEGAONKAR; 2023).

No entanto, apesar das especulações sobre o impacto do uso de ativador alcalino alternativo no ciclo de vida do de CAAs, ainda não foram desenvolvidos estudos que efetivamente avaliem os impactos ambientais deste produto. Portanto, questiona-se: cimentos álcali-ativados produzidos a partir de ativador alcalino alternativo possuem menor impacto ambiental que os produzidos a partir de ativador alcalino convencional?

Além disso, a literatura também questiona sobre a durabilidade dos produtos álcali-ativados resultantes do uso de ativadores alternativos, sendo necessárias mais pesquisas e investigações sobre o desempenho dos concretos quando expostos a ciclos de saturação em água e secagem (MENDES *et al.*, 2020). Portanto, este estudo também se propõe a investigar essa questão.

Neste sentido, este estudo se propõe a responder a essas questões. Foi realizada uma avaliação do ciclo de vida do CAA produzido a partir de um ativador alcalino alternativo, bem como foi avaliada a durabilidade das peças de concreto expostas a ciclos de saturação e secagem.

1.3 JUSTIFICATIVA

Ainda existem diversos obstáculos que dificultam a aplicação dos materiais álcali-ativados na construção civil, especialmente no cenário nacional. Hertel e Pontikes (2020), agrupam esses obstáculos em quatro grupo: técnicos, econômicos, ambientais e legislativo.

A análise técnica mostra que ainda é necessário realizar pesquisas que se concentrem na produção de protótipos, a fim de avaliar se tais amostras podem suportar os requisitos de um material de construção em escala real. Apesar dos diversos estudos realizados com resultados satisfatórios sobre materiais alcali-ativados, a maioria ainda é desenvolvida em escala de laboratório (LUUKKONEN *et al.*, 2018; ALMUTAIRI *et al.*, 2021; QAIDI *et al.*, 2022).

Do ponto de vista econômico, a literatura é escassa, pois não foram encontrados estudos de viabilidade econômica sobre o emprego de materiais de construção civil derivados de CAAs. Entretanto, alguns estudos apontam que o uso de ativador alcalino eleva o custo de produção dos materiais álcali-ativados (JOYCE *et al.*, 2018; PEYS *et al.*, 2018; LUUKKONEN *et al.*, 2018; ALMUTAIRI *et al.*, 2021).

No que diz respeito aos obstáculos ambientais, é necessário desenvolver estudos sobre avaliação do ciclo de vida dos materiais álcali-ativados, pois a literatura é escassa e possui divergência (BAJPAI *et al.*, 2020; MUNIR *et al.*, 2023). Isso se deve especialmente pelo fato da literatura considerar os CAAs como tecnologias emergentes, que consequentemente demandam por metodologias consistentes (HERTEL; PONTIKES, 2020; THONEMANN; SCHULTE; MAGA, 2020).

Com relação à legislação, ainda não existe nenhum regulamento que sancione o uso de materiais álcali-ativados como material para construção civil, principalmente não existe norma nacional que trata sobre o tema. Além disso, comumente os materiais álcali-ativados utilizam-se de resíduos, os quais são muitas vezes classificados como resíduos perigosos ou não perigoso, e não enquanto subprodutos industriais. Esta situação impede o uso de resíduos para produção de CAAs demande por elevados custos de transporte e dificuldade de aceitação do produto (DOLLENTE; TAN; PROMENTILLA, 2021; REVATHI *et al.*, 2022).

Este estudo visa realizar uma análise técnico-ambiental de um produto derivado de CAA para aplicação na construção civil. Foram avaliadas as propriedades físicas do produto e realizado um estudo do seu ciclo de vida. Além disso, foram exploradas possibilidades de uso alternativo de ativadores alcalinos, visando reduzir a pegada de carbono do produto final e os custos de produção.

O desenvolvimento de um produto sustentável é fundamental para alcançar os ODS da Agenda 2030 da ONU. Nesse sentido, a utilização de resíduos na produção de CAAs, como proposto neste estudo, contribui para a promoção da economia circular e para a gestão adequada de resíduos, atendendo aos ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima). Além disso, a estimativa de baixa emissão de carbono do produto, em comparação com o cimento Portland convencional pelo ciclo de vida, evidencia uma contribuição para o ODS 13. Assim, o estudo visa desenvolver um produto que atenda aos critérios de sustentabilidade, sendo ambientalmente correto e contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais, conforme os ODS.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência técnica e ambiental de materiais alternativos na formulação de concretos álcali-ativado para confecção de peças de pavimentação utilizando lodo calcinado proveniente de Estação de Tratamento de Água como matéria-prima.

1.4.2 Objetivos específicos

- Avaliar o proporcionamento ótimo de lodo calcinado de Estação de Tratamento de Água e metacaulim para o desenvolvimento de cimentos álcali-ativados;
- Avaliar experimentalmente o efeito dos ativadores alcalinos nas propriedades dos cimentos álcali-ativados.
- Avaliar experimentalmente o proporcionamento ótimo dos agregados para o desenvolvimento de concreto álcali-ativado para a produção de blocos de pavimentação.
- Avaliar o impacto ambiental, em termos de emissões de CO₂, do uso de ativadores alcalino para um cenário de pavimentação de calçada com peças de concreto álcali-ativado.

1.5 DELIMITAÇÕES

A caracterização do produto desenvolvido limita-se a avaliar as propriedades das peças de concreto de CAA para pavimentação conforme as orientações das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Neste sentido, não foi avaliado o comportamento do passeio a ser construído com esse produto. Ou seja, as peças de concreto não foram avaliadas em um sistema real ou simulado com as condições normais relacionadas as solicitações oriundas das intempéries e tráfego de pessoas sobre o pavimento.

A análise deste inventário inclui a coleta de dados, bem como procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes para produção de peças de concreto de CAA para pavimentação. Os aspectos ambientais evidenciados no estudo estão definidos nos objetivo e escopo. Portanto, este estudo limita-se a não realizar uma avaliação completa de todas as questões ambientais do sistema de

produto sob estudo, mas somente das etapas que relacionadas até produção das peças de concreto para pavimentação de passeio.

Para efeito de comparação, foram considerados três cenários para análise do inventário do ciclo de vida. O primeiro cenário está relacionado a produção de blocos de peça de concreto para pavimentação obtido a partir de CAA a base de lodo de Estação de Tratamento de Água utilizando ativador alcalino convencional, que foi produzido pela mistura adequada de solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio. O segundo cenário, difere-se do segundo apenas devido à origem do ativador alcalino, que foi produzido alternativamente misturando-se, em condições e proporções controladas, solução de hidróxido de sódio e sílica ativa de cinzas volantes da indústria metalúrgica. Já o terceiro cenário, considerado referência, está relacionado a produção das peças de concreto para pavimentação obtido a partir de cimento Portland.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Os cimentos são materiais fundamentais na construção civil, porém a sua produção é uma das principais responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa. Com o objetivo de reduzir a emissão desses gases, pesquisas têm sido desenvolvidas para o desenvolvimento de novos materiais que apresentem menor impacto ambiental (COPPOLA *et al.*, 2018a). Nesse contexto, destaca-se o cimento álcali-ativado (CAA), que tem ganhado destaque nos últimos anos por apresentar baixa emissão de gases do efeito estufa em relação aos cimentos convencionais (COPPOLA *et al.*, 2018b).

O CAA é um material que tem como base a utilização de materiais aluminossilicatos, como por exemplo, as cinzas volantes, escórias de alto-forno, lamas vermelhas e argilas, em combinação com soluções alcalinas. Essa técnica tem como objetivo a produção de um material de elevada resistência e durabilidade, com menor impacto ambiental (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017a).

Dentre as principais características que tornam o CAA mais sustentável em relação aos cimentos convencionais, destacam-se a utilização de materiais que são resíduos industriais e que, portanto, poderiam ser destinados a aterros sanitários, e a menor emissão de gases do efeito estufa durante a produção (BERNAL *et al.*, 2016). Além disso, a avaliação do ciclo de vida tem sido uma ferramenta importante para avaliar a sustentabilidade desse material ao longo de todo o seu ciclo produtivo (SALAS *et al.*, 2018).

A avaliação do ciclo de vida é uma importante ferramenta para avaliar a sustentabilidade dos materiais utilizados na construção civil, pois permite a análise de todos os impactos ambientais gerados desde a extração das matérias-primas até o descarte final do produto (ABNT, 2009). Diante desse contexto, torna-se necessário avaliar os avanços e desafios relacionados à sustentabilidade dos CAAs, considerando-se a importância desse material na construção civil e o impacto ambiental gerado pela produção dos cimentos convencionais (DOLLENTE; TAN; PROMENTILLA, 2021).

Nesse sentido, buscou-se esclarecer os principais conceitos relacionados aos CAAs e avaliação do ciclo de vida, tendo como base a literatura disponível. Para isso, elencaram-se os fatores fundamentais para produção dos CAAs: precursores sólidos, ativador alcalino e mecanismo da reação de álcali-ativação. É importante destacar

que, durante a pesquisa, também foram abordados aspectos ambientais relacionados à produção de produtos derivados de CAAs, a fim de entender melhor as suas vantagens ambientais e identificar oportunidades para aprimorar a sua produção.

2.2 METODOLOGIA

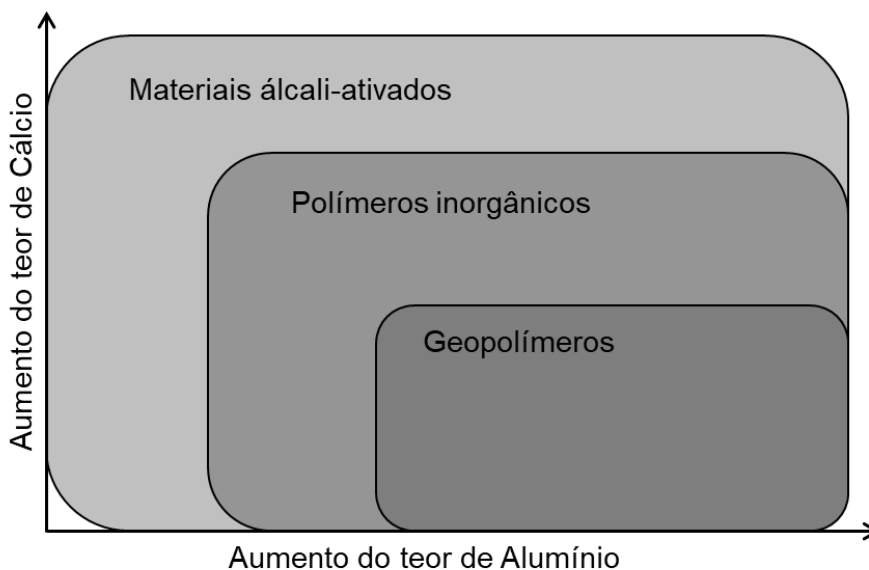
Realizou-se um levantamento bibliográfico, visando descrever os principais aspectos relacionados aos CAAs e avaliação do ciclo de vida. Para tal, utilizaram-se artigos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais como fontes de informações. As plataformas Periódico CAPES e Google Acadêmico foram utilizadas para a busca. A base conceitual foi construída a partir de conceitos fundamentais já consolidados, bem como em função de informações atualizadas sobre o tema da pesquisa.

2.3 CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO

Geopolímeros, polímeros inorgânicos, materiais ativados por álcalis, cimentos álcali-ativados, cerâmica alcalina, geocimento e aglutinantes híbridos são termos que têm se destacados crescentemente nos últimos anos. Na literatura científica, a terminologia utilizada pode variar consideravelmente de um autor para outro, assim como a nomenclatura para se referir a produtos químicos e à estrutura do produto final (VAN DEVENTER *et al.*, 2010; BERNAL; PROVIS, 2014; DAVIDOVITS, 2018). Embora haja uma variedade de terminologias utilizadas para descrever esses materiais, é importante destacar que todos eles são sintetizados utilizando a mesma tecnologia de ativação alcalina (DUXSON *et al.*, 2008).

Tendo em vista que ainda não existe uma terminologia científica padronizada tecnicamente, nesta revisão, optou-se por adotar a nomenclatura sugerida por Van Deventer *et al.* (2010). De acordo com os autores, define-se como material álcali-ativado qualquer sistema aglutinante derivado da reação entre um precursor rico em aluminossilicato com sais alcalinos. Material álcali-ativado é um termo amplo e engloba uma variedade de materiais, incluindo polímeros inorgânicos, geopolímeros e outros materiais semelhantes, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Categorias de materiais englobados pela terminologia de materiais álcali-ativado, cujo sombreamento indica a concentração relativa do ativador alcalino.



Fonte: Van Deventer *et al.*, 2010.

Neste contexto, é importante destacar que a expressão "cimento álcali-ativado" é comumente utilizada como sinônimo de material álcali-ativado, o que pode gerar certa ambiguidade. Sendo assim, é válido ressaltar que, ao utilizar essa expressão, está-se referindo ao sistema aglutinante resultante da reação entre um precursor com elevado teor de aluminossilicato e sais alcalinos, tal como definido pela nomenclatura proposta por Van Deventer *et al.* (2010).

Inclusive, no que se refere à aplicação deste material na construção civil, o Comité Técnico 224 RILEM recomenda o uso da terminologia material álcali-ativado para argamassas, concretos e grautes, com o objetivo de facilitar a compreensão do assunto e a divulgação científica. Os materiais álcali-ativados, portanto, possuem uma classificação mais ampla, tal que conglomeram qualquer material cuja matriz cimentícia seja derivada da reação de uma fonte de aluminossilicato com sais alcalinos: cimento álcali-ativado (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Apesar das discussões relativamente recentes sobre a terminologia, a produção de materiais álcali-ativados já é antiga. Estima-se que a produção de materiais resistentes a partir da combinação de uma fonte alcalina com um precursor sólido contendo alumina e sílica remonta ao final do século XIX. No início do século XX, os primeiros estudos foram realizados e, por volta de 1940, uma base científica mais sólida foi estabelecida com o uso de escórias de forno alto ativadas por diversas combinações de soluções alcalinas. Essa técnica resultou na produção de materiais com taxas de resistência à compressão comparáveis aos cimentos Portland,

representando um avanço significativo na área de materiais de construção (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Uma vez estabelecido esse conceito inicial sobre CAA, para melhor compreensão do material, se faz necessário também discutir os principais aspectos conceituais relacionados aos precursores sólidos fonte de aluminossilicato, ativadores alcalinos, reação de álcali-ativação e suas propriedades.

2.3.1 Precursores

Possuir composição química majoritariamente composta por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) é o critério fundamental para ser um precursor de CAA. Nos últimos anos as opções de materiais precursores para desenvolvimento de CAAs se ampliaram significativa, com destaque para os subprodutos ou resíduos de atividade diversas (SHI; QU; PROVIS, 2019). Esses precursores são especialmente atrativos devido à disponibilidade local e ao baixo valor comercial, o que contribui para a redução da extração de recursos naturais e a deposição em aterros sanitários (SILVA *et al.*, 2017).

Por muitos anos, as pesquisas científicas se concentraram no desenvolvimento de CAAs a partir de metacaulim, cinza volante e escória de alto forno, que são considerados os principais precursores devido às suas propriedades químicas e físicas favoráveis. No entanto, nos últimos anos, a busca por alternativas sustentáveis e economicamente viáveis tem levado ao uso de uma ampla gama de resíduos e subprodutos, provenientes de diversas atividades industriais e agropecuárias. Esses materiais incluem resíduos de processamento de minérios, cascas de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de construção e demolição, entre outros.

A seguir são apresentados alguns exemplos de materiais que podem ser utilizados como precursores para desenvolvimento de cimentos álcali- ativados. Ressalta-se que essa revisão busca elencar precursores que são considerados resíduos industriais, com o objetivo de mostrar as perspectivas de seu aproveitamento para o desenvolvimento sustentável de materiais aplicados à construção civil.

2.3.1.1 Metacaulim

O metacaulim é um aluminossilicato anidro altamente reativo oriundo da calcinação do caulim. Em geral, calcinação do caulim é feita na faixa de temperatura

entre 600 e 800 °C com o objetivo de torna o material amorfo. Apesar de ser possível extrair alternativamente metacaulim do lodo residual da produção de papel e solos lateríticos, o caulim é a principal fonte de metacaulim, devido à grande disponibilidade desse mineral naturalmente na natureza (ZHANG *et al.*, 2016; ABABNEH; MATAKKAH; AQEL; 2020).

O caulim, considerada a principal matéria-prima do metacaulim, é constituído predominantemente pelo argilomineral caulinita, um aluminossilicato hidratado $[Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8]$. A composição química aproximada do caulim é 53% de Al_2O_3 e 43% de SiO_2 , além de outros óxidos em menor quantidade, como Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , K_2O e MgO (MURRAY, 2006).

Para tornar o caulim apto a ser utilizado no desenvolvimento de CAA é necessário tratamento térmico, denominado de calcinação (ZHANG *et al.*, 2016). Ao realizar a calcinação do caulim, ocorre um fenômeno conhecido como desidroxilação, caracterizado pela perda estrutural da hidroxila (OH^-) na forma de água presente na estrutura da caulinita. Isso resulta em uma desordem estrutural dos átomos do caulim e conseqüentemente transformando-o em metacaulim, um material amorfo e mais reativo quimicamente (ZUHUA *et al.*, 2009).

Os CAAs obtidos a partir de metacaulim são amplamente investigados, pois possuem propriedades de resistência ao fogo, o que torna o material adequado para aplicação aeroespacial (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014; GLASBY *et al.*, 2015). Entretanto, devido as demais propriedades, como anticorrosivo, elevada resistência mecânica em idades iniciais, baixa massa específica, elevada durabilidade, entre outros, tem atraído atenção do material para aplicações gerais, especialmente como material de construção civil (ZHANG *et al.*, 2016; PROVIS; VAN DEVENTER, 2019; GERALDO; GONÇALVES; CAMARINI, 2023).

2.3.1.2 Escórias siderúrgicas

Durante o processo produtivo do aço, são gerados diversos subprodutos conhecidos como escórias siderúrgicas, que podem ser aplicadas no desenvolvimento de CAAs. São produzidas, por exemplo, escória granulada de alto forno, escória de aciaria e escória de dessulfuração, a depender das características das instalações da planta industrial e seus respectivos processos.

A produção de ferro-gusa líquido a partir de minério de ferro, coque e calcário gera um subproduto não-metálico, que é resfriado rapidamente para minimizar a cristalização, resultando em um material vítreo com características de areia fina. Esse subproduto é conhecido como escória granulada de alto forno e é composto principalmente por óxidos de silício, alumínio, cálcio e magnésio (ÖZBAY; ERDEMIR; DURMUŞ, 2016.LIU *et al.*, 2017).

A composição química da escória granulada de alto forno depende das características dos suprimentos (minério de ferro/sucata de ferro), dos fundentes utilizados (calcário/dolomita) e até mesmo das impurezas presentes no combustível. Entretanto, em geral, a escória granulada de forno alto é composta principalmente por óxidos de silício ($\pm 35\%$), cálcio ($\pm 40\%$), alumínio ($\pm 12\%$), magnésio ($\pm 10\%$) e ferro ($\pm 1\%$), que somados podem representar mais de 90% da sua composição (ÖZBAY; ERDEMIR; DURMUŞ, 2016).

A escória de aciaria é um subproduto gerado durante o processo de refino do aço a partir do ferro em fornos de oxigênio básico ou elétricos a arco. Durante o processo de refino, são adicionados aditivos ao ferro para remover impurezas e ajustar a composição química do aço. A escória é formada pela combinação desses aditivos com outras impurezas presentes no ferro, e é removida do forno como um material vítreo e não metálico (NAIDU; SHERIDAN; VAN DYK, 2020; LIU *et al.*, 2021).

Assim como na escória granulada de alto forno, a composição química da escoria de aciaria é constituída por óxidos de silício, alumínio, ferro e cálcio. Todavia, diferentemente da escória granulada de alto forno, a reatividade da escória de aciaria é relativamente baixa, pois seu resfriamento é feito de forma lenta naturalmente gerando um material caracteristicamente cristalino (SONG *et al.*, 2021). Entretanto, para aumentar a reatividade da escória de aciaria e melhorar sua potencialidade como matéria-prima cimentícia, processos de resfriamento rápido, como a granulação, são frequentemente empregados. O granulado produz partículas mais finas e amorfas, o que resulta em uma maior reatividade da escória de aciaria na produção de CAAs (NUNES; BORGES, 2021).

Já a escória de dessulfuração é um subproduto gerado durante o processo de refinamento que remove impurezas de enxofre do ferro-gusa líquido ou do aço líquido, tornando o produto final mais adequado para aplicações específicas. Durante esse processo, é adicionado um agente dessulfurante, geralmente à base de calcário ou dolomita, ao líquido metálico. O agente reage com o enxofre não apresenta metal,

formando dióxido de carbono e sulfeto de cálcio ou sulfeto de magnésio, dependendo do agente utilizado. Esses sulfetos são posteriormente removidos do metal líquido, formando a escória de dessulfuração (KAWATRA; RIPKE, 2002; TONG *et al.*, 2016).

A composição da escória de dessulfuração é formado predominantemente por óxido de cálcio ($\pm 40\%$). Além disso, é possível encontrar óxido de silício, óxido de magnésio, óxido de alumínio e óxido de ferro, sulfeto de cálcio, fluoreto de cálcio e enxofre (TONG *et al.*, 2016). Devido à sua natureza amorfa, especialmente a escória de alto forno, e composição química, as escórias siderúrgicas são consideradas uma matéria-prima adequada para a produção de CAA (DEB; NATH; SARKER, 2014; REDDY; DINAKAR; RAO, 2018). Embora a maior parte das escórias seja utilizada na produção de cimento Portland, elas também são consideradas materiais fundamentais para o avanço científico sobre a produção e compreensão dos CAAs, com destaque especial para as escórias de aciaria e de dessulfuração, por possuírem baixo valor agregado.

2.3.1.3 Cinzas volantes

A cinza volante é um resíduo resultante da queima do carvão mineral em usinas termelétricas ou caldeiras industriais. Durante o processo de combustão, o carvão é queimado em altas temperaturas, gerando gases e partículas que são liberados na atmosfera, enquanto as cinzas resultantes da queima são coletadas em filtros eletrostáticos ou precipitadores. Essas cinzas são chamadas de cinzas volantes devido à sua natureza leve e fina, sendo carregadas pelos gases de combustão (GRABIAS-BLICHARZ; FRANUS, 2023).

Em geral, os componentes das cinzas volantes incluem óxidos de silício, óxido de alumina, óxido de cálcio e óxido de ferro, além de oligoelementos metálicos, como Ti, V, Cr, Mn, Co, As, Sr, Mo, Pb e Hg. As cinzas volantes são mundialmente classificadas em dois tipos químicos para fins industriais: classe C e classe F. As cinzas volantes de classe C possuem elevados teores de óxido de cálcio ($>20\%$), enquanto as cinzas volantes de classe F contêm mais óxido de silício e baixo teor de cálcio ($<10\%$) (BHATT *et al.*, 2019).

As partículas de cinzas volantes apresentam uma forma predominantemente esférica, com tamanhos que variam entre 0,5 e 100 μm . Elas apresentam-se em duas formas: amorfa, que é arredondada e lisa, e cristalina, que é pontiaguda. Embora a

maioria das partículas esféricas seja sólida, podem existir em menor volume esferas ocas chamadas de cenosferas, bem como esferas que contêm outras esferas menores, conhecidas como plerosferas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os principais fatores que influenciam a reatividade potencial das cinzas volantes para desenvolvimento de CAAs estão relacionado a quantidade e o grau de polimerização da fase vítrea presente, a quantidade de cálcio, o teor de sílica e alumina reativa, a distribuição de tamanho de partícula e a porcentagem de materiais não queimados presentes na cinza. A fase vítrea é importante porque é a responsável pela reatividade da cinza, já que a sílica e a alumina reativas estão presentes nessa fase. O cálcio é outro fator importante, pois influencia a formação de silicatos de cálcio hidratados, que dão origem às propriedades cimentícias da cinza. A distribuição de tamanho de partícula é relevante, pois afeta a área superficial específica da cinza, o que pode influenciar na sua reatividade. Já a presença de materiais não queimados pode afetar negativamente a reatividade da cinza, uma vez que esses materiais não são reativos (RASHAD, 2014; LI; XU; SHI, 2021).

Devido as característica amorfa e composição rica em óxidos de silício, alumina e cálcio, as cinzas volantes são amplamente utilizadas para produção de CAAs (ZHUANG *et al.*, 2016).

2.3.1.4 Resíduo de tratamento de minério

O processo de mineração industrial gera grandes volumes de resíduos sólidos, que são denominados genericamente de rejeitos. A depender dos insumos utilizados no processamento do minério, os rejeitos podem ser considerados perigoso (tóxico) devendo ser armazenados de forma permanente em forma de depósitos em pilhas ou em estruturas de contenções. O estabelecimento, monitoramento e manutenção desses depósitos de rejeitos possuem custo agregado, tal que a destinação adequada de resíduo de mineração representa uma preocupação ambiental e econômica (MOHAJERANI *et al.*, 2019; HERTEL; PONTIKES, 2020).

Um resíduo comumente utilizado para o desenvolvimento de em CAAs é oriundo do processamento de minério de alumínio, denominado de lama vermelha. A lama vermelha é produzida durante a extração de alumina dos minérios de bauxita pelo processo caustico denominado de Bayer (HERTEL; PONTIKES, 2020; KUMAR *et al.*, 2021). Depende das características do minério e dos processos industriais

envolvidos, esse resíduo é composto principalmente por óxidos de ferro ($\pm 40\%$), de alumínio ($\pm 15\%$), de silício ($\pm 10\%$) e outros em menor proporção (GRÄFE *et al.*, 2011).

Diversos estudos foram realizados evidenciando a viabilidade de se utilizar a lama vermelha para produção de CAAs. Brito, Racanelli e Souza (2020) e Boskovic, Vukcevic, Krgovic (2015) estudaram a proporção de lama vermelha em misturas binárias com metacaulim para desenvolvimento de CAAs, enquanto Dimas, Giannopoulou e Panias (2009), Promentilla *et al.* (2016) e Hoang, Do e Le (2020) utilizam a lama vermelho como único precursor e alcançaram resistência à compressão superior a 10 MPa.

Ressalta-se que viabilidade de se utilizar a lama vermelha para produção de CAAs depende de tratamento térmico do material, devido sua baixa reatividade em natura. A vantagem é que a dissolução de elementos relevantes do resíduo calcinado pode ser consideravelmente aumentada em uma solução alcalina em comparação com a lama vermelha sem tratamento térmico. Portanto, a calcinação entre 500 e 800 °C melhora potencialmente a reatividade do resíduo (HERTEL; PONTIKES, 2020).

2.3.1.5 Lodo de Estação de Tratamento de Água

Os sistemas de tratamento de água provenientes de mananciais subterrâneos ou superficiais é fundamental para abastecimento e saúde da população. Nas Estações de Tratamento de Águas (ETA), a água bruta captada passa por diversos processos físicos, químicos e biológicos até apresentar um padrão de potabilidade adequado. Entretanto, o processo de tratamento de água gera um resíduo com características fluidas, denominado de lodo (ANDREOLI *et al.*, 2006).

O lodo de ETA (LETA) é oriundo essencialmente dos tanques de sedimentação ou flotação e água de lavagem de filtros, sendo constituído por sólidos orgânicos e inorgânicos, acrescidos de produtos aplicados durante o processo de tratamento de água, como hidróxido de alumínio (RICHTER, 2001). De acordos com os critérios da norma NBR 10004 (ABNT, 2004), o LETA pode ser enquadrado como resíduos classe II A: resíduo não inertes com propriedades de biodegradabilidade e solubilidade em água (ANDREOLI *et al.*, 2006).

O LETA possui a composição química muito variada, pois é influenciada diferentes fatores, como as características geológicas dos locais de captação de água, sazonalidade do rio e insumos utilizados no tratamento da água. Entretanto, de modo

geral, o LETA calcinado pode ser classificado em função de sua composição química como uma pozolana, pois é formado majoritariamente por óxidos de silício ($\pm 45\%$), de alumínio ($\pm 35\%$) e de ferro ($\pm 10\%$), que representam mais de 70% da massa do resíduo (SANTOS *et al.*, 2019; JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; BOURZIK *et al.*, 2022).

Diversos estudos têm demonstrado a viabilidade de usar o LETA como precursor de CAAs, seja com ou sem tratamento térmico, tanto em sistemas monocomponentes quanto em sistemas binários e multicomponentes. Essa alternativa abre perspectivas para uma destinação ambientalmente adequada do resíduo, já que ele pode ser utilizado como precursor sustentável na produção de CAAs (BERNAL *et al.*, 2016; LUHAR *et al.*, 2021; MAÑOSA *et al.*, 2021).

Hwang *et al.*, (2016) produziram CAAs a partir de uma mistura terciária composta por LETA, cinza volante e escória granulada de alto forno. Os autores observaram que a adição de LETA na dosagem dos CAAs promove redução na trabalhabilidade das pastas e aumento no peso unitário fresco e na resistência à compressão, tal que atingiram mais de 10 MPa. Além disso, o tempo de pega das pastas estão associados positivamente com quantidade proporcional de LETA na dosagem.

Mañosa *et al.* (2021) produziram CAA a partir de argila natural com substituição parcial por LETA em até 80%. Os resultados indicaram que os CAAs desenvolvidos apresentaram resistência à compressão e estabilidade química (degradação hidrolítica) satisfatórias. Entretanto, foi observado que quanto maior a quantidade de resíduo na dosagem dos CAAs, a partir de 20%, menor foi o desempenho mecânico.

Horpibulsuk *et al.* (2016) desenvolveram CAAs a partir de uma mistura de LETA com argila e cinza volante. Os autores investigaram a influência da temperatura de cura nas propriedades dos CAAs, bem como avaliaram a sua durabilidade. Constataram que a temperatura de cura afeta as propriedades dos CAAs e que houve uma redução na resistência à compressão ao longo dos ciclos de saturação e secagem.

Bourzik *et al.* (2022) utilizaram LETA calcinado misturado com cinza volante para desenvolvimento de CAAs. Os autores observaram as correlações entre massa específica, porosidade e resistência à compressão, e obtiveram um cimento com resistência superior 40 MPa, aos 28 dias, sob condições de cura controlada a 60 °C.

Santos *et al.* (2019) desenvolveram CAA a partir da mistura de LETA calcinado com cimento Portland. Os autores analisaram a influência da origem do LETA nas

propriedades dos CAAs e obtiveram um produto com resistência máxima à compressão de 89 MPa aos 102 dias de cura. Jesus, Vieira e Vieira (2020) desenvolveram CAA a partir de LETA calcinado como único precursor. Os autores avaliaram a influência da relação entre óxidos de silício e alumínio nas propriedades dos CAAs, e alcançaram resistência à compressão superior a 19 MPa, aos sete dias de cura.

Ressalta-se a importância da cominuição e do tratamento térmico do LETA para viabilizar sua utilização como precursor de CAA, uma vez que o material apresenta baixa reatividade em sua forma natural. O processo de calcinação tem como objetivo a eliminação da carga orgânica presente no LETA e a transformação das fases cristalinas, enquanto o processo de cominuição busca reduzir o tamanho dos grãos e aumentar a área superficial das partículas, ambos visando aumentar a reatividade do resíduo (SANTOS *et al.*, 2019; JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; MAÑOSA *et al.*, 2021; MURALEEDHARAN; NADIR, 2021).

2.3.2 Ativadores alcalinos

Os ativadores alcalinos são um dos componentes essenciais para o desenvolvimento de CAAs (PROVIS, 2014). Esses ativadores são adicionados à mistura principalmente na forma de solução, mas também podem ser incorporados no estado sólido. Convencionalmente os tipos de ativadores mais utilizados são hidróxidos e dos silicatos, entretanto a ativação alcalina pode ocorrer a partir de aluminatos, aluminossilicatos e sais de ácidos fracos e fortes não silicatados (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017ab).

As características dos ativadores são fundamentais no processo de ativação, pois são capazes de dissolver as espécies químicas dos precursores e, consequentemente, promover a reação de álcali-ativação, através de um elevado potencial hidrogeniônico (pH). O elevado pH dos ativadores alcalinos decorre da presença de silicatos e hidróxidos em sua composição. Todavia, pode-se utilizar carbonatos e até mesmo sulfatos para promover uma condição alcalina. Além disso, precursores ricos em cálcio, como a escória granulada de alto-forno e cinza volantes de classe C, podem ser empregados para promover a alcalinidade do ativador (BERNAL *et al.*, 2016; TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017a; CHENG *et al.*, 2022).

Os ativadores alcalinos mais utilizados são o hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3) devido sua alta disponibilidade no mercado e um baixo custo relativo, o que os torna uma opção economicamente viável para a produção de CAAs (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Entretanto, nos últimos anos, tem sido objeto de investigação o desenvolvimento de ativadores alcalinos alternativos obtidos a partir de resíduos, com o intuito de reduzir o impacto ambiental da produção de CAAs (MENDES *et al.*, 2020; RATHOD; CHIPPAGIRI; RALEGAONKAR; 2023).

Neste sentido, os ativadores alcalinos podem ser classificados em duas categorias: convencionais e alternativos. Os ativadores alcalinos convencionais são aqueles obtidos comercialmente, tais como hidróxido de sódio e silicato de sódio. Por outro lado, os ativadores alcalinos alternativos são produzidos a partir de resíduos, tais como cinzas volantes, escórias de alto-forno, cinza de casca de arroz e pó de vidro reciclado, os quais apresentam potencial para substituir ou complementar os ativadores convencionais em aplicações de CAAs (MENDES *et al.*, 2020).

2.3.2.1 Ativadores alcalinos convencionais

Em uma revisão bibliográfica, Mendes *et al.* (2020) elencou que os principais ativadores alcalinos convencionais utilizados para desenvolvimentos de CAAs são obtidos a partir de hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), silicato de sódio (Na_2SiO_3), silicato de potássio (K_2SiO_3) e carbonato de sódio (K_2CaO_3), que podem ser aplicado como único componente ou de forma misturada. Apesar de limitações, Provis e Van Deventer (2014) apontam que podem ser utilizados hidróxido de bário (BaOH), hidróxido de lítio (LiOH), silicato de lítio (LiSiO_3) e até mesmo silicato de cério (CeSiO_3).

Assim como o NaOH, o KOH é amplamente utilizado para produção de CAAs, especialmente devido as propriedades similares de solubilidade em água. Todavia, a utilização de KOH como ativador alcalino é limitada, especialmente devido ao elevado custo e disponibilidade, quando comparado com o NaOH (JAIN, 2014). Além disso, o NaOH e o Na_2SiO_3 são os ativadores mais eficazes para o processo de álcali-ativação, principalmente quando são usados de forma combinada (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Ao realizar uma comparação mais abrangente entre os ativadores alcalinos convencionais, Rocha *et al.* (2018) produziu CAA a partir de quatro diferentes

combinações: NaOH e Na₂SiO₃; KOH e Na₂SiO₃; NaOH e K₂SiO₃; e KOH e K₂SiO₃. Os autores constaram que a resistência mecânica e a morfologia da microestrutura são influenciadas pelo tipo de ativador alcalino utilizado. Os maiores valores de resistência à compressão foram observados nos CAAs obtidos a partir de NaOH. Os corpos de provas de cimento álcali-ativado desenvolvidos a partir de K₂SiO₃ apresentaram microestrutura mais uniforme e densa, enquanto os desenvolvidos a partir de Na₂SiO₃ apresentaram morfologia porosa e com microfissuras.

Resultados semelhantes já haviam sido relatado por Tänzer, Jin e Stephan (2017), que investigaram o uso de ativadores alcalinos obtidos a partir de NaOH e Na₂SiO₃, com e sem adição de KOH e K₂SiO₃. Isso ocorre, segundo Phair e Van Deventer (2002) e Khale e Chaudhary (2007), porque os existe diferença de tamanho entre os raios atômicos dos íons de Na⁺ e K⁺. Os íons de K⁺ são maiores promovem uma condição mais básica, o que permite maior taxa de solubilização e dissolução das espécies químicas dos precursores. Em consequência disso, forma-se uma reação de policondensation mais densa durante a álcali-ativação e cimentos álcali-ativados com maiores resistências mecânica.

Argamassas álcali-ativadas produzidas por Yang *et al.* (2012) a partir de ativadores alcalinos à base de Ca(OH)₂ e Na₂SiO₃ apresentaram maior resistência mecânica que as argamassas obtidas a partir de Ca(OH)₂ e Na₂CO₃. Concretos álcali-ativados desenvolvidos por Humad, Provis e Cwirzen (2018) a partir de ativadores alcalinos derivados de Na₂CO₃ apresentaram menor consistência e menor tempo de pega em relação aos concretos álcali-ativados derivado de Na₂SiO₃.

2.3.2.2 Ativadores alcalinos alternativos

Em geral, os ativadores alcalinos alternativos são produzidos pela dissolução de um precursor com elevador teor de SiO₂ em solução de hidróxidos de sódio e/ou potássio. Para garantir a efetividade dessa dissolução, o preparo do ativador alcalino pode ser feito em refluxo, banho maria e agitador eletromagnético em elevadas temperaturas ou em temperatura ambiente por alguns minutos e até mesmo por dias.

Estudos conduzidos Tchakouté *et al.* (2016) desenvolveram CAAs com ativador alcalino a partir de cinzas de casca de arroz e resíduo de vidro. Para isso, os materiais foram misturados com hidróxido de sódio e água destilada a 100 °C por duas horas em agitador magnético. As soluções resultantes foram filtradas e utilizadas como

ativadores, que foram armazenados por pelo menos uma semana antes do uso para permitir a completa dissolução e equilíbrio da sílica. Os CAAs desenvolvidos com esse ativador alcalino apresentaram um menor volume de poros; consequentemente, maior resistência à compressão, com valor máximo de 32 MPa.

Mejía, Gutiérrez e Montes (2016) compararam o desempenho dos ativadores obtidos alcalinos obtidos de três formas: silicato de sódio (convencional) cinza de casca de arroz e terra de diatomáceas calcinada. A dissolução tanto da cinza quanto da terra foi realizada separadamente em uma solução de hidróxido de sódio com agitação constante durante 24 horas em temperatura ambiente. Os CAAs produzidos a partir dos ativadores alcalinos alternativos apresentaram maior tempo de pega e menor resistência (27 MPa, aos 28 dias) em comparação aos CAAs produzidos com ativador alcalino convencional. Os autores indicam que essas propriedades são influenciadas pela fonte de sílica e pela quantidade de água utilizada no preparo dos ativadores alcalinos alternativos.

No desenvolvimento de CAAs, Torres-Carrasco e Puertas (2017b) utilizaram resíduos de vidro combinado de diferentes formas e proporção com hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e carbonato de sódio para produzir ativador alcalino alternativo. As amostras produzidas apresentaram resistência à compressão de até 88 MPa. Os autores ressaltam a possibilidade de se obter ativador alcalino alternativo capaz de substituir parcial ou totalmente os ativadores alcalinos convencionais.

Moraes *et al.* (2018) produziram soluções ativadoras alcalinas a partir da cinza da palha da cana-de-açúcar e hidróxido de sódio. Para isso, preparou-se os ativadores em suspensão mantida em garrafa térmica por 24 horas. A resistência à compressão das argamassas álcali-ativadas obtida aos 28 dias de cura foi maior que 50 MPa, todavia foi inferior à resistência obtida pelas as argamassas produzidas de ativador alcalino convencional a partir de silicato de sódio comercial.

Passuello *et al.* (2017) produziu ativador alcalino alternativo pela dissolução de cinza de casca de arroz em solução de NaOH, no utilizou um sistema de refluxo a 100 °C por 1 h para atingir o maior grau de dissolução e evitar perda de água por evaporação. Nesta mesma perspectiva, Jesus, Vieira e Vieira (2020) preparam ativador alcalino a partir da dissolução de sílica ativa em solução de NaOH. Entretanto, para evitar perda de água por evaporação, os autores produziram o ativador em banho maria por 15 minutos à 90 °C com mistura manual entre os componentes.

Villaquirán-Caicedo (2019) preparou um ativador alcalino alternativo a partir de hidróxido de potássio e cinza volante, que foi mantido em repouso por 20 horas em temperatura ambiente. A autora avaliou a influência da substituição parcial e total do ativador alcalino convencional pelo alternativo, ambos à base de hidróxido de potássio. Os melhores resultados, com valores maiores que 60 MPa, foram obtidos nas amostras com substituição parcial de 50% do ativador convencional pelo ativador alternativo, promoveu aumento da resistência mecânica dos CAAs. Além disso, a substituição total do ativador convencional pelo alternativo provocou a diminuição da resistência em relação à substituição parcial; apesar de os valores obtidos ainda serem superiores aos encontrados na pasta produzida somente com o ativador convencional.

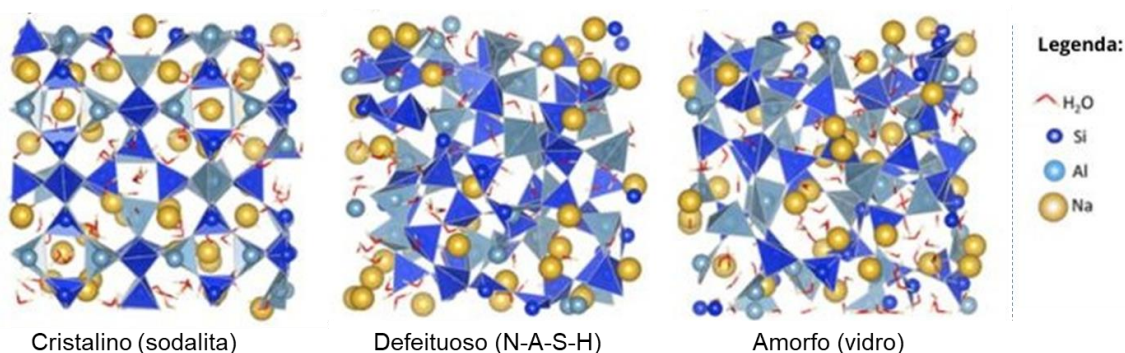
2.3.3 Reação de álcali-ativação

Para melhor compreender essa reação de álcali-ativação, é necessário conhecer primeiramente estrutura fundamental de um CAA, que formada por um gel de aluminossilicato com estrutura molecular tridimensional desordenada. Essa estrutura molecular é formada por uma rede tridimensional construída por tetraedros de silicato e aluminato interligados por átomos de oxigênio, com íons alcalinos balanceando a carga (DUXSON *et al.*, 2007).

Considerando que íon alcalino utilizado para desencadear a reação de álcali-ativação foi o sódio (Na^+), como NaOH e/ou Na_2SiO_3 , o produto de reação é denominado gel de aluminossilicato de sódio hidratado, que pode ser representado pela abreviatura N-A-S-H. Essa abreviatura abrange toda variação da razão Si/Al e da razão Na/Al que possa se formar durante a reação de álcali-ativação (KUMAR; KUMAR; MEHROTRA, 2010; CHITSAZ; TARIGHAT, 2020; WAN; YUAN; ZHANG, 2020). Visto que as estruturas descritas pioneiramente por Davidovits (1991), como sendo Si-O-Al e Si-O-Si, se relacionavam apenas a razão Si/Al.

Na Figura 2 tem-se a comparação entre as estruturas cristalina, defeituosa (N-A-S-H) e amorfa, que foram obtidas com base na sodalita, CAA e vidro, respectivamente. O modelo defeituoso é considerado mais representativo de estruturas obtidas experimentalmente de gel de aluminossilicato de sódio hidratado, representado pela sigla N-A-S-H, durante a reação álcali-ativação (LOLLI *et al.*, 2018; CHITSAZ; TARIGHAT, 2020).

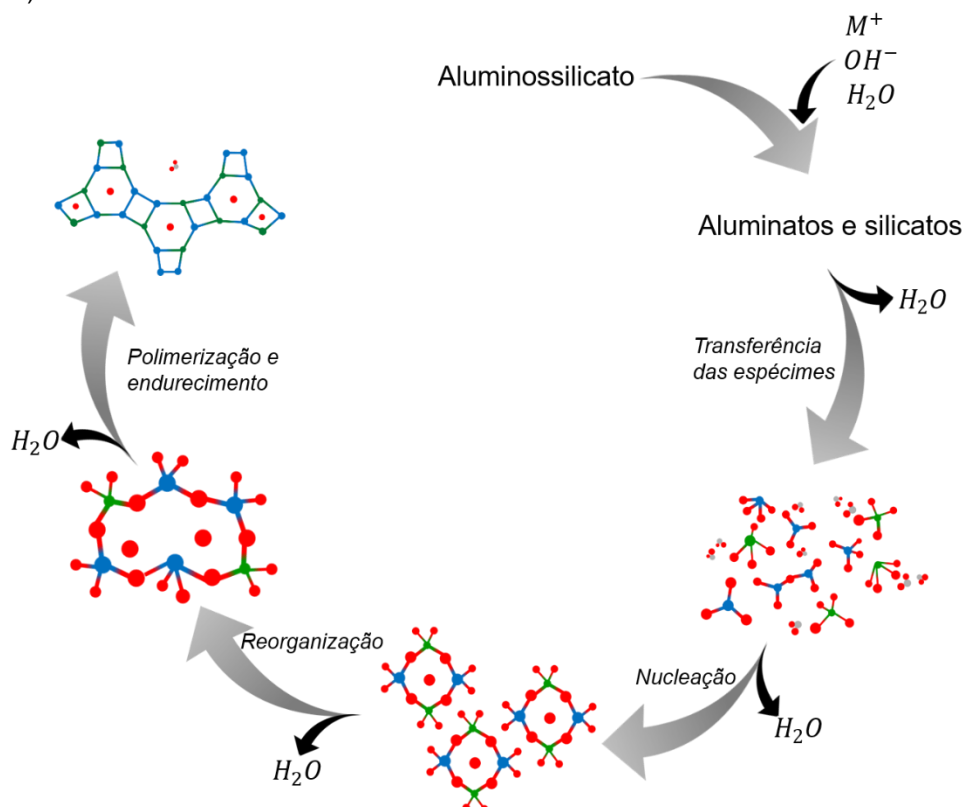
Figura 2 - Representação esquemática da estrutura molecular cristalina, defeituosa e amorfa.



Fonte: Lolli *et al.*, 2018 (adaptado).

Essa microestrutura do CAA é obtida a partir da reação de álcali-ativação, representado na Figura 3. Neste modelo, é necessário um precursor com elevado teor de SiO e Al₂O₃, denominado de aluminossilicato, que é misturado com um ativador alcalino, representado por M⁺, OH⁻ e H₂O. No modelo de reação álcali-ativação concebido por Duxson *et al.* (2007), o processo ocorre em quatro fases: transferência das espécies, nucleação, reorganização e polimerização e endurecimento. Esses processos primeiramente ocorre a dissolução das espécies químicas, em seguida a coagulação a partir da formação de núcleos e, posteriormente, a cristalização por meio da polimerização dos núcleos e consequentemente o endurecimento.

Figura 3 - Modelo conceitual da reação de álcali-ativação desenvolvido por Duxson *et al.* (2007).



Fonte: Jesus, 2018.

Wan *et al.* (2017) e Wang, Alrefaei e Dai (2019) detalham esse modelo conceitual de Duxson *et al.* (2007), ressaltando aspectos relacionados ao comportamento cinético das espécies envolvidas durante a reação de álcali-ativação. Os autores destacam que inicialmente ocorre a dissolução do precursor em Al^{3+} e Si^{2+} , devido ao ataque químico do ativador alcalino. Esses íons, juntamente como os monômeros de aluminato e silicato, compõem uma solução de aluminossilicato supersaturada, que propicia a formação de um gel.

Neste processo, a água utilizada no ativador alcalino atua como catalisador, pois carrega as espécies químicas, e não propriamente como uma molécula da reação. Entretanto, as espécies OH^- catalisam a reação promovendo tanto as quebras das ligações $(\text{Si-O})^1$ e $(\text{Al-O})^{2+}$. Essas espécies químicas ficam disponíveis para formarem os aluminato e silicato, o que configura coagulação em forma de gel. Após essa etapa, o sistema em gel continua se reorganizar, tal que se aumenta a complexidade da rede em gel, resultado em uma rede tridimensional de aluminossilicato. Nesta etapa, ocorre, portanto, a cristalização com formação de núcleos e o enrijecimento do CAA (DUXSON *et al.*, 2007; WAN *et al.*, 2017; WANG; ALREFAEI; DAI, 2019).

As propriedades dos CAAs, como a resistência mecânica, dependem diretamente das espécies químicas presentes nos precursores e ativadores alcalinos. Entretanto, um fator relevante nas propriedades é a relação entre Si e Al, pois estas afetam a formação do gel N-A-S-H. Além disso, o uso de resíduos como precursor permite formações de diferentes formas do gel N-A-S-H, especialmente quando existe elevada relação entre Si e Al ou cálcio (WAN *et al.*, 2017; WANG; ALREFAEI; DAI, 2019).

2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

2.4.1 Contexto e definições

A crescente conscientização quanto à importância da sustentabilidade, bem como quanto aos possíveis impactos associados aos produtos, desde a sua fabricação até o consumo e descarte, tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com aqueles impactos. Uma das técnicas em desenvolvimento com esse objetivo é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (LASVAUX *et al.*, 2015).

No que tange a construção civil, a ACV permite avaliar objetivamente o desempenho ambiental dos produtos, seja ele um material de construção ou uma edificação. Dessa maneira, contribui-se para melhores tomadas de decisão baseadas em aspectos ambientais na construção civil (SILVA *et al.*, 2019).

A norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), que descreve os princípios e a estrutura de uma ACV, define que ciclo de vida é composto por “estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final”. Neste sentido, pode-se definir que ACV como uma compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.

Por meio da ACV analisa-se integral e sistematicamente um produto, pois avalia-se todas as fases de um produto desde a extração das matérias-primas, passando pelas fases de sua produção, uso e manutenção, até o fim de sua vida útil. Ao fazer a ACV é possível identificar processos de maior impacto e dessa forma propor alternativas mais sustentáveis para os diversos produtos que podem ser objeto de estudo (SILVA; MAUÉS, 2021).

No Quadro 1 tem-se os princípios fundamentais e recomendações que sejam usados como orientação para decisões relacionadas ao planejamento de uma ACV, bem como para a sua condução.

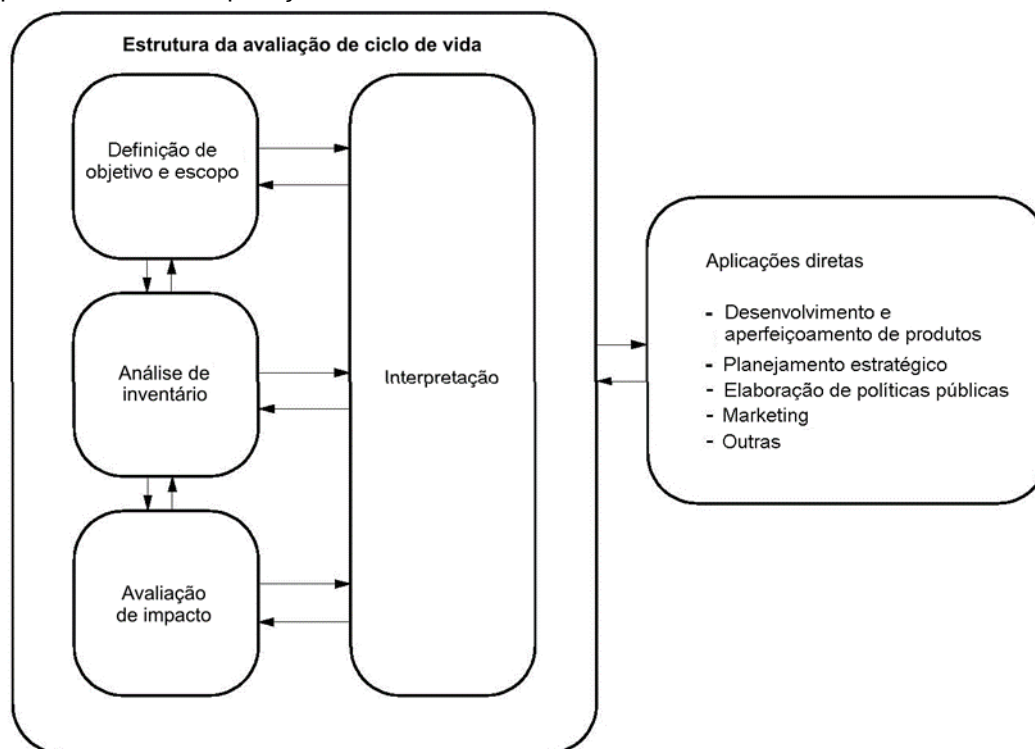
Quadro 1 – Princípios e recomendações da Avaliação do Ciclo de Vida.

Princípios	Características e recomendações
Perspectiva de ciclo de vida	A ACV abrange todo o ciclo de vida de um produto, considerando aspectos desde a extração e aquisição de matérias-primas, através da produção de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final enquanto resíduo ou nova matéria-prima. Com base nesse cenário e perspectiva sistemáticas, a transferência de cargas ambientais em potencial entre estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser identificada e, consequentemente, possivelmente evitada.
Foco ambiental	A ACV possui foco nos aspectos e impactos ambientais de um sistema de produto. Logo, os aspectos e impactos econômicos e sociais estão, tipicamente, fora do escopo da ACV. Entretanto, outras ferramentas podem ser combinadas com a ACV para avaliações mais abrangentes.
Abordagem relativa e unidade funcional	A ACV é uma abordagem relativa, estruturada em torno de uma unidade funcional. Em função dessa unidade funcional define-se o objeto de estudo. Por conseguinte, todas as análises subsequentes são relativas àquela unidade funcional, visto que todas as entradas e saídas de dados e, consequentemente, o perfil da análise dos impactos, estão relacionados à unidade funcional.
Abordagem iterativa	A ACV é uma técnica iterativa, visto que suas fases individuais utilizam os resultados das outras fases. Essa abordagem iterativa dentro e entre as fases contribui para a completeza e consistência do estudo e dos resultados relatados.
Transparência	Devido à inerente complexidade da ACV, a transparência é um princípio orientador importante na sua execução. Portanto, dessa maneira assegura-se uma interpretação adequada dos resultados.
Completeza	A ACV busca englobar todos os atributos ou aspectos do ambiente natural, da saúde humana e dos recursos. Isso permite um estudo com perspectiva que atravessa esses diferentes meios, tal que se pode identificar e avaliar potenciais compromissos.
Prioridade da abordagem científica	As decisões em uma ACV são preferencialmente embasadas nas ciências naturais. Entretanto, caso não exista uma base científica nem seja possível uma justificativa fundamentada em outras abordagens científicas ou convenções internacionais, as decisões podem, se apropriado, ser embasadas em escolha de valores.

Fonte: ABNT, 2009 (Adaptado).

A ACV é composta por três fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário e interpretação, conforme mostra a Figura 4, que se interagem. Observa-se que a partir da avaliação de impacto pode-se aplicar diretamente a ACV em diferentes áreas, inclusive na indústria da construção civil para desenvolvimento e aperfeiçoamento de materiais de construção civil.

Figura 4 - Estrutura para análise das fases da avaliação do ciclo de vida e suas possibilidades de aplicação.



Fonte: ABNT, 2009.

Tendo em vista que a ACV é um processo robusto e complexo que demanda o levantamento de uma base de dados, existe uma fase intermediária e envolve a compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. Essa fase do ACV é denominada de inventário do ciclo de vida (ABNT, 2009).

No inventário do ciclo de vida, que é a fase de estudo desta pesquisa, busca-se quantificar e compilar os dados sobre os poluentes que mais impactam o ciclo de vida de um produto ou processo (CHOWDHURY; APUL; FRY, 2010). Neste sentido, a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), estabelece que a elaboração do inventário do ciclo de vida envolve a coleta dos dados necessários para atender às metas do estudo definido, tal que é essencial um inventário de dados de entrada e saída em relação ao sistema em estudo.

2.4.2 Metodologia da avaliação do ciclo de vida

A primeira etapa da ACV é a definição do objetivo e escopo. Na definição do objetivo deve-se estabelecer a aplicação e justificar o motivo do estudo, enquanto na

definição do escopo é necessário instituir a fronteira do sistema, o nível de detalhamento e público-alvo do estudo (ABNT, 2009).

O aspecto fundamental na definição do escopo é determinar o sistema de produto e sua unidade funcional, cujos resultados da ACV são correlacionados. Assim, ao definir o escopo é preciso escolher os indicadores de impacto ambiental e a metodologia de quantificação, uma vez que isso subsidia a coleta de dados (SILVA *et al.*, 2016).

Para modelagem de um sistema de produto, é imperativo identificar todos os processos, com suas entradas e saídas. Os processos podem englobar extração e beneficiamento da matéria-prima, transportes, armazenamento, entre outras atividades. As entradas dos processos podem incluir matérias-primas, materiais auxiliares, água e energia, enquanto as saídas podem ser um produto, resíduos para tratamento e emissões para o ar, água e solo (LASVAUX *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016).

A segunda etapa da ACV é a fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV). Trata-se de um levantamento de dados de entrada e saída associados ao sistema em estudo. Nesta fase é feita a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo em questão (ABNT, 2009). A coleta de dados é em duas fontes: primário e secundário. Dados primários são obtidos diretamente nos locais de produção do sistema de produto e os dados secundários são obtidos em base de dados, devido impossibilidade de coleta de dados primários (SILVA *et al.*, 2016).

A terceira fase da ACV é a avaliação de impacto do ciclo de vida. Esta fase tem o objetivo de prover informações adicionais para auxiliar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto. A avaliação do impacto do ciclo de vida contribui para o melhor entendimento de sua significância ambiental, pois podem ser identificados processos que impactam significativamente no sistema (ABNT, 2009). Assim, ao identificar esses processos, pode-se fazer proposições de alternativas para mitigar o impacto ambiental do produto (LASVAUX *et al.*, 2015; THONEMANN; SCHULTE; MAGA, 2020).

A fase final do procedimento de ACV é interpretação do ciclo de vida. Nesta fase os resultados obtidos são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo (ABNT, 2009). Nesta etapa, convém comparar os resultados da ACV com estudos semelhantes, bem como analisar e estimar as incertezas do estudo. Além disso, é

necessário divulgar os resultados obtidos de forma transparente, incluindo o detalhamento da origem dos dados e procedimentos de cálculo (SILVA *et al.*, 2016).

Quando se trata de avaliação do ciclo de vida para tecnologias emergentes, como o desenvolvimento de produtos derivados de CAA, é necessária uma distinção adicional entre disponibilidade de dados em escala de laboratório e escala comercial prospectiva. A modelagem do sistema de primeiro plano em escala de laboratório depende principalmente de dados primários, como dados experimentais para o sistema observado. Além disso, é indispensável uma abordagem sistemática da estrutura do sistema de produto, tal que permita realizar comparações com outros sistemas e analisar as incertezas (THONEMANN; SCHULTE; MAGA, 2020).

2.4.3 Ciclo de vida dos cimentos álcali-ativados

A aplicação da ACV na construção civil remota à década de 1990, entretanto os estudos têm se intensificados nos últimos anos como objetivo de atender as políticas ambientais internacionais (LASVAUX *et al.*, 2015). Nesta perspectiva, investigações foram realizadas com o objetivo de avaliar o real impacto da incorporação de resíduos na construção civil (CHOWDHURY; APUL; FRY, 2010). Além disso, tem-se avaliado o real impacto ambiental do uso de CAAs na construção civil, especialmente quando se utiliza resíduos para desenvolvimento de material de construção (WEIL; DOMBROWSKI; BUCHWALD, 2009).

A ACV de produtos derivados de CAAs, como argamassas e concretos, são elaborados considerando o inventário do ciclo de vida de um produto desenvolvido em escala de laboratório ampliada para uma escala industrial. Para isso, são identificadas as matérias-primas e processos mais relevantes que contribuem para o desempenho ambiental dos CAAs. De modo geral, os resultados mostram que as contribuições do Potencial de Aquecimento Global de produtos derivados dos CAAs podem ser pelo menos 50% menor, quando comparado com o cimento Portland (SALAS *et al.*, 2018; DOLLENTE; TAN; PROMENTILLA, 2021).

Apesar de o potencial de aquecimento global dos produtos derivados de CAAs ser menor do que o concreto de cimento Portland, existem processos do inventário do ciclo de vida dos CAAs que podem afetar negativamente a sustentabilidade do produto (BAJPAI *et al.*, 2020). Entre esses processos, a produção de hidróxido de sódio é o

mais relevante, pois afeta de forma significativo o desempenho ambiental dos produtos derivados de CAA (SALAS *et al.*, 2018).

O hidróxido de sódio é utilizado tanto como ativador alcalino quanto matéria-prima para produção de silicato de sódio, o que influencia significativamente no inventário do ciclo de vida dos CAAs. O uso de silicato de sódio como ativador alcalino promove um aumento na energia incorporada e nas emissões de CO₂, visto que a produção desse insumo envolve a calcinação de quartzo com carbonato de sódio a uma temperatura média de 1450 °C (TEMPEST *et al.*, 2009; TURNER; COLLINS, 2013).

Neste sentido, há necessidade de se investigar soluções que minimizem a contribuição do hidróxido de sódio no inventário do ciclo de vida de produtos derivados de CAAs. Entre as alternativas, o uso de ativadores alcalinos tem-se se mostrado promissor, pois a produção de ativadores alternativos pode ser feita a partir de resíduos, em processos de temperaturas relativamente baixa e consumir pouca quantidade de hidróxido de sódio (MENDES *et al.*, 2020).

Mellado *et al.*, (2014) investigaram as emissões de CO₂ durante a produção de argamassa álcali-ativada preparado usando solução ativadora convencional a partir de NaOH e Na₂SiO₃ e compararam com as argamassas obtidas a partir solução ativadora alternativa. Essa solução ativadora foi obtida pelo refluxo de cinza de casca de arroz em solução de NaOH. A argamassa álcali-ativadas oriundas de ativador alcalino alternativo apresentou menor quantidade de emissão de CO₂, tal que foi 25% menor em relação à argamassa álcali-ativadas oriundas de ativador alcalino convencional e 63% em relação à argamassa de cimento Portland. Além disso, a substituição do ativador alcalino alternativo pelo convencional na preparação do das argamassas não promoveu redução significativa na resistência mecânica.

Passuelo *et al.* (2017) avaliaram os impactos do ciclo de vida de CAAs produzido a partir de um resíduo de lama de caulim com ativadores alcalinos convencional e alternativo. Os autores constataram que os CAAs produzidos com silicato de sódio convencional apresentaram os maiores impactos ambientais, além do potencial de aquecimento global onde os maiores impactos estão associados aos ligantes à base de cimento Portland. Todavia, ao realizar a comparação com o cimento Portland, os CAAs obtidos a partir de ativador alcalino alternativo derivado de uma cinza de casca de arroz apresentou menores impactos no ciclo de vida, com redução de mais 70% no potencial de aquecimento global.

Abdulkareem *et al.*, (2020) investigaram o impacto do uso de ativadores alcalinos obtidos a partir de cinza de casca de arroz e resíduo de vidro no ciclo de vida de argamassas álcali-ativadas. Quando comparado as argamassas álcali-ativadas produzidas a partir de ativadores alcalinos convencionais, as argamassas álcali-ativadas de ativador alcalino alternativo apresentaram redução de no mínimo 60% do potencial de aquecimento global, esgotamento de fósseis e acidificação terrestre. Os autores também constataram uma economia de custo de até 19% da argamassa álcali-ativada derivada de ativador alcalino alternativo em comparação com a argamassa álcali-ativada derivada de ativador alcalino convencional.

Bianco, Tomos e Vinai (2021) realizaram uma análise dos impactos ambientais do concreto álcali-ativados produzido a partir de ativadores alcalino convencional e alternativo que incorporou resíduo de vidro. Os autores constataram que o uso de alcalino alternativo, quando comparado com o convencional, permitiu uma redução significativa (em média 40%) nas categorias ambientais potencial de aquecimento global, acidificação e eutrofização.

Fernando *et al.*, (2021) analisaram o inventário do ciclo de vida de concreto álcali-ativado obtidos a partir de ativadores alcalinos convencional e alternativo. O ativador alcalino alternativo foi desenvolvido a partir de cinzas de casca de arroz. Os autores observaram que o ativador alcalino convencional contribui em mais 70% das emissões de CO₂ do inventário do ciclo de vida de concreto álcali-ativado. Assim, ao utiliza o ativador alcalino convencional, ocorreu uma redução média de 12% nas categorias ambientais potencial de aquecimento global e toxicidade da água doce e marinha.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente etapa da pesquisa, realizou-se uma revisão bibliográfica com o objetivo de esclarecer os principais conceitos relacionados aos CAAs e à avaliação do ciclo de vida. Foi possível constatar que os CAAs abrangem uma ampla gama de materiais denominados como álcali-ativados, cujo processo de produção depende da reação de álcali-ativação entre uma fonte rica em aluminossilicatos e um ativador alcalino.

Os resultados obtidos nesta revisão bibliográfica indicam que existe uma grande variedade de materiais, incluindo resíduos, que podem ser utilizados como

precursores e/ou ativador alcalino para produção dos CAAs. Todavia, os impactos ambientais dos CAAs somente podem mensurados por meio de um procedimento sistêmico e integral de Avaliação do Ciclo de Vida, o qual é normatizado por padrões internacionais. Com base nos resultados da ACV, é possível identificar pontos críticos do ciclo de vida de um produto, como os CAAs, e implementar medidas para reduzir seu impacto ambiental, promovendo a sustentabilidade ambiental.

Ademais, verificou-se que a substituição do ativador alcalino convencional por alternativos provenientes de resíduos se apresenta como uma oportunidade para aprimorar o processo de produção de CAAs e promover a sustentabilidade desse material de construção. A literatura científica aponta que os CAAs produzidos a partir de ativadores alcalinos alternativos apresentam propriedades semelhantes ou até mesmo superiores às dos CAAs produzidos com ativadores alcalinos convencionais. Isso sugere que os ativadores alternativos podem ser considerados uma alternativa técnica e ambientalmente viável para a produção de CAAs.

Assim, o uso de ativadores alternativos pode permitir uma gestão adequada de resíduos e contribuir para a redução da pegada de carbono do produto final. Entretanto, para a utilização de ativadores alcalinos alternativos na produção de CAAs, é necessário investigar dois aspectos importantes. Em primeiro lugar, é necessário avaliar uma metodologia adequada para a dissolução da sílica presente no resíduo durante o preparo do ativador alcalino. Em segundo lugar, é fundamental avaliar o ciclo de vida dos produtos desenvolvidos com CAAs produzidos a partir de ativadores alcalinos alternativos. A partir dessas investigações, torna-se possível atestar a viabilidade técnica e ambiental do uso de ativadores alcalinos alternativos para a produção de CAAs.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS

3.1 INTRODUÇÃO

Os cimentos álcali-ativados (CAAs) têm ganhado cada vez mais atenção como uma alternativa ao cimento Portland tradicional devido ao seu menor impacto ambiental e elevada resistência mecânica. Esses cimentos podem ser produzidos a partir de vários precursores, incluindo materiais residuais, como cinzas volantes, escória de alto-forno e lama vermelha, bem como pozolanas naturais, como o metacaulim (WU *et al.*, 2019). A utilização de materiais residuais na produção de CAAs tem sido extensivamente estudada, e tem sido demonstrado que esses materiais podem substituir efetivamente o cimento Portland, reduzindo as emissões de CO₂ e o consumo de recursos naturais, bem como promover a economia circular (PROVIS, 2017; NODEHI; TAGHVAEE, 2022).

No entanto, o uso de materiais residuais na produção de CAAs requer uma dosagem cuidadosa dos parâmetros envolvidos na reação de álcali-ativação. A quantidade de resíduo incorporado à matriz, a molaridade do ativador alcalino e as condições de cura, por exemplo, influenciam nas propriedades do produto final (SHILAR *et al.*, 2022). Portanto, é necessário investigar a dosagem adequada desses parâmetros, especialmente as relações químicas, para otimizar as propriedades dos CAAs produzidos a partir de resíduos (XIE *et al.*, 2020).

Em particular, o uso de lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), um resíduo do beneficiamento de água, como precursor de CAAs, tem sido estudado com resultados promissores (SANTOS *et al.*, 2019; JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; BOURZIK *et al.*, 2022). O LETA contém alumina e sílica amorfa, que é critério fundamental para a reação de álcali-ativação. A substituição parcial de LETA por metacaulim, uma pozolana natural, tem sido proposta para melhorar as propriedades do produto final (BERNAL *et al.*, 2016; LUHAR *et al.*, 2021; MAÑOSA *et al.*, 2021).

A concentração molar do ativador alcalino é outro parâmetro importante que influencia as propriedades dos cimentos ativados por álcali. Os ativadores alcalinos são tipicamente preparados usando uma solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio, e a molaridade desta solução pode afetar a cinética da reação de ativação alcalina, a resistência mecânica e a durabilidade do produto final (CASTILLO *et al.*, 2021; CASTILLO *et al.*, 2022; JINDAL *et al.*, 2022).

A caracterização e dosagem adequada dos precursores possui um papel crucial na reação de álcali-ativação e, por consequência, nas propriedades dos CAAs. Portanto, se faz necessário caracterizar tecnologicamente os precursores e investigar o efeito de diferentes proporções de LETA e metacaulim, assim como a molaridade do ativador alcalino, nas propriedades dos CAAs.

Neste sentido, objetivo desta seção é avaliar o potencial de uso do LETA e do metacaulim como precursores na produção de CAA. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas análises de caracterização térmica, química e física dos materiais. Além disso, foram avaliadas as propriedades dos CAAs produzidos pela substituição parcial do LETA pelo metacaulim, utilizando um ativador alcalino preparado com uma solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Materiais

3.2.1.1 Lodo de Estação de Tratamento de Água

Esse material foi obtido na forma aquosa (forma de lama) na Estação de Tratamento de Água (ETA) da Companhia de Água e Esgoto do Estado de Rondônia (CAERD) localizada na cidade de Porto Velho, Rondônia, Brasil, conforme mostra a Figura 5. Optou-se em usar esse resíduo para desenvolvimento dos CAAs devido sua disponibilidade local, conforme recomenda Luukkonen *et al.* (2018).

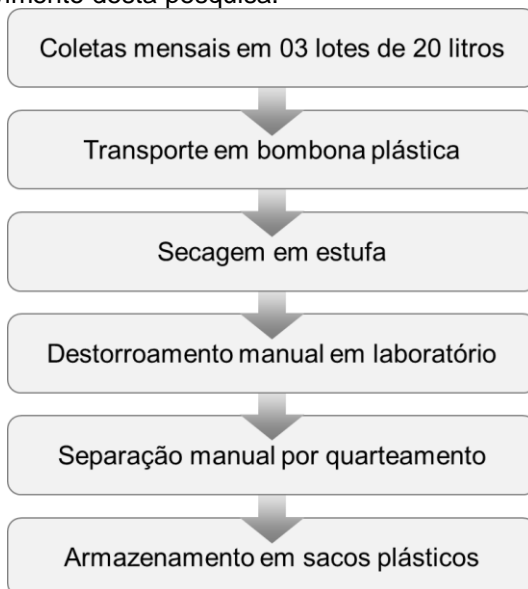
Figura 5 - Mapa de localização da ETA de Porto Velho, Rondônia, Brasil.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 6, tem-se o fluxograma da coleta e amostragem do resíduo. Ressalta-se que os procedimentos laboratoriais foram realizados nas instalações do Laboratório de Solos do Instituto Federal de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama.

Figura 6 - Fluxograma de coleta e amostragem do lodo de Estação de Tratamento de Água utilizado no desenvolvimento desta pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

Foram coletados em aproximadamente 60 litros de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), que foi seco em estufa à 105 °C em bandejas metálicas para eliminação de água e redução da umidade até que a massa ficasse constante. Posteriormente o LETA foi destorroado e cominuído com auxílio de almofariz e pistilo e, por fim, peneirado manualmente com auxílio de um pincel de modo a descartar as partículas com diâmetro superior a 150 µm.

Por fim, a amostragem do material foi realizada conforme orienta a norma NBR 16915 (ABNT, 2021), que estabelece os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua coleta e redução até o armazenamento e transporte das amostras representativas de agregados para concreto, destinadas aos ensaios de laboratório e contraprova. Para tanto, seguiram-se as orientações de amostragem por quarteamento, que consistiu em homogeneizar a amostra três vezes sobre uma lona plástica, em seguida dividir a pilha em quatro partes iguais e, por fim, agrupou-se das partes em diagonal. Ao final desse procedimento, amostras de 500 g foram acondicionadas em sacos plásticos para realizar o armazenamento.

O LETA foi calcinado a 750 °C por 3 horas no forno mufla do Laboratório de Resistência e Caracterização dos Materiais do Instituto Federal de Rondônia (IFRO),

Campus Porto Velho Calama. O forno mufla foi programado com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e as três horas de calcinação foi contabilizada apenas quando se atingiu a temperatura de 750 °C. Ao final do processo, o material ficou no forno mufla até o resfriamento.

Após a calcinação, constatou-se que LETA mudou de coloração de marrom escuro para avermelhado. Além disso, o LETA calcinado apresentou massa específica de 2,75 g/cm³, determinado por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, conforme prescreve a NBR 16605 (ABNT, 2017).

Com intuito de conhecer o comportamento térmico e confirmar a temperatura de calcinação, o LETA foi submetida as Análises Termogravimétrica (TG) e Térmica Diferencial (DTA). A partir da análise da curva do DTA foi analisado as temperaturas que ocorrem a combustão da carga orgânica do material, bem como a desidroxilação e estabilização da massa, tal que esses processos são um indicativo para temperatura adequada para calcinação. Complementarmente, utilizou-se a técnica de Difração de Raios X (DRX) antes e depois da calcinação do LETA.

Para avaliar o potencial de aplicação do material no desenvolvimento de matriz cimentícia, uma amostra do LETA foi analisado por meio da Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX).

3.2.1.2 Caulim

O caulim utilizado neste estudo foi doado pela Universidade Federal do Pará (UFPA) por meio do Laboratório de Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia de Materiais localizado no Campus de Ananindeua. Foram obtidos aproximadamente 10 kg de material, cuja amostragem foi realizada conforme os procedimentos descritos na norma NBR 16915 (ABNT, 2021). Para avaliar as características do material doado, primeiramente o material foi submetido as análises de TG e DTA, e em seguida, uma amostra de aproximadamente 10 g foi submetida a análises de FRX e outra para análises de DRX.

Ressalta-se que a partir da análise térmica do material, bem como das experiências desenvolvidas no grupo de pesquisa (SILVA *et al.*, 2022), o material foi submetido a calcinação a 750 °C por 3 horas a fim de se obter o metacaulim utilizado nesta pesquisa. Os parâmetros de programado da mufla foram os mesmos utilizados na calcinação do LETA.

Após a calcinação, constatou-se que material não sofreu alteração de coloração, permanecendo com cor branca. Além disso, o metacaulim apresentou massa específica de apresentou de 2,61 g/cm³, determinado por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, conforme prescreve a NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.2.1.3 Ativador alcalino

O ativador alcalino utilizado para dosagem dos CAAs foi obtido a partir da mistura de silicato de sódio alcalino e solução de hidróxido de sódio, ambos materiais da marca Kalim. O preparo do ativador alcalino foi realizado no Laboratório de Físico-Química do Instituto de Federal de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama.

O silicato de sódio foi obtido comercialmente em galões de 5 litros na forma líquida viscosa, inodoro de coloração incolor a levemente amarelado, cujas características fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do silicato de sódio alcalino da marca Kalim utilizado neste estudo para desenvolvimento de cimento álcali-ativado.

Características	Valores e unidades
Aparência	Líquido viscoso
Densidade a 25 °C	1,56 – 1,60 g/mL
Na ₂ O	14,60 – 15,20%
SiO ₂	32 – 34%
Relação SiO ₂ /Na ₂ O	2,15 – 2,40
Umidade	50,80 – 54,40%
Sólidos totais	46,60 – 49,20%
Viscosidade a 25 °C	900 – 1350 cP

Fonte: Kalim, 2022.

O hidróxido de sódio (NaOH) com 98% de pureza foi adquirido na forma de escamas em virtude da disponibilidade do material e usado com o objetivo de estabelecer o pH alcalino da solução ativadora, o que é fundamental para ocorrer a reação de álcali-ativação.

As quantidades de cada um dos materiais componentes utilizados no preparo do ativador alcalino estão descritas em detalhes na subseção 3.2.2, que trata sobre o planejamento experimental de dosagem dos CAAs.

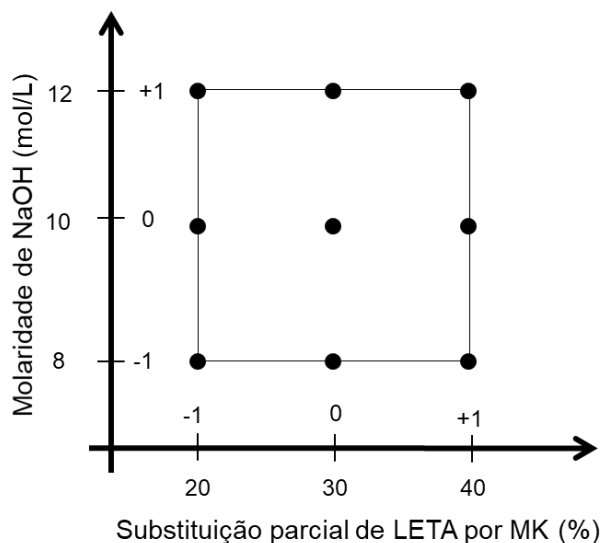
3.2.2 Planejamento experimental de dosagem dos cimentos álcali-ativados

Para desenvolvimento dos CAAs utilizou-se duas variáveis de mistura. A primeira foi a molaridade do ativador alcalino, pois esse fator influencia diretamente nas propriedades dos CAAs (CHEN *et al.*, 2016; LONGHI *et al.*, 2016). Dessa forma, adotou-se como variáveis de dosagem inicial a concentração molar da solução de NaOH entre 8 e 12, que foram determinados a partir de diversas pesquisas (CHEN *et al.*, 2021; FARHAN; JOHARI; DEMIRBOĞA, 2020; YOMTHONG *et al.*, 2021), que destacam a viabilidade de utilizar esse intervalo de concentrações dentro da faixa adotada para o processo de síntese de CAAs.

Outro fator adotado no planejamento experimental foi a substituição parcial em massa de LETA por metacaulim, visto que conteúdo do constituinte amorfo, que é ausente no LETA e presente no metacaulim, influenciam nas propriedades do produto final (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2015). Além disso, optou-se por avaliar a substituição parcial porque as tentativas de síntese de CAA 100% com LETA não enrijeceram, conforme foi desenvolvido por Jesus, Vieira e Vieira (2020). Com base no estudo de Mañosa *et al.* (2021), optou-se por utilizar uma substituição de LETA por metacaulim a partir de 20%, visto que os autores já encontraram resultados de resistência à compressão satisfatórios com essa proporção.

Para avaliar a propriedade de resistência à compressão adotaram-se as molaridades da solução ativadora de hidróxido de sódio variando em 8, 10 e 12, enquanto a substituição parcial em massa de LETA por metacaulim (MK) foram 20, 30 e 40%. Portanto, tem-se um planejamento fatorial com duas variáveis e três diferentes níveis (3^2), conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Planejamento fatorial com duas variáveis e três níveis utilizada neste estudo para determinar a dosagem do cimento álcali-ativado com substituição parcial de LETA por MK.



Fonte: Autor, 2023.

Para cada ponto de dosagem foram realizadas três repetições (triplicatas), no qual foram produzidas nove diferentes dosagens e um total de 27 corpos de provas. A análise estatística, bem como a geração de gráficos de superfície, foi feita no software RStudio para verificação de interação entre os fatores e suas significâncias por meio da ANOVA e estabelecimento de um modelo de regressão linear múltipla. Para tanto, utilizou-se como parâmetro um intervalo de confiança de 95% e nível de significância de $\alpha = 0,05$, tal que se o p-valor calculado for menor que o valor de α , deve-se rejeitar a hipótese nula.

Na Tabela 2 tem-se a composição em massa de cada componente utilizado para desenvolvimento dos CAAs, no qual se observa que a substituição parcial de LETA por metacaulim foi realizada em massa.

Tabela 2 - Composição em massas dos componentes utilizados para dosagem dos cimentos álcali-ativados utilizados no planejamento experimental.

Dosagens	LETA (g)	Metacaulim (g)	NaOH (g)	Na₂SiO₃ (g)	Água destilada (g)
CAA20M8	80	20	8,64	92	27,0
CAA20M10	80	20	8,64	92	21,6
CAA20M12	80	20	8,64	92	18,0
CAA30M8	70	30	8,64	92	27,0
CAA30M10	70	30	8,64	92	21,6
CAA30M12	70	30	8,64	92	18,0
CAA40M8	40	60	8,64	92	27,0
CAA40M10	40	60	8,64	92	21,6
CAA40M12	40	60	8,64	92	18,0

Fonte: Autor, 2023.

Quanto a nomenclatura adotada na dosagem, observa-se que o CAA que possui substituição parcial de 20% de LETA por metacaulim e ativador alcalino de molaridade 8 foi denominado de CAA20M8 e o CAA que possui substituição parcial de 20% de LETA por metacaulim e ativador alcalino de molaridade 10 foi denominado de CAA20M10. Já o CAA que possui substituição parcial de 20% de LETA por metacaulim e ativador alcalino de molaridade 12 foi denominado de CAA20M12. E assim, sucessivamente alternando-se a substituição parcial e molaridade do ativador alcalino a base de NaOH.

3.2.3 Preparo das pastas de cimento álcali-ativado

As pastas de CAA foram preparadas no Instituto Federal de Rondônia (IFRO) no Laboratório de Resistência dos Manterias do Campus Porto Velho Calama, conforme os seguintes procedimentos adaptados de Jesus (2018). Primeiramente mediu-se o silicato de sódio em um béquer plástico em massa usando uma balança com precisão de duas casas decimais. Em seguida, preparou-se a solução de hidróxido de sódio em béquer plástico de capacidade de 400 mililitro utilizando-se água destilada. Ambas soluções foram previamente misturadas antes de depositar a parte sólida previamente misturada: LETA e metacaulim. Por fim, para realizar a mistura foi utilizada uma batedeira planetária de potência de 600 W, que ficou

acionado por um período de três minutos para haver a completa homogeneização da pasta.

Após homogeneizada, a pasta de CAA foi depositada em moldes cilíndricos de PVC com 50 mm de altura e 25 mm de diâmetro, que possuem um suporte de madeira, conforme mostra a Figura 8. Optou-se em utilizar corpos de provas de tamanhos reduzidos tendo em vista a limitação da quantidade de material e se tratar de uma prática corrente já utilizadas em diversos estudos sobre materiais álcali-ativados (AZEVEDO *et al.*, 2019; DARMAWAN *et al.*, 2014; GRAYTEE; SANJAYAN; NAZARI, 2018).

Figura 8 - Moldes cilíndricos de PVC com suporte de madeira utilizados para confecção dos corpos de prova de cimento álcali-ativado.



Fonte: Autor, 2023.

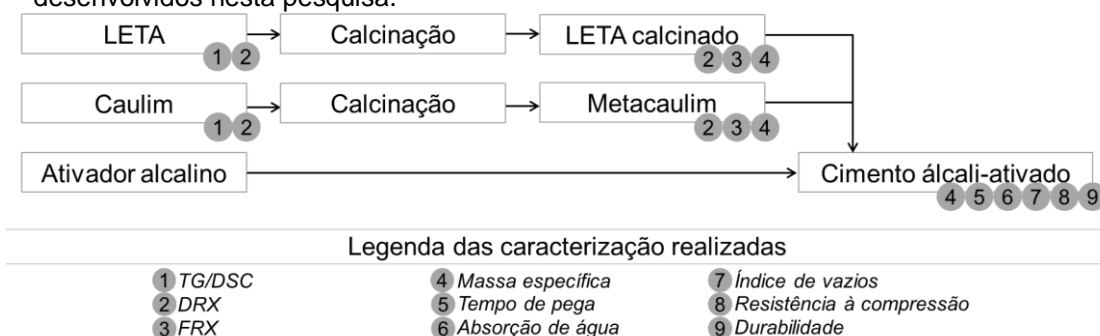
Após a deposição da pasta nos moldes, realizou-se o adensamento utilizando um agitador eletromecânico de peneira na frequência de 60 Hz. Para isso, o suporte dos moldes cilíndricos foi apoiado sobre o agitador pelo intervalo de dois minutos para garantir o adensamento da pasta cimentícias, bem como a saída de eventuais bolhas de ar presente na pasta.

Os corpos de provas foram desmoldados após 24 h de cura e submetido ao ensaio de compressão aos 28 dias. A cura ocorreu em condições ambientais normais de temperatura local do laboratório à 25 ± 5 °C e umidade relativa inicial de 60 ± 5 %. Antes de realizar o ensaio de compressão, os corpos de provas foram retificados manualmente com lixa de número 150, para deixar a superfície plana, tal que a planicidade dos corpos de provas foi avaliada utilizando uma placa de vidro.

3.2.4 Ensaios de caracterização

Foram realizados uma série de ensaios para caracterizar tantos os materiais precursores quanto os CAAs desenvolvidos experimentalmente neste estudo, conforme ilustra o fluxograma da Figura 9.

Figura 9 - Ensaios de caracterização dos materiais e cimentos álcali-ativados desenvolvidos nesta pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

O Quadro 2 resume os ensaios de caracterização realizados nesta etapa, bem como as referências consultadas.

Quadro 2 - Resumos dos ensaios de caracterização realizados com as respectivas referências utilizadas.

Ensaios	Referências
Comportamento térmico - TG/DSC	-
Difratometria – DRX	-
Composição química - FRX	-
Massa específica	NBR 9778 (ABNT, 2005).
Tempo de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Absorção de água e índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2005)
Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)
Durabilidade por ciclos de saturação e secagem	HORPIBULSUK <i>et al.</i> , (2016)

Fonte: Autor, 2023.

Encontra-se no Apêndice A o programa dos ensaios de caracterização com os detalhes dos procedimentos realizados, no qual constam também os parâmetros utilizados, equipamentos e demais informações.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

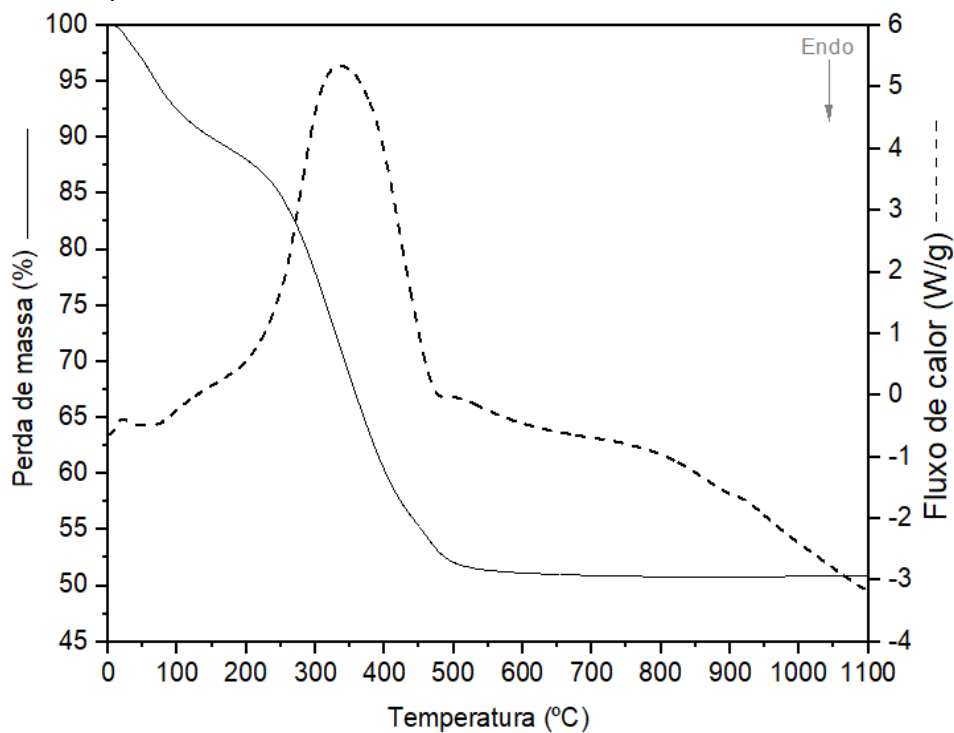
3.3.1 Caracterização dos materiais

3.3.1.1 Lodo de Estação de Tratamento de Água

Na Figura 10 tem-se o resultado do comportamento térmico do LETA, no qual se observa na curva de perda de massa (TG) uma redução de 48,23% da massa.

Além disso, observa-se a decomposição inicial de 11,09%, típica de evaporação de água livre que vai até aproximadamente 150 °C; em seguida outra decomposição de massa de 37,94% em até 500 °C, que decorre da combustão da carga orgânica presente na amostra; e já a partir de 700 °C ocorre a estabilização da perda de massa.

Figura 10 - Comportamento térmico do lodo de Estação de Tratamento de Água utilizados neste estudo para desenvolvimento de cimento álcali-ativado.



Fonte: Autor, 2023.

Na curva de DTA observa-se um evento exotérmico, que correspondente a oxidação da matéria orgânica, com pico em cerca de 350 °C. Com base comportamento estável da curva de perda de massa indicando a estabilidade das transformações e no estudo de Jesus, Vieira e Vieira (2020), decidiu-se por realizar a calcinação do material à 750 °C por um período de 3 horas, com taxa de aquecimento de 10 °C por minuto.

Na Tabela 3 apresenta a composição química expressas em quantidade percentual de óxidos presentes no LETA após a calcinação. Observa-se que o material é composto majoritariamente (94,97%) por óxidos de ferro, silício e alumínio. Considerando-se que a composição química do LETA calcinado apresenta alta concentração de Al_2O_3 e SiO_2 , infere-se que o material é apropriado para a produção de CAAs, conforme defendem diversos autores (SANTOS *et al.*, 2019; JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; LUHAR *et al.*, 2021; BOURZIK *et al.*, 2022).

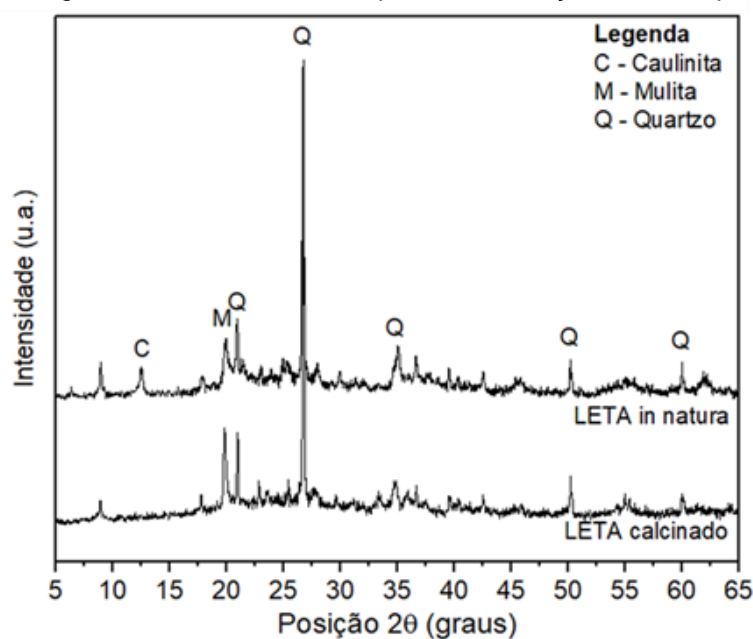
Tabela 3 - Composição química do LETA calcinado em quantidade percentual de óxidos.

Óxidos	Quantidade (%)
SiO ₂	44,25
Al ₂ O ₃	40,19
Fe ₂ O ₃	10,53
CaO	0,31
TiO ₂	0,78
K ₂ O	1,16
P ₂ O ₅	0,55
Outros	2,23

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 11 tem-se o difratograma do LETA antes da calcinação e após a calcinação, cujos picos representativos são dados por predominantemente por quartzo e caulinita. Por meio da comparação dos difratogramas do material natural e calcinado, pode-se constatar uma diminuição na intensidade dos picos cristalinos de caulinita após a calcinação no LETA. O referido resultado evidencia a transmissão do processo de calcinação empregado neste estudo na modificação da estrutura cristalina dos materiais, tendo em vista a transformação de um material com picos cristalinos em outro com presença residual apenas de picos cristalinos de quartzo.

Figura 11 - Difratograma do LETA antes e depois da calcinação a 750 °C por 3 horas.



Fonte: Autor, 2023.

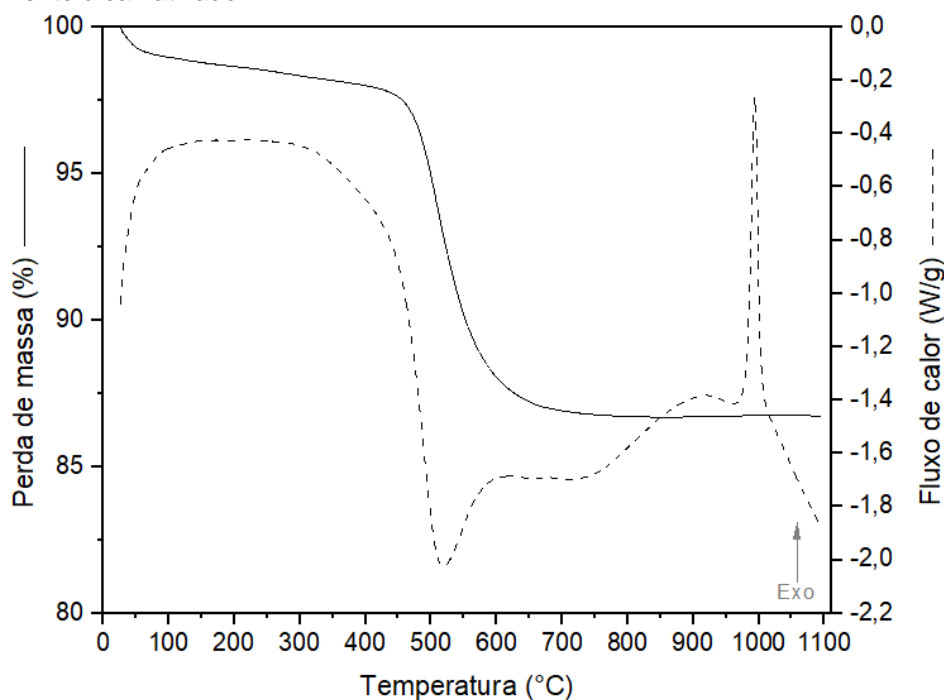
Nos difratogramas do LETA encontram-se picos residuais de mulita ($2\theta = 20,8^\circ$) e quartzo em diversas posições. Entretanto, o pico de caulinita não está presente no material calcinado. Essas informações obtidas a partir dos difratogramas do LETA são compatíveis com os dados disponíveis na literatura (SANTOS *et al.*, 2019; GODOY *et al.*, 2020).

Ao avaliar a propriedade física do LETA calcinado, constatou que o material apresentou massa específica de $2,75 \text{ g/cm}^3$, o que está de acordo com valores apontados pela literatura científica (HORPIBULSUK *et al.*, 2016).

3.3.1.2 Caulim

Na Figura 12 tem-se o resultado do comportamento térmico do caulim, no qual se observa na curva de perda de massa (TG) uma redução de 13,38% da massa. Além disso, observa-se a decomposição inicial de 1,31%, típica de evaporação de água livre que vai até aproximadamente 150°C ; em seguida outra decomposição de massa de 11,97 em até 700°C , que decorre da desidroxilação da amostra; e já a partir de 850°C ocorre a estabilização da perda de massa.

Figura 12 - Comportamento térmico do caulim utilizado neste estudo para desenvolvimento de cimento álcali-ativado.



Fonte: Autor, 2023.

Na curva de DTA observa-se dois eventos térmicos característicos do caulim, conforme já descrito por Huang *et al.* (2019). O primeiro evento é endotérmico e ocorre com pico em aproximadamente 520 °C, decorrente da perda de água estrutural da amostra e, conseqüentemente, transformação do caulim em metacaulim. Já o segundo evento, é exotérmico e possui pico em cerca de 995 °C, indicando que o minério de caulim pode ter mudado para espinélio de sílica alumina e mulita.

Na Tabela 4 apresenta a composição química expressas em quantidade percentual de óxidos presentes no metacaulim. Observa-se que o material é composto majoritariamente (96,32%) por óxidos de ferro, silício e alumínio.

Tabela 4 - Composição química do metacaulim em quantidade percentual de óxidos.

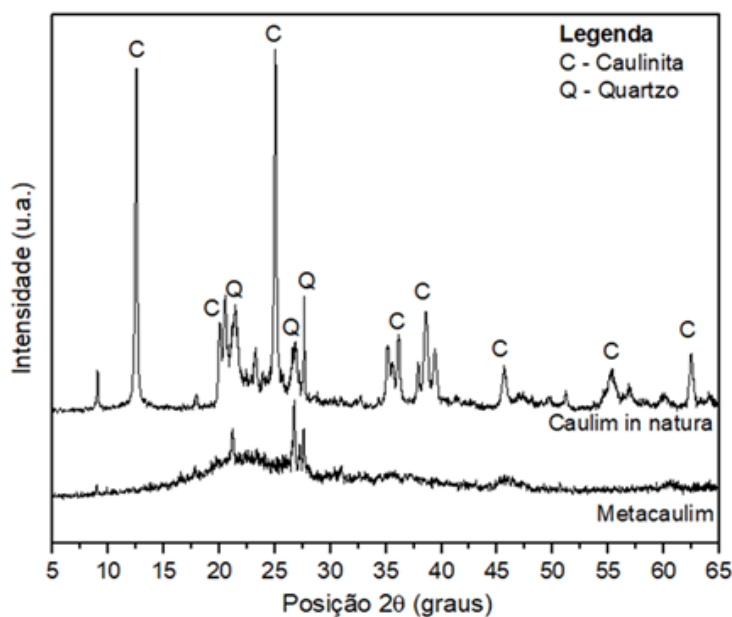
Óxidos	Quantidade (%)
SiO ₂	51,68
Al ₂ O ₃	43,56
Fe ₂ O ₃	1,08
CaO	0,09
TiO ₂	1,11
K ₂ O	0,15
P ₂ O ₅	0,32
Outros	2,01

Fonte: Autor, 2023.

Considerando-se que a composição química do metacaulim apresenta elevada concentração de Al₂O₃ e SiO₂, estima-se que o material é adequado para a produção de CAAs, conforme defendem diversos autores (ZHANG *et al.*, 2016; RAKHIMOVA; RAKHIMOV, 2019; LI *et al.*, 2023).

Na Figura 13 tem-se o difratograma do caulim antes da calcinação e após a calcinação, cujos picos representativos são dados por predominantemente por quartzo e caulinita. A partir da comparação dos difratogramas do material natural e calcinado, observa-se uma redução na intensidade dos picos cristalinos de caulinita após a calcinação, bem como a formação de amorfismo. Portanto, esse resultado evidencia que calcinação foi eficaz para modificar a estrutura cristalina dos materiais, tendo em vista a transformação de um material com picos cristalinos em outro com presença residual apenas de picos cristalinos de quartzo.

Figura 13 - Difratogramas do caulim antes e depois da calcinação a 750 °C por 3 horas.



Fonte: Autor, 2023.

Os difratogramas do caulim estão congruentes com resultados obtidos na literatura (PEREIRA *et al.*, 2018; NANA *et al.*, 2020), o qual é possível observar um halo de amorfismo em torno de $2\theta = 22,4^\circ$. A presença de halo de amorfismo do metacaulim indica que o material sofreu desidroxilação resultando em um material com característica amorfa e, conseqüentemente, mais reativo com potencial que favorece a reação de álcali-ativação (GHANI *et al.*, 2021).

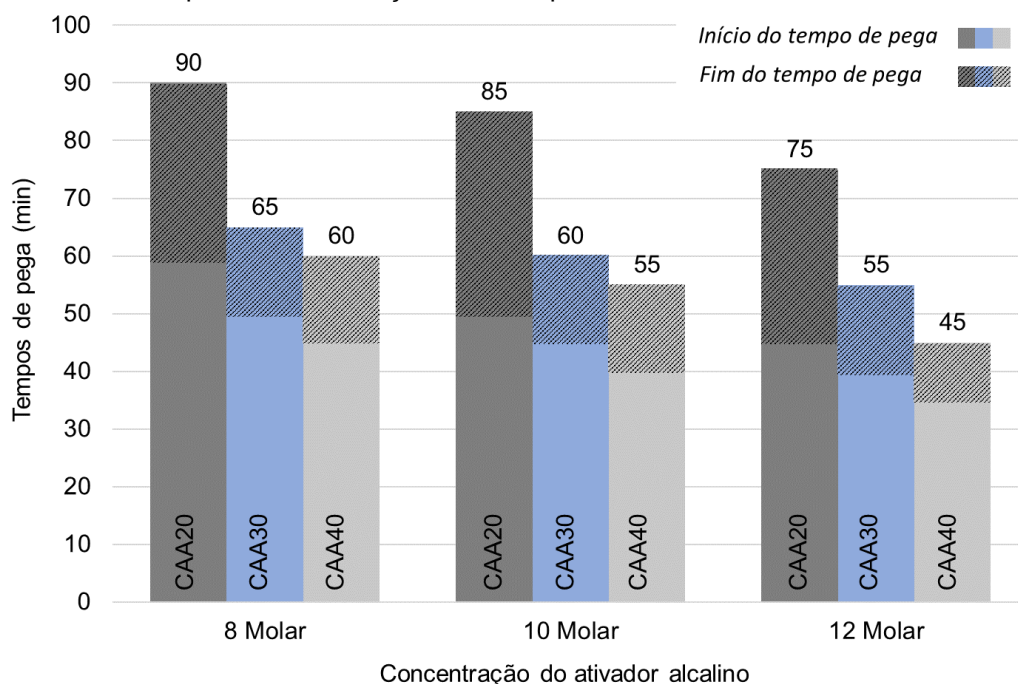
Ao avaliar a propriedade física do LETA calcinado, constatou-se que o material apresentou massa específica de 2,61 g/cm³, o que está de acordo com valores apontados pela literatura (MURRAY, 2006).

3.3.2 Caracterização dos cimentos álcali-ativados

3.3.2.1 Tempo de pega

Na Figura 14 tem-se o gráfico dos tempos de pegadas dos CAAs desenvolvidos em função da variação da substituição parcial e da molaridade do ativador alcalino. Observa-se que os tempos de pegadas são extremamente curtos em relação a pasta de cimento Portland (ABNT, 2018), que é estimado em 60 e 600 minutos para início e fim de pega, respectivamente. Entretanto, esses valores já eram esperados, visto que os CAAs possuem tempo de pega rápido, conforme relatado pela literatura (XIE *et al.*, 2019; JESUS; VIEIRA, VIEIRA, 2020).

Figura 14 - Resultados de início e fim de pega para os cimentos álcali-ativados desenvolvidos a partir da substituição de LETA por metacaulim.



Fonte: Autor, 2023.

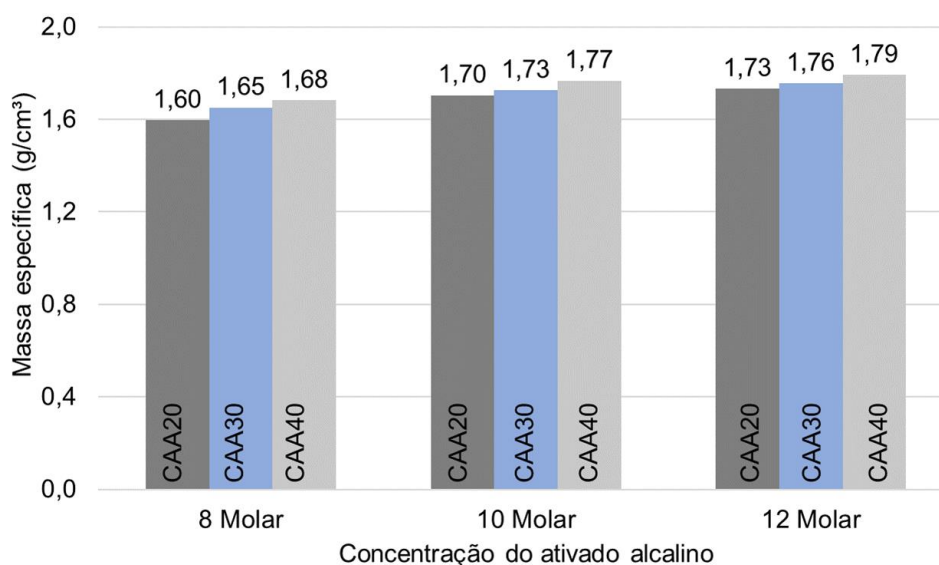
No que se refere à substituição parcial, constata-se que a quantidade de LETA empregada exerce influência sobre o tempo de pega das massas de CAA. Observe que, à medida que se elevou o teor de substituição parcial da LETA por metacaulim, os tempos de início e fim de pega decresceram gradativamente, conforme já constatado por Hwang *et al.* (2016). Segundo Istuque *et al.* (2019), a adição de resíduo promove um efeito retardador no processo de endurecimento de CAAs, pois se estima que os íons de ferro presente no resíduo propiciam um efeito retardador na cristalização de géis em fases zeólitas durante o processo de enrijecimento.

Quanto a molaridade do ativador alcalino, constatou-se que os tempos de pegas reduziram gradativamente em função do aumento das concentrações molares. Isso se deve, porque o aumento de álcalis, dado na forma de aumento na concentração molar de NaOH, aceleram a dissolução dos íons de Si^{4+} e Al^{3+} que, por sua vez, afeta o processo de nucleação (TOPARK-NGARM; CHINDAPRASIRT; SATA, 2015). Neste contexto, o aumento da concentração molar do ativador alcalino promove a redução do tempo de pega dos CAAs, quando comparado com às composições produzidas a partir de ativadores alcalinos com menores concentrações molares de NaOH.

3.3.2.2 Massa específica

Na Figura 15 tem-se o gráfico com as massas específicas das pastas dos CAAs desenvolvidos neste estudo, no qual se observa ambas variáveis de estudo (substituição parcial de LETA por metacaulim e molaridade do ativador alcalino) influenciam nas massas específicas das pastas dos CAA, cuja formulação CAA40M12 apresentou maior valor ($1,79 \text{ g/cm}^3$).

Figura 15 – Massas específicas dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos a partir da substituição de LETA por metacaulim.



Fonte: Autor, 2023.

Apesar de as massas específicas não apresentarem grandes variações, observa-se que ocorreu um aumento gradual a partir substituição parcial de LETA por metacaulim, bem como a partir do aumento da concentração molar. Estima-se que isso se deva especialmente ao aumento da proporção de material amorfo disponível (ao aumentar a proporção de metacaulim) e a quantidade de hidróxido de sódio no ativador alcalino, que ocasionam maior densificação da matriz cimentícia.

Embora as massas específicas não tenham apresentado grandes variações, ocorreram aumentos gradativos com o aumento da substituição parcial de LETA por metacaulim e da concentração molar. Acredita-se que isso se deve, sobretudo, ao aumento da proporção de material amorfo disponível (com o aumento da proporção de metacaulim) e à quantidade de hidróxido de sódio presente no ativador alcalino, que promove maior densificação da matriz cimentícia, conforme já observado por Rashidian-Dezfouli e Rangaraju (2017). Isso ocorrem, segundo Abdullah *et al.*, (2021), pelo fato da elevada concentração molar da solução de NaOH promove maior

processo de dissolução a partir da lixiviação da sílica e da alumina, contribuindo para o aumento da reação de precipitação e condensação das espécies químicas envolvidas e densificação da matriz.

3.3.2.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica real

Na Tabela 5 tem-se os resultados das propriedades físicas de absorção de água, índice de vazios e massa específica real dos CAAs desenvolvidos neste estudo com a substituição parcial de LETA por metacaulim.

Tabela 5 - Resultados das propriedades físicas dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos a partir da substituição de LETA por metacaulim.

Dosagens	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica real (g/cm³)
CAA20M8	21,84%	36,12%	1,65
CAA20M10	22,90%	36,88%	1,61
CAA20M12	23,94%	37,16%	1,55
CAA30M8	19,63%	33,18%	1,69
CAA30M10	22,56%	36,70%	1,63
CAA30M12	23,33%	37,38%	1,60
CAA40M8	18,81%	32,28%	1,72
CAA40M10	19,38%	32,44%	1,67
CAA40M12	23,35%	38,41%	1,64

Fonte: Autor, 2023.

Verifique-se que a substituição parcial de LETA por metacaulim, juntamente com o aumento da faixa de concentração molar do ativador alcalino, influenciaram positivamente no incremento progressivo da massa específica real dos CAAs. Além disso, observe-se uma tendência crescente do índice de vazios, o que pode explicar a absorção elevada de água dos corpos de prova, evidenciando uma porosidade expressiva na amostra.

Considerando a concentração molar do ativador alcalino, observou-se que o aumento na concentração de NaOH resultou na formação de um maior índice de vazios nos CAAs, o que contribuiu para um aumento da absorção de água e redução da massa específica real (SHILAR *et al.*, 2022). Este comportamento também já foi descrito por Luna-Galiano, Fernández-Pereira e Izquierdo (2016), que relataram que

materiais álcali-ativados apresentam maior porosidade e diâmetros médios de poros maiores conforme há um aumento na concentração molar do ativador alcalino.

Quanto a substituição parcial de LETA por metacaulim, consta-se que o aumento da quantidade de metacaulim na dosagem dos CAAs promove redução da absorção de água e consequentemente aumento da massa específica real. Observa-se que os CAAs possuem uma elevada absorção de água relativa (SHILAR *et al.*, 2022). Isso pode ter decorrido devido ao processo de álcali-ativação incompleto, resultante em maiores vazios na matriz dos CAAs (ALBITAR *et al.*, 2017). Em consequência disso, Gomes *et al.*, (2019b) apontam que o aumento da quantidade de metacaulim, em relação ao LETA, promove uma diminuição da porosidade dos CAAs, devido à natureza química dos precursores.

Verifica-se que o aumento da quantidade de LETA na dosagem dos CAAs afetou a porosidade do produto final em termos de índice de vazios. Isso pode ser explicado pela presença de uma maior quantidade de material inerte no LETA, que não contribui efetivamente na formação das estruturas tetraédricas ou favorece a formação de produtos secundários. A quantidade de vazios nos CAAs é influenciada pela relação entre a quantidade de material reativo (amorfo) e a quantidade de material inerte presente na mistura. Aumentando a quantidade de material inerte oriundo de resíduos, como no caso, aumento da quantidade de LETA na dosagem, há uma tendência de aumento do índice de vazios e redução da massa específica dos CAAs (ISTUQUE *et al.*, 2019; HAMDANE *et al.*, 2020; KANKIA *et al.*, 2021).

3.3.2.4 Resistência à compressão

Na Tabela 6 estão dispostos os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos neste estudo.

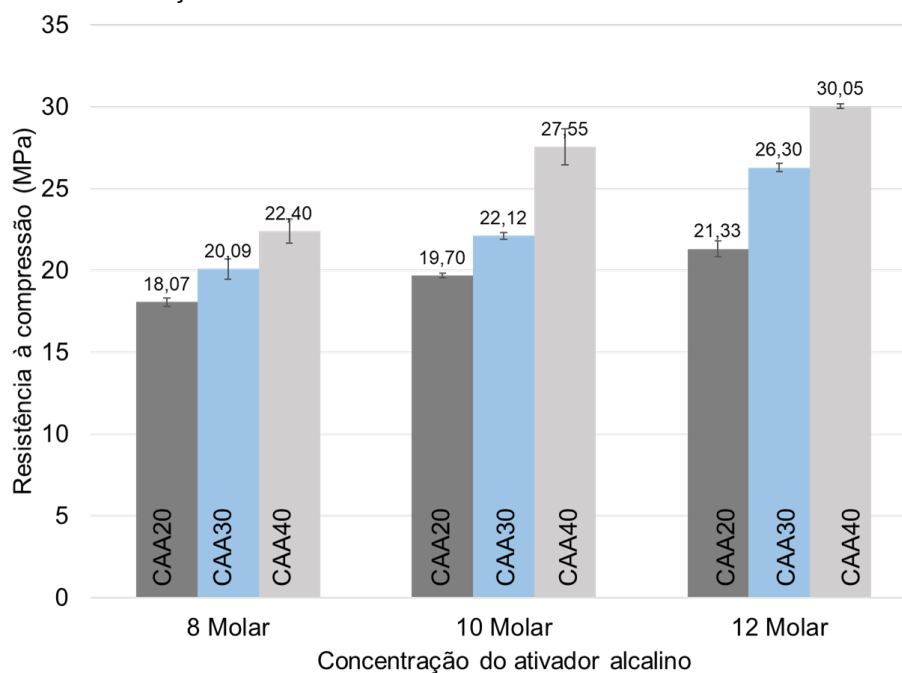
Tabela 6 - Resultado da resistência à compressão dos corpos de prova dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos a base de LETA e metacaulim.

Dosagens	Resistência à compressão (MPa)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Des.Pad.
CAA20M8	17,79	18,13	18,29	18,07	0,26
CAA20M10	19,74	19,81	19,54	19,70	0,14
CAA20M12	20,79	21,70	21,49	21,33	0,48
CAA30M8	20,40	20,05	19,37	20,09	0,63
CAA30M10	22,28	21,87	22,21	22,12	0,22
CAA30M12	26,35	26,51	26,03	26,30	0,24
CAA40M8	23,14	21,68	22,38	22,40	0,73
CAA40M10	28,81	26,72	27,13	27,55	1,11
CAA40M12	30,05	30,19	29,92	30,05	0,14

Fonte: Autor, 2023.

A Figura 16 apresenta o gráfico da resistência média à compressão dos CAAs desenvolvidos neste estudo, evidenciando uma tendência de aumento da resistência com o aumento da substituição parcial de LETA por metacaulim e da molaridade do ativador alcalino.

Figura 16 - Gráfico de resistência média à compressão dos corpos de prova dos cimentos álcali-ativados com substituição parcial de LETA por metacaulim produzidos com diferentes concentrações de ativador alcalino.



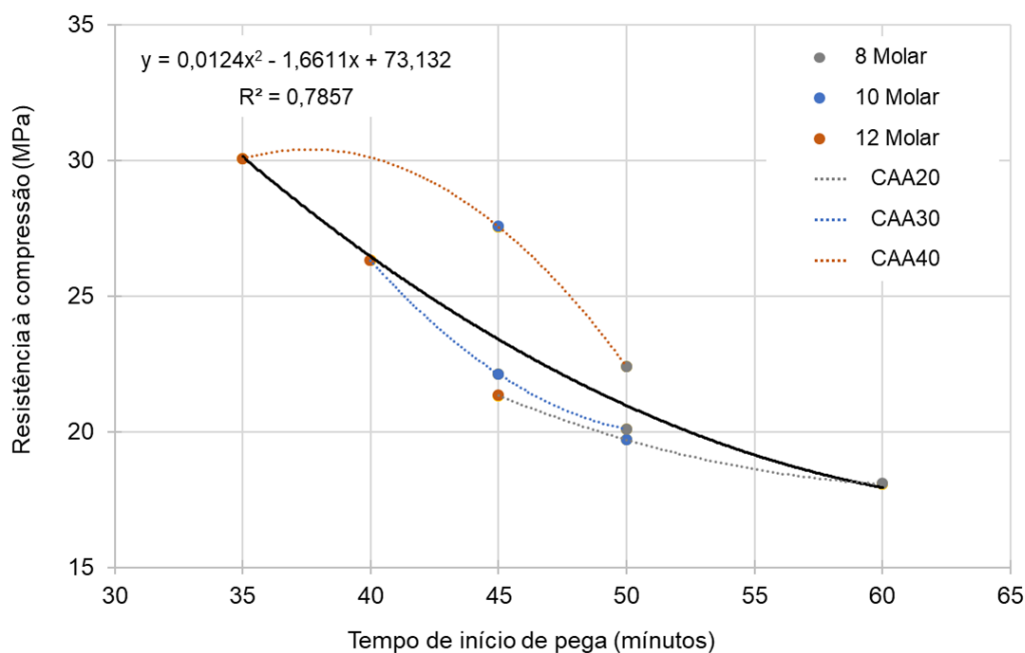
Fonte: Autor, 2023.

Verifica-se que a dosagem CAA40M12 apresentou a maior resistência à compressão (30,05 MPa), representando um aumento de 66,29% em relação à dosagem CAA10M8, que apresentou a menor resistência. Esses resultados indicam que a substituição parcial de LETA por metacaulim tem um impacto significativo na resistência à compressão dos CAAs. Essa observação está em concordância com a literatura, que aponta para uma relação inversa entre a quantidade de resíduo na dosagem de CAAs e a resistência à compressão obtida (NIE *et al.*, 2016; GOMES *et al.*, 2019b; BOURZIK *et al.*, 2022).

Além disso, independentemente da quantidade de substituição parcial, nota-se um aumento de mais de 23% da resistência à compressão dos CAAs ao aumentar a molaridade do ativador alcalino. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato de ao se aumentar molaridade de NaOH na dosagem dos CAAs, aumenta-se a quantidade de íons hidroxila disponíveis para reagir com os componentes da mistura, promovendo uma maior formação de ligações Si-O-Al e Si-O-Si. Essas ligações são responsáveis pela formação estrutural do material e sua resistência mecânica (HAMIDI; MAN; AZIZLI, 2016; NIE *et al.*, 2016; ABDULLAH *et al.*, 2021; SHILAR *et al.*, 2022).

Quando se correlaciona os resultados de resistência à compressão com os respectivos tempos de início de pega das dosagens desenvolvidas, é possível observa-se que as dosagens com maior substituição parcial de LETA por metacaulim e maior concentração molar apresentam menores tempos de início, bem como maior resistência à compressão, conforme mostrado na Figura 33. Portanto, independente da molaridade do ativador alcalino e da substituição parcial de LETA por metacaulim, estima-se que 78,57% ($R^2=0,7857$) da variação de resistência à compressão dos geopolímeros pode ser explicada pelo tempo de início de pega.

Figura 17 - Correlação entre tempo de início de pega e a resistência média à compressão dos cimentos álcali-ativados em função da substituição parcial de LETA por metacaulim.

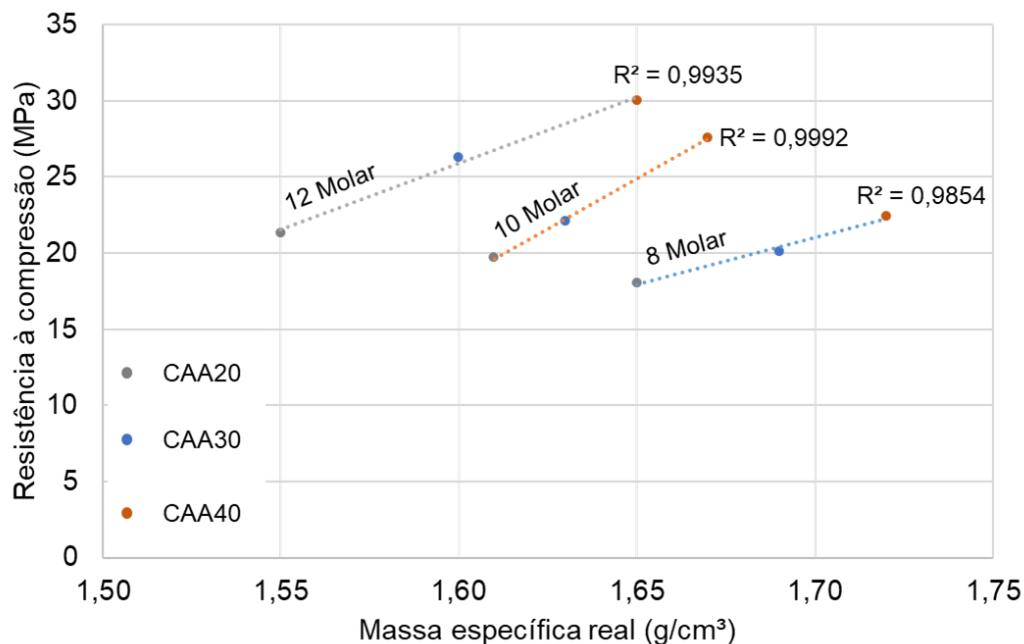


Fonte: Autor, 2023.

Nota-se ainda que quanto maior a substituição parcial de LETA por metacaulim (CAA40), menor tende ser o tempo de pegar e maior a resistência à compressão. Isso se deve ao aumento da quantidade de metacaulim na dosagem, que possui maior quantidade de espécies químicas reativas para precipitação em comparação com o LETA, favorecendo o enrijecimento das pastas de CAA (PANGDAENG *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2019).

Ao correlacionar a massa específica real com a resistência à compressão dos CAAs, verificou-se que a concentração molar do ativador alcalino influencia ambas as propriedades, conforme evidenciado na Figura 18. Nota-se que, independentemente da substituição parcial de LETA por metacaulim, pelo menos 98,54% ($R^2=0,9854$) da variação na resistência à compressão pode ser explicada pela variação na massa específica para dosagens com a mesma concentração de ativador alcalino.

Figura 18 - Correlação entre massa específica real e a resistência média à compressão dos cimentos álcali-ativados em função da molaridade do ativador alcalino a base de NaOH.



Fonte: Autor, 2023.

De acordo com Abdullah *et al.* (2021), a resistência à compressão dos CAAs é afetada por mudanças no produto da reação, partículas residuais e estrutura dos poros do material. Em particular, a estrutura dos poros tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas do material e na massa específica real. Portanto, a concentração de hidróxido de sódio na solução do ativador alcalino pode afetar significativamente as propriedades dos CAAs. Uma baixa concentração pode resultar na limitação da ativação dos precursores sólidos, o que pode levar a uma baixa resistência à compressão e uma menor massa específica real. Isso ocorre porque o volume intersticial não é completamente preenchido pelos géis precipitados formados durante a reação de álcali-ativação.

3.3.2.5 Durabilidade

A Tabela 7 apresenta-se o resultado do ensaio de durabilidade dos CAAs avaliados por meio de ciclos de saturação e secagem. Nesta tabela são apresentadas as resistências médias à compressão (RES) e seus respectivos desvios padrão (DP), ambos em MPa.

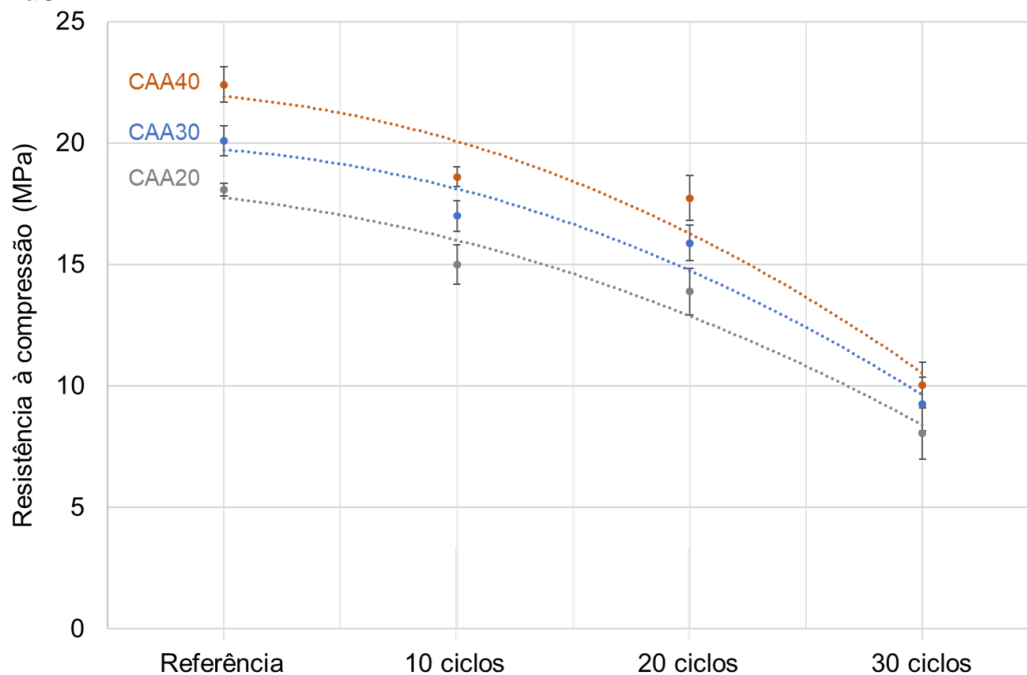
Tabela 7 - Influência dos ciclos saturação e secagem na resistência média à compressão dos cimentos álcali-ativados obtidos a partir da substituição parcial de LETA por metacaulim e com diferentes concentrações de NaOH do ativador alcalino.

Dosagens	Referência		10 ciclos		20 ciclos		30 ciclos	
	RES	DP	RES	DP	RES	DP	RES	DP
CAA20M8	18,07	0,26	15,00	0,80	13,89	0,96	8,06	1,07
CAA20M10	19,70	0,14	16,14	0,73	14,29	0,82	9,59	1,25
CAA20M12	21,33	0,48	17,17	0,83	14,54	0,86	11,66	1,42
CAA30M8	20,09	0,63	16,99	0,64	15,88	0,73	9,25	1,11
CAA30M10	22,12	0,22	18,37	0,43	16,24	0,80	9,74	1,14
CAA30M12	26,30	0,24	21,57	0,63	18,31	0,60	13,77	1,32
CAA40M8	22,40	0,73	18,61	0,42	17,73	0,93	10,04	0,95
CAA40M10	27,55	1,11	23,14	0,69	20,66	1,21	13,72	1,03
CAA40M12	30,05	0,14	25,05	0,79	20,74	0,79	16,44	1,09

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 19 mostra os resultados obtidos no ensaio de compressão dos CAAs obtidos a partir do ativador alcalino de 8 molar de NaOH, após os ciclos de saturação e secagem. Observa-se que, independentemente da substituição parcial de LETA por metacaulim, ocorreu redução da resistência à compressão dos CAAs. Em relação à amostra de referência (0 ciclo), as reduções foram de mais de 15%, 20% e 50% ao final dos ciclos 10, 20 e 30, respectivamente. Todavia, as amostras envelhecidas (30 ciclos) ainda apresentaram resistência à compressão superior a 8 MPa.

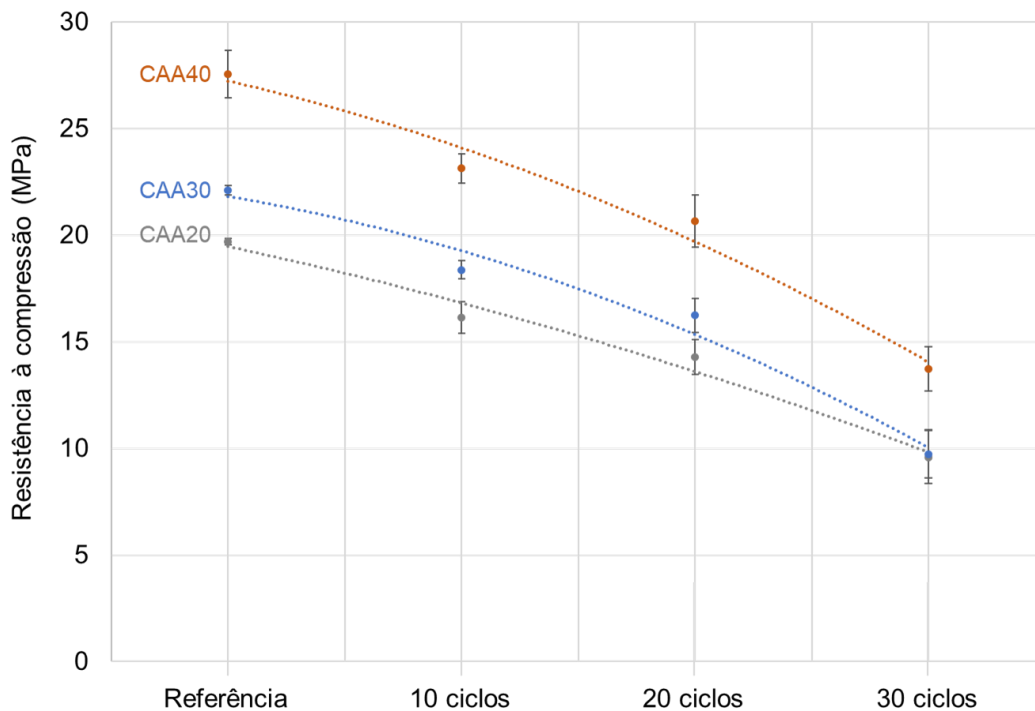
Figura 19 - Influência dos ciclos de saturação e secagem na resistência média à compressão dos cimentos álcali-ativados obtidos com ativador alcalino a 8 molar de NaOH.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 20 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de ensaios de CAAs, produzidos a partir do ativador alcalino com concentração de 10 molar de NaOH, após passarem por ciclos de saturação e secagem. Verifica-se que houve uma redução na resistência dos CAAs, independentemente da substituição parcial de LETA por metacaulim. Em relação à referência (0 ciclo), foram observadas reduções de mais de 16%, 25% e 50% ao final dos ciclos 10, 20 e 30, respectivamente. No entanto, as amostras envelhecidas (30 ciclos) ainda apresentaram resistência à compressão maior que 9,50 MPa.

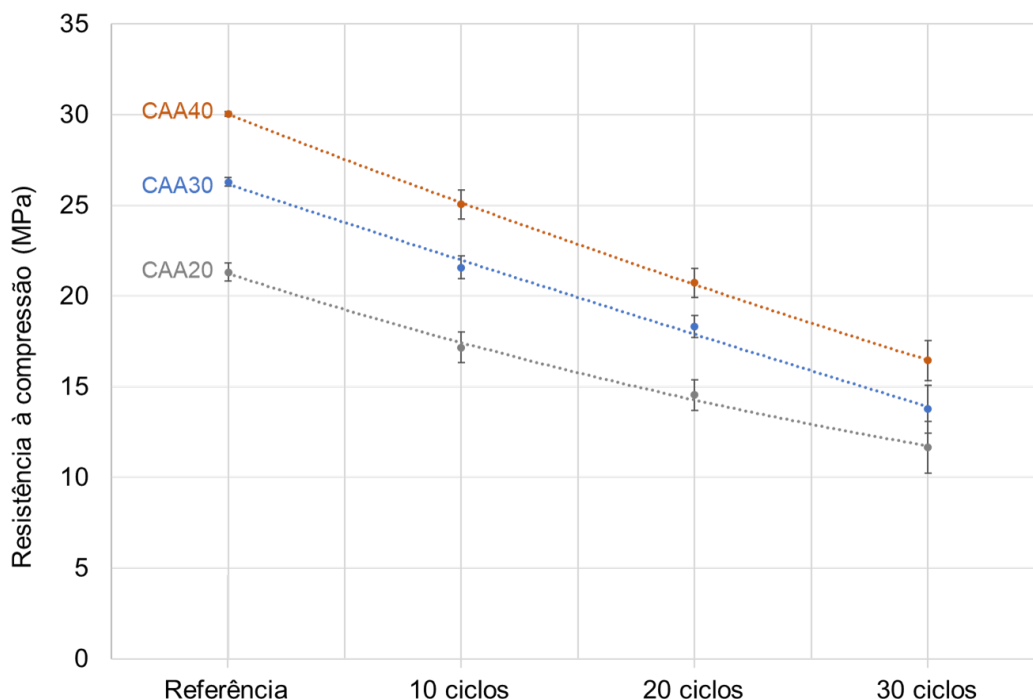
Figura 20 - Influência dos ciclos de saturação e secagem na resistência média à compressão dos cimentos álcali-ativados obtidos com ativador alcalino a 10 molar de NaOH.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 21 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de compressão dos CAAs produzidos a partir de um ativador alcalino com concentração de 12 mol de NaOH após os ciclos de saturação e secagem. Observa-se que houve uma redução na resistência à compressão dos CAAs independentemente da substituição parcial de LETA por metacaulim. Em relação à amostra de referência (0 ciclo), essa redução foi de mais de 15%, 20% e 50% ao final dos ciclos 10, 20 e 30, respectivamente. No entanto, mesmo após o envelhecimento (30 ciclos), as amostras ainda resistiram à compressão em mais de 11 MPa.

Figura 21 - Influência dos ciclos de saturação e secagem na resistência média à compressão dos cimentos álcali-ativados obtidos com ativador alcalino a 12 molar de NaOH.



Fonte: Autor, 2023.

Conforme já apontado por Lloyd (2009) e Bernal e Provis (2014), observa-se que a interação dos CAAs com meio ambiente, através do envelhecimento acelerado, afeta significativamente a resistência à compressão. Isso se deve, especialmente, a formação de subprodutos, como óxidos e carbonatos de sódio (eflorescências).

Quando materiais álcali-ativados são expostos ao ambiente úmido, como o contato direto com a água durante os ciclos de saturação e secagem, ocorrem eflorescências que afetam a resistência (ZHANG *et al.*, 2016). Considerando, que os CAAs desenvolvidos possuem elevada porosidade, isso facilita a mobilidade de álcalis excessivos no interior da matriz e, conseqüentemente, a formação de eflorescências nos poros e comprometimento da durabilidade (RUAN *et al.*, 2022).

3.3.3 Avaliação estatística da dosagem dos cimentos álcali-ativados

No desenvolvimento dos CAAs foram utilizadas duas variáveis de mistura: a molaridade do ativador alcalino e a substituição parcial de LETA por metacaulim. A variável resposta para avaliar o desempenho dos CAAs desenvolvidos foi a resistência à compressão. Com base na análise estatística, definiu-se escolher a dosagem a ser utilizada para produção dos concretos de CAA.

A partir dos dados da Tabela 7, que contém os valores amostrais de resistência, checou-se as pressuposições da regressão linear múltipla de normalidade e homocedasticidade são atendidas, cujos resultados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados das análises de pressuposições de normalidade e homocedasticidade dos dados amostrais de resistência à compressão dos corpos de prova de cimento álcali-ativado.

Pressuposições	P-valor
Normalidade	0,5194
Homocedasticidade	0,3668

Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que os dois P-valores são maiores que 0,05, portanto, pode-se afirmar com 95% de certeza de que os resíduos dos dados de resistência a compressão dos corpos de prova de CAA não ferem nenhuma pressuposição. Neste sentido, como os resultados implicam que erros são aleatórios (resíduos normais) e cada variável possui aproximadamente a mesma variância (homocedásticos), os dados são adequados para análise de regressão linear múltipla.

A Tabela 9 possui os valores das estimativa e significância dos coeficientes do modelo de regressão linear múltipla dos dados analisados de resistência à compressão dos CAAs de LETA, no qual se percebe que todos os coeficientes do modelo foram significativos, pois os p-valores são menores que 5% (0,05).

Tabela 9 - Estimativa e significância dos coeficientes do modelo de regressão linear múltipla do cimento álcali-ativado.

Coeficientes	Componente	Fator	Estimativa	P-valor
β_0	Intercepto	-	15,413	<0,001
β_1	A	Subs. Parcial	2,796	<0,001
β_2	B	Molaridade	2,256	<0,001
β_3	AB	Interação	0,325	0,006

Fonte: Autor, 2023.

A partir dos dados consta-se que ambos fatores (molaridade do ativador alcalino e substituição parcial de LETA por metacaulinita), bem como a interação entre eles, influenciam de modo significativo na resistência à compressão dos CAAs obtido a partir de LETA. Com isso, obteve-se o seguinte modelo:

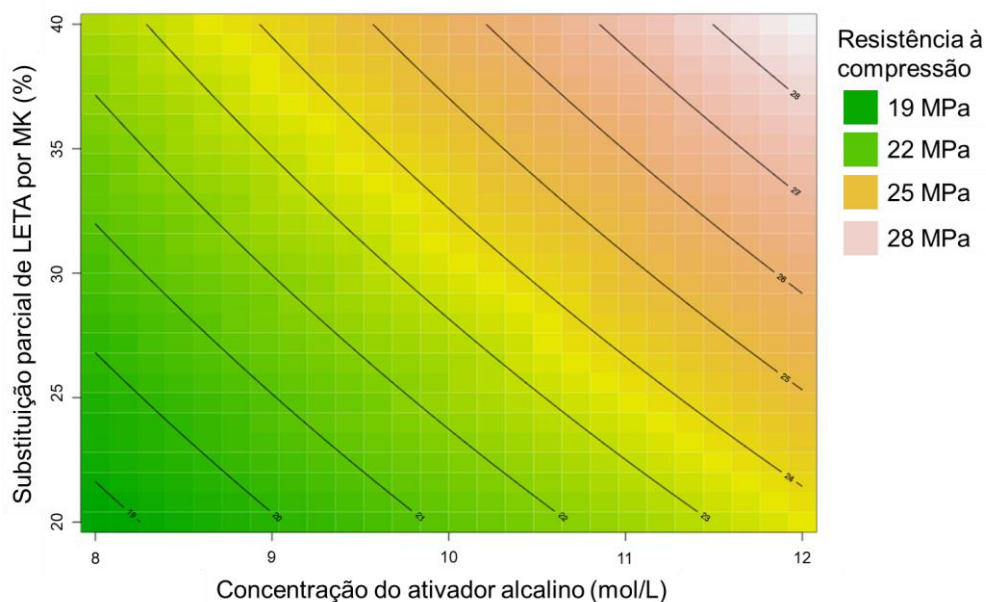
$$y_{ij} = 15,413 + 2,796.a_i + 2,256.b_j + 0,325.ab_{ij}$$

O coeficiente de determinação deste modelo foi próximo de 1 ($R^2 = 0,9845$). Logo, o modelo obtido consegue explicar de forma acurada o comportamento da

resistência à compressão em função dos fatores utilizados. Todavia deve-se atentar que essa solução se limita a faixa utilizada de cada fator, isto é, substituição parcial de LETA por metacaulinita de 20 a 40% e molaridade do ativador alcalino à base de NaOH de 8 a 12 mol/L.

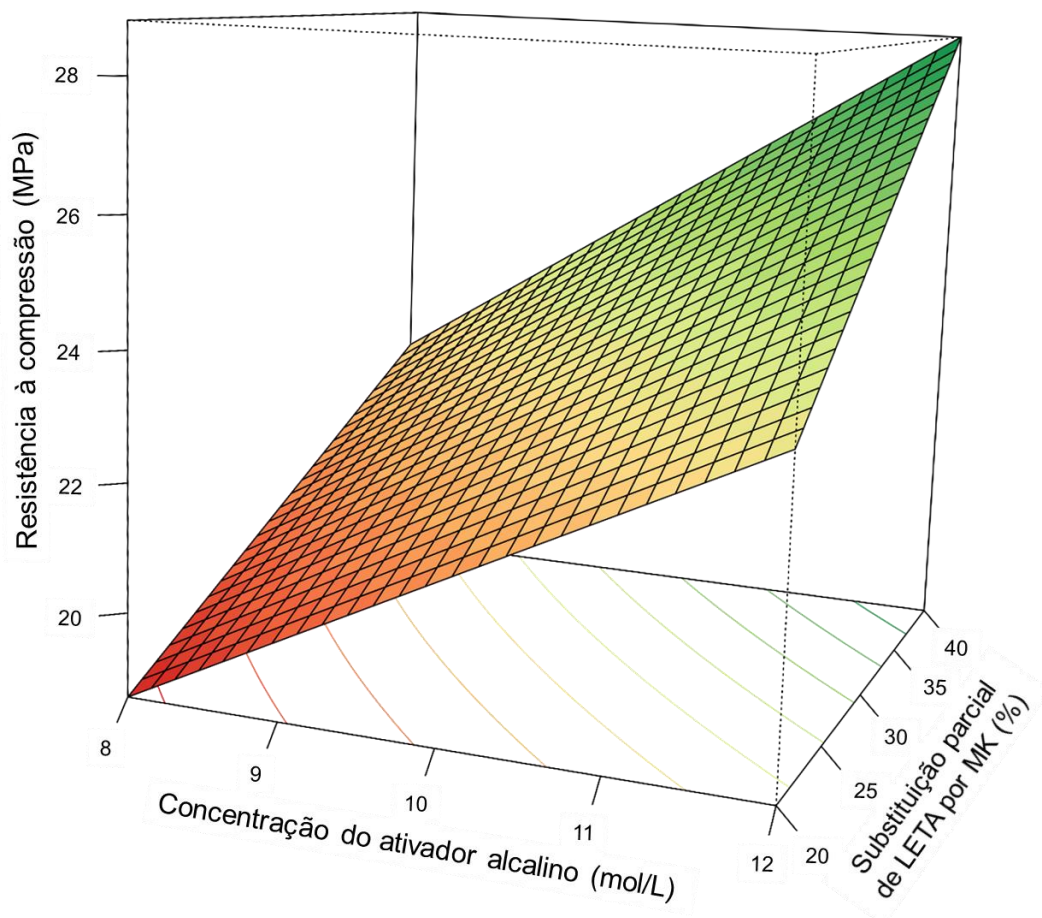
Para melhor exprimir os resultados obtidos pelo modelo, elaborou-se as figuras 22 e 23 que são gráficos representativos do modelo, no qual se observa que molaridade do ativador alcalino à base de NaOH e a substituição parcial de LETA por metacaulinita influenciam diretamente na resistência à compressão dos CAAs de LETA.

Figura 22 - Gráfico 2D da superfície de resposta da influência da concentração molar do ativador alcalino à base de NaOH e da substituição parcial de LETA por metacaulim na resistência mecânica dos corpos de prova de cimento álcali-ativado aos 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 23 - Gráfico 3D da superfície de resposta da influência da concentração molar do ativador alcalino à base de NaOH e da substituição parcial de LETA por metacaulim na resistência mecânica dos corpos de prova de cimento álcali-ativado aos 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2023.

Nos gráficos de superfície é possível identificar, que quanto maior a concentração molar do ativador alcalino à base de NaOH e maior a substituição parcial de LETA por metacaulim, maiores são os resultados médios da resistência à compressão dos CAAs. Resultados semelhantes foram encontrados por Geraldo, Fernandes e Camarini (2017), cujos autores substituíram metacaulim por LETA no desenvolvimento de cimentos álcali-ativados e destacaram que as propriedades dos ligantes são altamente dependentes da quantidade de LETA na mistura.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta etapa do estudo foi avaliar o potencial de uso do LETA e do metacaulim como precursores na produção de CAA utilizando ativador alcalino convencional obtido da mistura de NaOH e Na_2SiO_3 . A partir dos resultados encontrados, é possível destacar:

- Tanto o LETA quanto o metacaulim possuem composição química com elevadores teores de sílica e alumina (>80%), que os tornam materiais potencialmente compatível para o desenvolvimento de CAAs;
- A substituição parcial em massa de LETA por metacaulim para dosagem dos CAAs, bem como a molaridade do ativador alcalino, influenciam nas propriedades físicas, mecânicas e na durabilidade da matriz cimentícia;
- Quanto maior a substituição parcial de LETA por metacaulim, maior tende a ser a massa específicas e a resistência à compressão dos CAAs e menor o tempo de pega e a absorção de água;
- Quanto maior a molaridade do ativador alcalino, maior tende a ser a resistência à compressão dos CAAs e menor o tempo de pega e a massa específica;
- Existe uma correlação inversa entre o tempo de pega e a resistência à compressão ($R^2=0,7857$), tal que quanto maior o tempo de pegadas dos CAAs menor tende a ser a resistência à compressão;
- A resistência à compressão CAAs desenvolvidos decai aproximadamente pela metade após 30 ciclos de molhagem e secagem, evidenciando que a água afeta significativamente a durabilidade desses materiais;
- É possível obter um modelo de regressão linear que explique 98,45% da variação de resistência à compressão dos CAAs em função da substituição parcial de LETA por metacaulim e da molaridade do ativador alcalino.

Com base nestes resultados, tendo em vista que as maiores resistências à compressão aos 28 dias (>20 MPa) foram alcançadas pelas amostras dosadas em massa com 60% de LETA e 40% de metacaulim (CAA40), optou-se em utilizar essa dosagem para desenvolver os CAAs a partir de ativador alcalino alternativo na próxima etapa do estudo.

Além disso, é importante ressaltar que o aumento da quantidade de resíduos na dosagem de CAAs não necessariamente afeta as propriedades dos CAAs. A origem e a qualidade dos resíduos utilizados, bem como a dosagem e outros parâmetros de produção, podem ter um impacto significativo nas propriedades do produto final. É importante avaliar cuidadosamente o efeito da dosagem de resíduos, como o LETA, e outros fatores no controle da porosidade dos CAAs para garantir a obtenção das propriedades desejadas.

4 INFLUÊNCIA DO ATIVADOR ALCALINO NAS PROPRIEDADES DOS CAAS

4.1 INTRODUÇÃO

Os cimentos álcali-ativados (CAAs) são obtidos por meio da reação de álcali-ativação entre um precursor sólido e uma solução alcalina ativadora (VAN DEVENTER *et al.*, 2010). Essa reação desencadeia uma série de processos químicos nos quais ocorre a dissolução e condensação das fases –Si e –Al do precursor sólido, devido à hidrólise alcalina promovida pela solução ativadora. As proporções dos materiais utilizados na produção dos CAAs, representada por relações estequiométricas, influenciam a cinética da reação de álcali-ativação e, por consequência, as propriedades do produto final (WAN *et al.*, 2017; WANG; ALREFAEI; DAI, 2019).

Os CAAs são produzidos a partir de precursores sólidos que possuem uma alta concentração de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2SiO_3), como o metacaulim, que é amplamente utilizado nesse processo (ZHANG *et al.*, 2016). No entanto, devido às exigências ambientais e à disponibilidade local, vários estudos têm demonstrado a viabilidade de utilizar resíduos industriais no desenvolvimento dos CAAs (PROVIS, 2017; WU *et al.*, 2019). Entre esses resíduos, destacam-se as cinzas volantes (BAJPAI *et al.*, 2020), escória de alto-forno (MEHTA *et al.*, 2020), lama vermelha (HERTEL; PONTIKES, 2020), cinzas agroindustriais (AKBAR *et al.*, 2021) e resíduos de Estações de Tratamento de Água (JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; BOURZIK *et al.*, 2022).

As soluções ativadoras devem ter um caráter alcalino para promover a hidrólise das espécies químicas envolvidas na reação de álcali-ativação. Para isso, as soluções ativadoras convencionais são compostas principalmente por silicatos e hidróxidos industrializados (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017a), como hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3). Os ativadores alcalinos convencionais derivados do sódio (Na) são os mais utilizados devido à sua disponibilidade econômica e capacidade de conferir propriedades adequadas aos CAAs, como elevada resistência mecânica (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Apesar das perspectivas ambientais promissoras dos CAAs devido às reduzidas emissões de CO_2 em comparação com a produção de cimento Portland, o uso de ativadores alcalinos comerciais pode comprometer a sua sustentabilidade dos

CAAs. Isso ocorre porque a produção industrial de NaOH e Na₂SiO₃ ocorre em condições de elevada pressão e temperatura, resultando em um alto consumo de energia e emissões de gases do efeito estufa (SHILAR *et al.*, 2022). No entanto, essa situação tem impulsionado o desenvolvimento de ativadores alcalinos alternativos que utilizam materiais residuais ricos em sílica, os quais possuem baixo valor agregado, com o objetivo de aumentar a sustentabilidade do processo de produção dos CAAs (TCHAKOUTÉ *et al.*, 2016).

Os ativadores alcalinos alternativos são obtidos pela dissolução de materiais residuais ricos em SiO₂ em uma solução alcalina derivada de NaOH e/ou KOH (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017a). Diversos resíduos têm sido investigados para essa finalidade, tais como resíduos de vidro (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017b), cinza da palha da cana-de-açúcar (MORAES *et al.*, 2018), cinza de casca de arroz (PASSUELLO *et al.*, 2017), cinza volante (VILLAQUIRÁN-CAICEDO, 2019), sílica ativa (ALSALMAN *et al.*, 2021; CHENG *et al.*, 2022), entre outros.

As propriedades dos CAAs obtidos a partir de ativadores alcalinos alternativos são comparáveis às propriedades dos CAAs obtidos de ativadores alcalinos convencionais. Entretanto, é fundamental controlar criteriosamente as proporções de SiO₂ e outras espécies químicas envolvidas na produção do ativador alcalino alternativo. Essa medida visa garantir a composição química adequada do ativador alcalino, otimizando assim a reação de álcali-ativação e as propriedades dos CAAs (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017b). Além disso, é necessário avaliar a durabilidade dos CAAs produzidos com ativadores alcalinos alternativos (MENDES *et al.*, 2021).

Neste sentido, o objetivo desta etapa do estudo consistiu em investigar o impacto do ativador alcalino nas propriedades dos CAAs obtidos a partir de LETA calcinado. Com esse propósito, foi conduzida uma análise comparativa das propriedades dos CAAs produzidos utilizando tanto o ativador alcalino convencional quanto o ativador alcalino alternativo. Os resultados obtidos nesse estudo fornecem informações relevantes para a otimização das dosagens dos parâmetros envolvidos na produção de CAAs utilizando resíduos como precursor sólido e ativador alcalino.

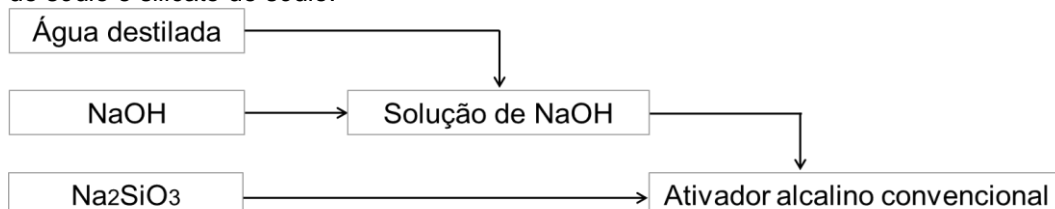
4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Materiais

Como precursor sólido para a produção dos CAAs, foi utilizada uma mistura em massa composta por 60% de LETA calcinado e 40% de metacaulim. Essa composição foi obtida a partir do planejamento fatorial realizado na etapa anterior, com o objetivo de fornecer maior resistência à compressão.

Como ativador alcalino, foram utilizados dos tipos: convencional e alternativo. O ativador alcalino convencional é o mesmo utilizado na etapa anterior e foi produzido a partir da mistura de silicato de sódio alcalino e solução de hidróxido de sódio, ambos materiais da marca Kalim, conforme mostra o fluxograma da Figura 24.

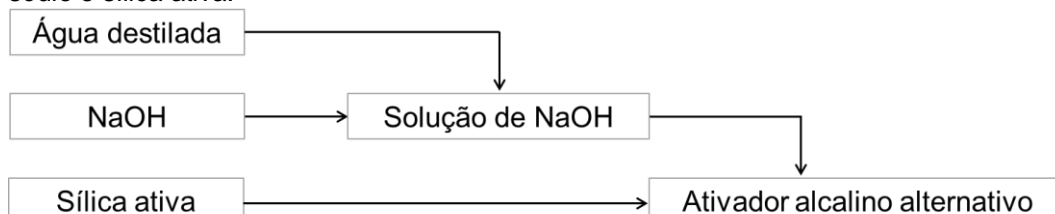
Figura 24 - Fluxograma de preparo do ativador alcalino convencional a partir de hidróxido de sódio e silicato de sódio.



Fonte: Autor, 2023.

Já o ativador alcalino alternativo, foi obtido a partir da dissolução de sílica ativa (*silica fume*) em solução de hidróxido de sódio, conforme método adaptado prescrito por Jesus, Vieira e Vieira (2020). A dissolução de sílica ativa em solução de hidróxido de sódio foi realizada com auxílio de um agitador magnética com aquecimento a 90 ± 5 °C por 30 minutos, sem haver ebulição da solução para evitar evaporação excessiva da água utilizada no preparo prévio da solução de hidróxido de sódio, conforme mostra o fluxograma da Figura 25.

Figura 25 - Fluxograma de preparo do ativador alcalino alternativo a partir de hidróxido de sódio e sílica ativa.



Fonte: Autor, 2023.

O hidróxido de sódio (NaOH) da marca Kalim com 98% de pureza foi adquirido na forma de escamas em virtude da disponibilidade do material. A sílica ativa foi obtida na empresa Tecnosil localizada na cidade de Itupeva/SP e é resultado da fabricação

do ferro silício ou silício metálico. A composição química da sílica ativa utilizada neste estudo é composta majoritariamente por sílica (SiO_2) e traços de óxido de ferro (Fe_2O_3), devido à origem siderúrgica do material (resíduo da fabricação do ferro), conforme mostra a Tabela 10.

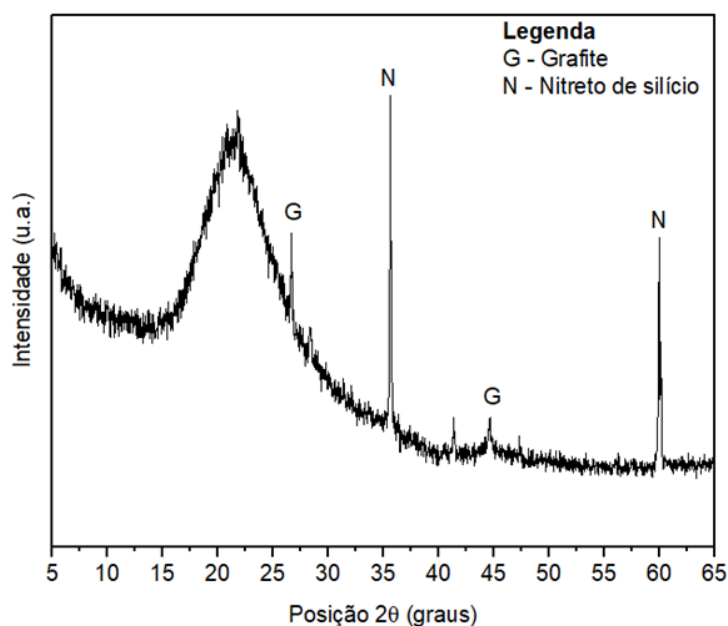
Tabela 10 - Composição química da sílica ativa em quantidade de óxido.

Composição	Quantidade (%)
SiO_2	80,57
Fe_2O_3	8,61
K_2O	6,00
CaO	1,57
P_2O_5	0,94
MgO	0,36
Al_2O_3	0,25
Outros	1,70

Fonte: Autor, 2023.

A sílica ativa utilizada para o preparo do ativador alcalino alternativo apresentou característica de material amorfo, devido à presença do alo de amorfismo, conforme mostra a Figura 26. No difratograma da sílica ativa também foram encontrados picos de carbono na forma de grafite e nitreto de silício (Si_3N_4).

Figura 26 - Difratoograma da sílica ativa utilizada neste estudo para produção do ativador alcalino alternativo.



Fonte: Autor, 2023.

A quantidade de sílica ativa, bem como dos demais materiais componentes utilizados no preparo do ativador alcalino alternativo em função da dosagem do CAA obtido a partir do ativador alcalino convencional. Ressalta-se que as quantidades desses materiais fazem parte do planejamento experimental de dosagem dos CAAs, visto que suas concentrações influenciam nas propriedades do produto final.

4.2.2 Planejamento experimental

O planejamento experimental da pesquisa consistiu em avaliar a influência dos ativadores alcalinos nas propriedades dos CAAs. Além disso, foi analisada a influência da molaridade do ativador alcalino. Portanto, o planejamento desta etapa da pesquisa foi composto por duas variáveis: o tipo de ativador alcalino e sua molaridade.

Como ativador alcalino, utilizou-se dois tipos: convencional (C) e alternativo (A), enquanto as molaridades foram de 8, 10 e 12. Assim, desenvolveu-se seis dosagens de CAA, conforme disposto na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição em massas dos componentes utilizados para dosagem dos cimentos álcali-ativados utilizados no planejamento experimental.

Dosagens	LETA e Metacaulim (g)	NaOH (g)	Na₂SiO₃ (g)	Água destilada (g)	Sílica ativa (g)
CCM8	100	8,64	92	27,0	-
CCM10	100	8,64	92	21,6	-
CCM12	100	8,64	92	18,0	-
CAM8	100	21,70	-	67,8	20,3
CAM10	100	21,70	-	54,3	20,3
CAM12	100	21,70	-	45,2	20,3

Fonte: Autor, 2023.

Em relação à nomenclatura adotada na dosagem, observa-se que o cimento alcalino-ativado obtido a partir do ativador alcalino convencional (CC) e molaridade 8 foi denominado CCM8. Quando a molaridade mudou para 10 e 12, foram denominados, respectivamente, CCM10 e CCM12. Por outro lado, o cimento alcalino-ativado obtido a partir do ativador alcalino alternativo (CA) e molaridade 8 foi denominado CAM8, enquanto com molaridade de 10 e 12 foram denominados CAM10 e CAM12, respectivamente.

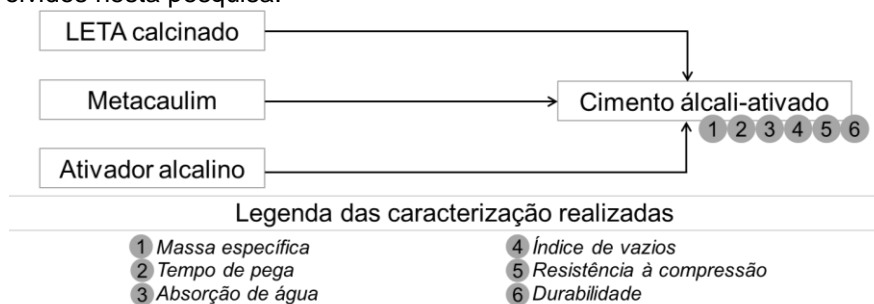
Além disso, é evidente que, na dosagem dos CAs, a fim de compensar a presença de sílica proveniente do silicato de sódio na dosagem dos CCs, foi incorporada sílica ativa. Adicionalmente, houve um aumento na quantidade de NaOH, visando adequar as relações molares em comparação ao ativador alcalino convencional.

O preparo das pastas cimentícias foi realizado conforme descrito na etapa anterior (subseção 3.2.3), de modo que os ativadores alcalinos foram produzidos 24 horas antes de sua utilização. Ao final, foram moldados corpos de prova com 50 mm de altura e 25 mm de diâmetro.

4.2.3 Ensaios de caracterização

Os ensaios para caracterizar os CAAs, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, são os mesmos descritos na seção anterior (item 3.2.4) e estão listados no fluxograma da Figura 27.

Figura 27 - Ensaios de caracterização dos materiais e cimentos álcali-ativados desenvolvidos nesta pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

O Quadro 3 resume os ensaios de caracterização realizados nesta etapa, bem como as normas utilizadas.

Quadro 3 - Resumos dos ensaios de caracterização realizados com as respectivas referências utilizadas.

Ensaios	Referências
Massa específica	NBR 9778 (ABNT, 2005).
Tempo de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Absorção de água e índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2005)
Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)
Durabilidade por ciclos de molhagem e secagem	HORPIBULSUK <i>et al.</i> , (2016)

Fonte: Autor, 2023.

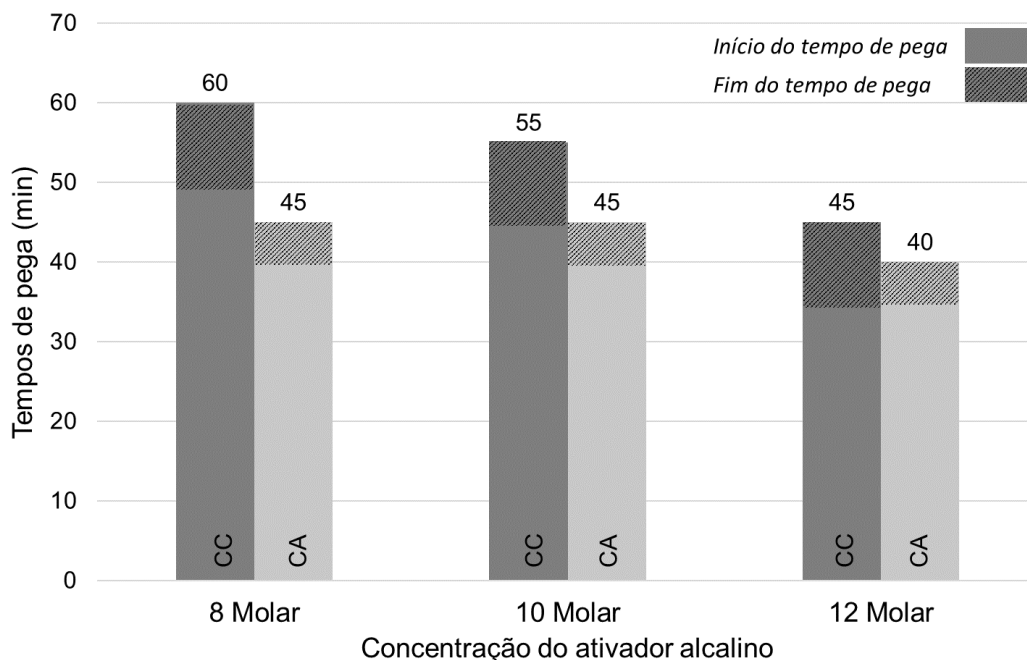
No Apêndice A, encontra-se o programa dos ensaios de caracterização, com os detalhes dos procedimentos realizados, incluindo os parâmetros utilizados, equipamentos e demais informações.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Tempo de pega

Na Figura 28 é apresentado o gráfico com os tempos de pega dos CAAs desenvolvidos, no qual se pode observar que a molaridade do ativador alcalino influencia nos tempos de pega das pastas cimentícias, independentemente da origem do ativador alcalino. A formulação CAM12 apresentou menor tempo de início (35 min) e fim de pega (40 min), sendo classificado como um material de pega relativamente rápida.

Figura 28 – Tempos de início e fim de pega dos CAAs produzidos a partir de diferentes ativadores alcalinos e molaridades.



Fonte: Autor, 2023.

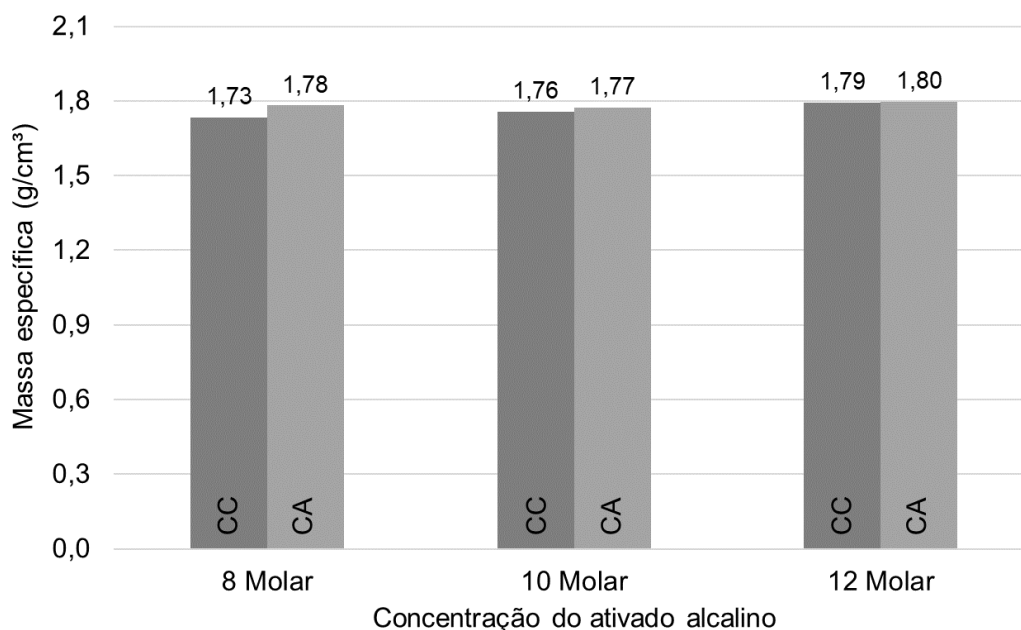
No que se refere ao tipo de ativador alcalino, verificou-se que o tipo de ativador alcalino influencia nos tempos de pega das pastas de CAA. Observa-se que, para uma mesma molaridade, os tempos de início e fim de pega diminuem gradualmente com o uso de ativador alcalino alternativo. Esse efeito pode ser atribuído à relação molar entre SiO_2 e Al_2O_3 , uma vez que as dosagens de CC apresentam maior teor de sílica e, portanto, maior relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Isso afeta os tempos de pega dos CAAs, já que disponibilidade de alumina contribui para a velocidade de nucleação e, consequentemente, na taxa de enrijecimento das pastas, conforme já constatado por Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) e Jesus, Vieira e Vieira (2019).

Quanto à molaridade do ativador alcalino, foi observado que os tempos de pega diminuíram gradualmente com o aumento das concentrações molares. Isso ocorre porque o aumento de álcalis, fornecido pelo aumento na concentração molar de NaOH, acelera a dissolução dos íons de Si^{4+} e Al^{3+} , o que afeta o processo de nucleação (TOPARK-NGARM; CHINDAPRASIRT; SATA, 2015). Na perspectiva em questão, a elevação da concentração molar do ativador alcalino induz a diminuição do tempo de pega dos CAAs, não importando a natureza do ativador alcalino adotado na dosagem dos CAAs.

4.3.2 Massa específica

Na Figura 29 tem-se o gráfico com as massas específicas das pastas dos CAAs desenvolvidos neste estudo, no qual se observa que formulação CAM12 apresentou maior valor ($1,80 \text{ g/cm}^3$).

Figura 29 – Massas específicas dos CAAs produzidos a partir de diferentes ativadores alcalinos e molaridades.



Fonte: Autor, 2023.

Embora as massas específicas tenham apresentado pequenas variações, observou-se um aumento gradual em função do aumento da molaridade do ativador alcalino, bem como a partir da substituição do ativador convencional pelo alternativo. No entanto, é importante ressaltar que a ausência de análise estatística impede que se faça afirmações conclusivas sobre a influência dessas variáveis na propriedade de massa específica fresca.

4.3.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica real

A Tabela 12 apresenta os resultados das propriedades físicas de absorção de água, índice de vazios e massa específica real dos CAAs produzidos nesta etapa do estudo. Nota-se que as dosagens produzidas com ativador alcalino alternativo apresentaram uma absorção de água reduzida e uma maior massa específica em relação às dosagens produzidas com ativador alcalino convencional.

Tabela 12 - Resultados das propriedades físicas dos CAAs produzidos a partir de diferentes ativadores alcalinos e molaridades.

Dosagens	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica real (g/cm³)
CCM8	18,81	32,28	1,72
CCM10	19,38	32,44	1,67
CCM12	23,35	38,41	1,65
CAM8	12,59	22,00	1,75
CAM10	13,57	23,11	1,70
CAM12	14,54	23,88	1,64

Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que a ambas variáveis de estudo influenciaram nas propriedades físicas dos CAAs, tal que o aumento da molaridade do ativador alcalino promoveu uma redução da massa específica real. Adicionalmente, verifica-se uma tendência de aumento do índice de vazios com o aumento da molaridade, o que estar correlacionado com a absorção de água dos corpos de prova.

Considerando a concentração molar do ativador alcalino, foi observado que o aumento da concentração de NaOH resultou na formação de um maior índice de vazios nos CAAs, o que contribuiu para o aumento da absorção de água e a redução da massa específica real (SHILAR et al., 2022). Esse fenômeno já foi observado na seção anterior e está diretamente relacionado com a concentração molar do ativador alcalino, uma vez que quanto maior a concentração de álcalis no ativador, maiores são os diâmetros médios dos poros da matriz cimentícia (LUNA-GALIANO; FERNÁNDEZ-PEREIRA; IZQUIERDO, 2016).

Quando se compara as propriedades físicas dos CAAs em função do tipo de ativador alcalino, as dosagens produzidas com ativador alcalino alternativo possuem maior massa específica e menor absorção de água e índice de vazios. Portanto, ativador alcalino alternativo promove uma matriz cimentícia mais densa. Entretanto, não pode afirmar por qual motivo isso ocorreu, uma vez que a densificação da matriz cimentícia dos CAAs pode ocorrer devido a dois fatores. Primeiro, maior reatividade do ativador alcalino e, conseqüentemente, maior precipitação das espécies químicas envolvidas na reação de álcali-ativação (TCHAKOUTÉ et al., 2016). Segundo, a maior quantidade de precursores sólidos na dosagem dos CAAs, como no caso, uso de sílica ativa, pode contribuir para o empacotamento mais eficiente da matriz cimentícias (MENDES et al., 2021).

Embora não seja possível determinar com precisão a influência de cada fator isoladamente, é plausível que ambos tenham contribuído para as diferenças nas propriedades dos CAAs produzidos com ativador alcalino alternativo. Em primeiro lugar, a maior quantidade de hidróxido de sódio utilizada no preparo do ativador alcalino pode ter aumentado a reatividade da solução, favorecendo a reação de álcali-ativação e a formação de uma matriz cimentícia mais densa. Além disso, a sílica ativa presente na dosagem dos CAAs pode ter contribuído para o empacotamento mais eficiente da matriz cimentícia, preenchendo os vazios e aumentando a densidade da estrutura. Porém, é importante destacar que a interação entre esses fatores é complexa e requer estudos mais aprofundados para uma compreensão mais completa do fenômeno observado.

4.3.4 Resistência à compressão

A Tabela 13 apresenta os resultados de resistência à compressão obtidos para os corpos de prova dos CAAs produzidos nesta etapa da pesquisa. Observa-se que a resistência à compressão dos CAAs obtidos a partir de ativador alcalino alternativos alcançou valor máximo de 31,08 MPa e está condizente com valores encontrados na literatura sobre CA (TCHAKOUTÉ *et al.*, 2016; MEJÍA; GUTIÉRREZ; MONTES, 2016).

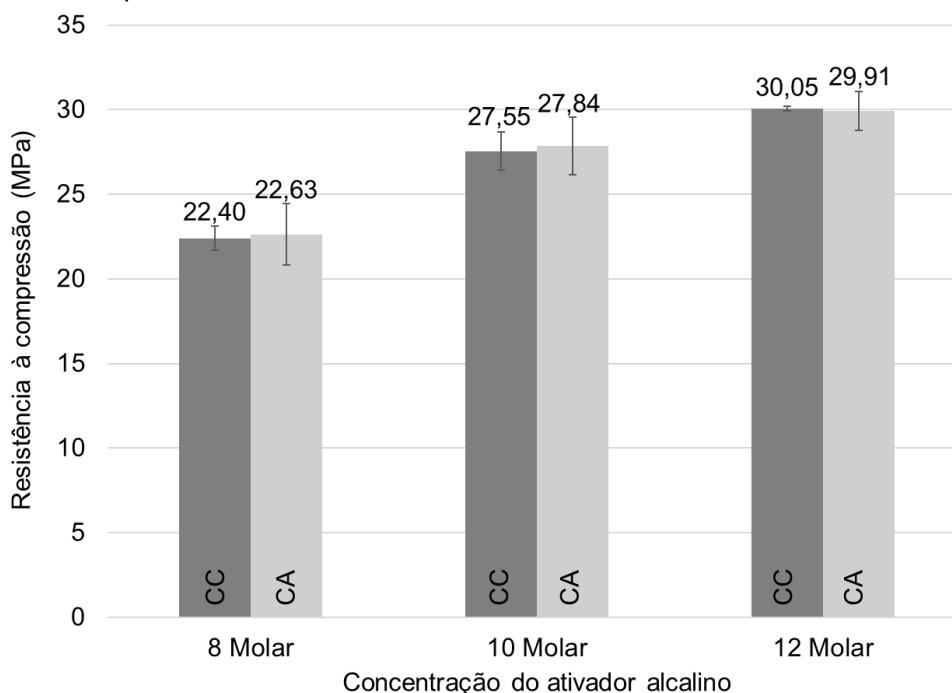
Tabela 13 - Resultado da resistência à compressão dos corpos de prova dos CAAs produzidos a partir de diferentes ativadores alcalinos e molaridades.

Dosagens	Resistência à compressão (MPa)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
CCM8	23,14	21,68	22,38
CCM10	28,81	26,72	27,13
CCM12	30,05	30,19	29,92
CAM8	20,85	22,58	24,46
CAM10	25,93	28,45	29,15
CAM12	28,76	29,89	31,08

Fonte: Autor, 2023.

A Figura 30 apresenta o gráfico da resistência média à compressão dos CAAs produzidos nesta etapa do estudo, evidenciando uma tendência de aumento da resistência à compressão com o aumento da concentração molar do ativador alcalino.

Figura 30 - Gráfico de resistência média à compressão dos corpos de prova dos CAAs produzidos a partir de diferentes ativadores alcalinos e molaridades.



Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que a dosagem CCM12 apresentou a maior resistência à compressão (30,05 MPa), representando um aumento de 66,29% em relação à dosagem CCM8, que apresentou a menor resistência. Esses resultados indicam que a molaridade do ativador alcalino tem um impacto significativo (valor- $P < 5\%$) na resistência à compressão dos CAAs, independentemente do ativador alcalino utilizado. No Apêndice B, encontra-se um resumo da análise de variância (ANOVA) na qual foram comparados os valores dos CAAs obtidos a partir do mesmo ativador alcalino. Os resultados indicam que a molaridade do ativador alcalino é um fator significativo na variação da resistência à compressão dos materiais testados.

Realizou-se, ainda, a comparação da resistência à compressão dos CAAs produzidos por meio de ativadores alcalinos distintos, porém com igual molaridade. Para tal análise, empregou-se o teste F unicaudal, cujos resultados são apresentados no Apêndice B. Os resultados sugerem que para uma mesma molaridade há evidências estatísticas para dizer que existe diferença entre as resistências ($F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$). Entretanto, o valor de probabilidade (P) é maior que o nível de significância comum de 0,05, o que significa que não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que existe diferença significativa com um nível de significância de 5%. Em outras palavras, embora o valor calculado da estatística F seja maior que

o valor crítico, a diferença observada entre as médias dos grupos pode não ser estatisticamente significativa com um nível de confiança de 95%.

Portanto, em termos práticos, admite-se considerar apenas as médias dos valores de resistência à compressão, de forma que, para uma mesma molaridade, os CAAs produzidos por diferentes ativadores alcalinos apresentam resistência à compressão equivalente.

4.3.5 Durabilidade

Na Tabela 14 os resultados do ensaio de durabilidade dos CAAs avaliados por meio de ciclos de saturação e secagem, na qual constam as resistências médias à compressão (RES) e seus respectivos desvios padrão (DP), ambos em MPa.

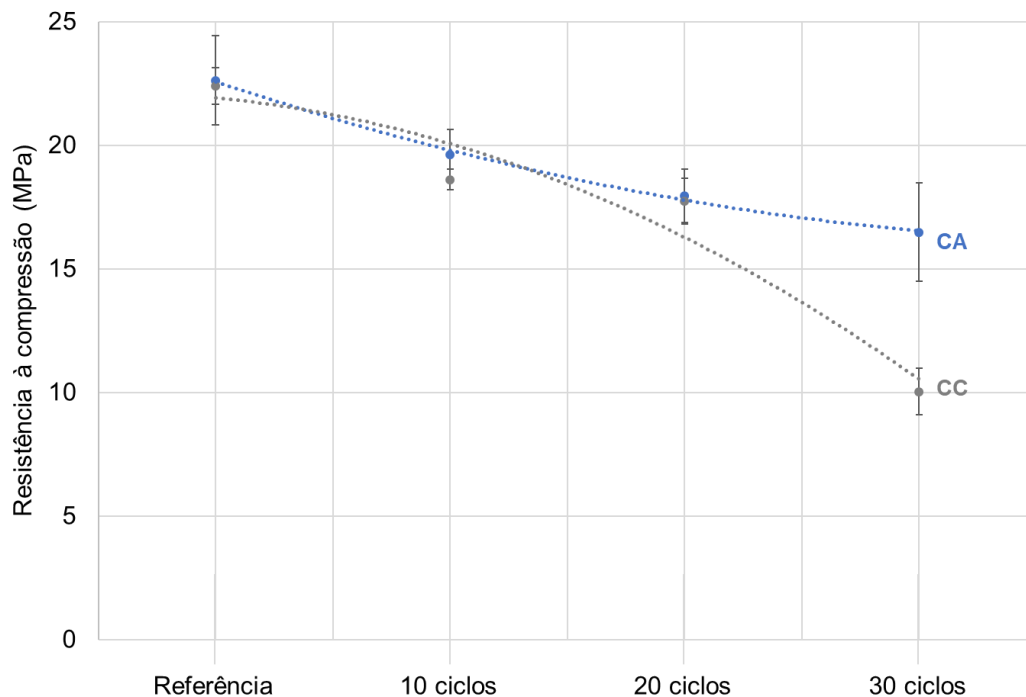
Tabela 14 - Influência dos ciclos saturação e secagem na resistência média à compressão dos CAAs obtidos a partir de ativadores alcalinos convencional e alternativo com diferentes concentrações de NaOH.

Dosagens	Referência		10 ciclos		20 ciclos		30 ciclos	
	RES	DP	RES	DP	RES	DP	RES	DP
CCM8	20,09	0,63	16,99	0,64	15,88	0,73	9,25	1,11
CCM10	22,12	0,22	18,37	0,43	16,24	0,80	9,74	1,14
CCM12	26,30	0,24	21,57	0,63	18,31	0,60	13,77	1,32
CAM8	22,63	1,81	19,63	0,99	17,95	1,09	16,48	1,99
CAM10	27,84	1,69	24,03	1,44	22,08	1,77	18,93	1,31
CAM12	29,91	1,16	25,63	1,01	22,11	1,34	19,34	1,33

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 31 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de compressão dos CAAs produzidos com ativador alcalino de 8 molaridade de NaOH, após serem submetidos a ciclos de saturação e secagem. Observa-se que os CAs apresentaram menor redução da resistência à compressão quando comparados à amostra de referência (0 ciclo). Ao final dos ciclos 10, 20 e 30, as reduções foram de 13,24%, 20,67% e 27,18%, respectivamente. Enquanto os CCs apresentaram reduções maiores na resistência à compressão, em relação à amostra de referência (0 ciclo), sendo de 16,90%, 20,83% e 55,18% ao final dos ciclos 10, 20 e 30, respectivamente.

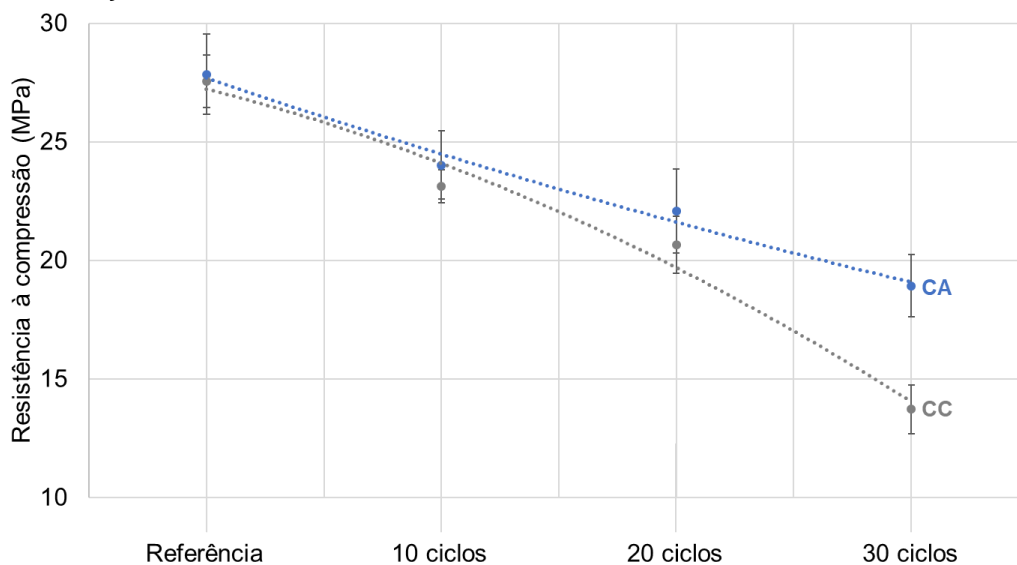
Figura 31 - Influência dos ciclos de saturação e secagem na resistência média à compressão dos CAAs produzidos a partir de diferentes ativadores alcalinos com concentração de 8 molar de NaOH.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 32 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de compressão dos CAAs produzidos com ativador alcalino de 10 molaridade de NaOH, após serem submetidos a ciclos de saturação e secagem. Observa-se que os CAs apresentaram menor redução da resistência à compressão quando comparados à amostra de referência (0 ciclo). Ao final dos ciclos 10, 20 e 30, as reduções foram de 13,70%, 20,71% e 32%, respectivamente. Enquanto os CCs apresentaram reduções maiores na resistência à compressão, em relação à amostra de referência (0 ciclo), sendo de 16,03%, 25,03% e 50,19% ao final dos ciclos 10, 20 e 30, respectivamente.

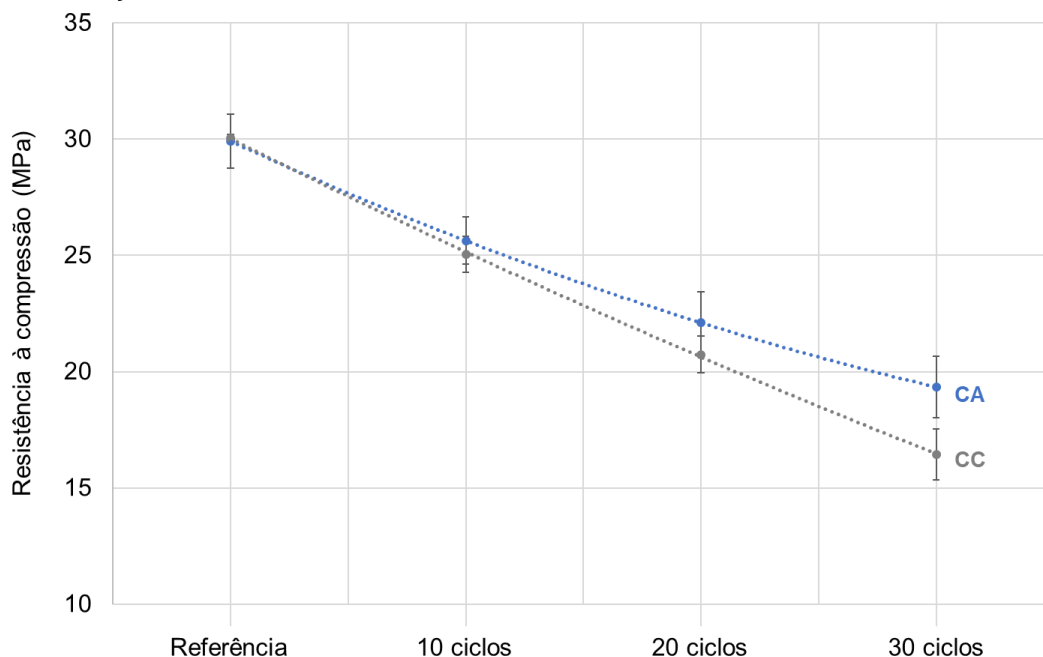
Figura 32 - Influência dos ciclos de saturação e secagem na resistência média à compressão dos CAAs produzidos a partir de diferentes ativadores alcalinos com concentração de 10 molar de NaOH.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 33 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de compressão dos CAAs produzidos com ativador alcalino de 12 molaridade de NaOH, após serem submetidos a ciclos de saturação e secagem. Observa-se que os CAs apresentaram menor redução da resistência à compressão quando comparados à amostra de referência (0 ciclo). Ao final dos ciclos 10, 20 e 30, as reduções foram de 14,31%, 26,08% e 35,34%, respectivamente. Enquanto os CCs apresentaram reduções maiores na resistência à compressão, em relação à amostra de referência (0 ciclo), sendo de 16,66%, 31% e 45,29% ao final dos ciclos 10, 20 e 30, respectivamente.

Figura 33 - Influência dos ciclos de saturação e secagem na resistência média à compressão dos CAAs produzidos a partir de diferentes ativadores alcalinos com concentração de 12 molar de NaOH.



Fonte: Autor, 2023.

Como apontado na seção anterior, a interação dos CAAs com o ambiente, simulado por meio de ciclos de saturação e secagem, tem um efeito significativo negativo na resistência à compressão. No entanto, observou-se que os CAs apresentaram uma perda menor de resistência após 30 ciclos. Isso pode ser explicado pela menor formação de hidrato de carbonato de sódio (eflorescência e subeflorescência), uma vez que a adição de sílica ativa na matriz cimentícia, feito no caso por meio do ativador alcalino alternativo, reduz a taxa de formação de eflorescências, como constatado por Saludung *et al.* (2021). Em consequência disso, ocorre um menor prejuízo à durabilidade dos CAs em relação aos CCs.

Um aspecto importante para melhoria da durabilidade dos CAAs é o aumento da densidade (WANG *et al.*, 2020). O que foi comprovada neste estudo, visto que as dosagens que apresentaram maior massa específica apresentaram menor perda de resistência ao longo dos ciclos de saturação e secagem. Outro aspecto que corrobora para a maior durabilidade dos CAs é o fato de apresentarem menor absorção de água em relação aos CCs. Isso indica que os CAs possuem menor porosidade, o que inibe a mobilidade de álcalis excessivos no interior da matriz cimentícia dos CAAs e, consequentemente, reduz a formação de eflorescências nos poros, comprometendo a durabilidade do material (RUAN *et al.*, 2022).

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizou-se uma análise comparativa das propriedades dos CAAs produzidos utilizando o ativador alcalino convencional ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) e o ativador alcalino alternativo ($\text{NaOH} +$ sílica ativa). Com base nos resultados obtidos, é possível concluir:

- O uso de um ativador alcalino resultou em uma redução superior a 12,50% no tempo de pega dos CAAs produzidos pela substituição parcial de LETA por metacaulim. Além disso, o aumento da concentração molar do ativador alcalino demonstrou contribuir para essa diminuição no tempo de pega;
- Não foi possível identificar diferenças significativas nas massas específicas das pastas de CAA em relação ao uso dos ativadores alcalinos convencional e alternativo;
- As formulações de CAAs que utilizaram ativador alcalino alternativo demonstraram uma redução na absorção de água e no índice de vazios, bem como um aumento na massa específica, quando comparadas às dosagens que empregaram ativador alcalino convencional;
- Apesar de se observar uma pequena discrepância nos valores médios de resistência à compressão entre os CAs CCs, considerando uma abordagem probabilística, pode-se inferir que essa diferença é estatisticamente irrelevante. Portanto, conclui-se que a utilização de um ativador alcalino alternativo não afetou significativamente a resistência à compressão dos CAAs;
- O emprego de um ativador alcalino alternativo mitigou a perda de durabilidade dos CAAs, conforme avaliado por meio de ciclos de saturação e secagem.

Estima-se que as diferenças observadas nos resultados entre CCs e os CAs estejam associadas ao aumento dos íons hidroxila na solução ativadora e à maior disponibilidade de sílica proveniente da fonte alternativa. Ao substituir a sílica do silicato de sódio pela sílica ativa, aumentou-se a quantidade de NaOH para ajustar as proporções molares do ativador alcalino. Isso resultou em um aumento na concentração de íons hidroxila na solução, favorecendo a dissolução da sílica da fonte alternativa, bem como a dissolução do alumínio e da sílica presentes no LETA e no metacaulim. Esses parâmetros influenciaram a reação química de álcali-ativação e

foram refletidos nas propriedades dos CAAs. No entanto, estudos mais aprofundados são necessários para uma compreensão mais completa do fenômeno observado.

Adicionalmente, ao considerar a resistência à compressão e a durabilidade dos CAAS produzidos com ativador alcalino de 10 molar não apresentaram diferenças significativas em relação aos CAAs produzidos com ativador alcalino de 12 molar, decidiu-se por utilizar as dosagens CC10M e CA10M para a fabricação das peças de concreto álcali-ativado na próxima etapa da pesquisa.

5 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO ÁLCALI-ATIVADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Os concretos álcali-ativados, também conhecido como concreto obtido de cimento álcali-ativado (CCAA), são produzidos pela ativação alcalina, que envolve a mistura de um precursor sólido rico em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) com um ativador alcalino. Esse tipo de concreto tem despertado interesse científico e comercial, devido ao seu potencial como substituto do concreto de cimento Portland. Isso se deve principalmente à sua baixa emissão de CO_2 associado à sua produção, bem como a suas propriedades, que incluem elevada resistência mecânica, ao ataque químico e ao fogo (PROVIS; PALOMO; SHI, 2015).

Diante deste cenário, diversas pesquisas têm sido conduzidas com perspectiva de realizar a dosagem adequada dos CCAA, levando em consideração a resistência à compressão, emissão de CO_2 e custo de produção. Para tanto, parâmetros de dosagem são criteriosamente estudados, como a origem e proporção do precursor sólido, as condições de cura, características do ativador alcalino, relação entre líquido e aglutinante, relação entre agregados e a pasta de cimento; relação entre agregado gráudo e miúdo, entre outros (LI *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2020).

Entre esses parâmetros, a relação entre agregado gráudo e miúdo está relacionado ao empacotamento dos grãos. Uma relação otimizada entre esses agregados resulta em maior massa específica do concreto, o que indica um empacotamento mais eficiente. Ao realizar esse empacotamento mais eficiente, obtém-se um concreto mais resistente à compressão com menor absorção de água e mais durável (CAMPOS; KLEIN; MORE, 2020; MASOULE *et al.*, 2022).

Outro parâmetro de dosagem de CCAAs é a adição de sílica ativa, que desempenha um papel significativo na modificação das propriedades, como o aumento de resistência (OU *et al.*, 2022). Essa adição pode afetar a resistência na zona de transição interfacial entre os agregados gráudos e a pasta de cimento (CAMPOS; KLEIN; MORE, 2020). Além disso, a presença de sílica ativa contribui com a formação gel de aluminossilicato de sódio hidratado durante a reação de álcali-ativação (PERUMAL *et al.*, 2021).

Entretanto, embora as pesquisas tenham se concentrado na investigação da dosagem de CCAA, é igualmente importante considerar a aplicação adequado desse concreto para viabilizar sua utilização em projetos de engenharia. Uma das soluções

mais adequadas é utilizar os CCAAs em aplicação de construções pré-moldados, pois trata-se de uma metodologia de produção de material de construção compatível com as limitações dos CAAs, como tempo de pega relativamente rápido e elevada resistência inicial (GÖKÇE; TUYAN; NEHDI, 2021).

Além disso, é fundamental que os CCAAs mantenham suas propriedades e seu desempenho ao longo da vida útil de uma estrutura (WARDHONO *et al.*, 2017). Nesse contexto, é necessário investigar a durabilidade das peças pré-moldada de CCAA, especialmente quando se trata de um produto obtido a partir de ativador alcalino alternativo (MENDES *et al.*, 2020), conforme abordo neste estudo.

Portanto, o objetivo desta seção é avaliar a viabilidade de produzir peças de concretos álcali-ativado para pavimentação utilizando lodo calcinado proveniente de Estação de Tratamento de Água como precursor. Para isso, investigou-se as propriedades físicas, mecânicas e a durabilidade das peças de concreto, que foram produzidas em função de ativador alcalino convencional e alternativo. Complementarmente, buscou-se otimizar a dosagem dos concretos álcali-ativado a partir da variação da relação entre agregado miúdo e graúdo.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Materiais

5.2.1.1 Cimentos álcali-ativados

Para a produção dos CAAs, foi empregada uma mistura precursora composta por 60% de LETA calcinado e 40% de metacaulim em termos de massa. Como ativadores alcalinos, foram utilizados dois tipos: o convencional ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) e o alternativo ($\text{NaOH} + \text{sílica ativa}$), ambos preparados com uma concentração de 8 molar, conforme previamente determinado experimentalmente na seção anterior.

Na Tabela 15 são apresentadas as formulações dos cimentos álcali-ativados produzidos utilizando o ativador alcalino convencional (CC) e o ativador alcalino alternativo (CA).

Tabela 15 - Composição em massas dos componentes utilizados para dosagem dos cimentos álcali-ativados utilizados no planejamento experimental.

Dosagens	LETA e Metacaulim (g)	NaOH (g)	Na₂SiO₃ (g)	Água destilada (g)	Sílica ativa (g)
CC	100	8,64	92	21,6	-
CA	100	21,70	-	54,3	20,3

Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que na dosagem do CA para compensar a sílica proveniente do silicato de sódio, foi adicionada sílica ativa. Além disso, aumentou-se a quantidade de NaOH na dosagem para ajustar as proporções molares em relação ao ativador alcalino convencional.

5.2.1.2 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foi utilizada areia do tipo quartzosa oriunda de dragagem de rio, adquirida cerca de 60 kg na cidade de Porto Velho/RO. Antes de ser utilizada na dosagem dos concretos de CAAs, a areia foi mantida a um processo de secagem em estufa a 100 ± 5 °C por 24 horas e, posteriormente, armazenada em sacos plásticos no Laboratório de Resistência e Caracterização dos Materiais do IFRO, *Campus Porto Velho Calama*.

Os métodos utilizados para determinação das propriedades físicas do agregado miúdo utilizados neste estudo, bem como os procedimentos e normas utilizados para avaliação, estão elencados na subseção 5.2.4.

5.2.1.3 Agregado graúdo

Foi utilizado brita N° 0, também conhecido como pedrisco, e adquirida aproximadamente de 60 kg na cidade de Porto Velho/RO. Antes de ser utilizada na dosagem dos concretos de CAAs, o agregado graúdo foi seco em estufa a 100 ± 5 °C por 24 horas e, posteriormente, armazenada em sacos plásticos no Laboratório de Resistência e Caracterização dos Materiais do IFRO, *Campus Porto Velho Calama*.

Os métodos utilizados para determinação das propriedades físicas do agregado graúdo utilizados neste estudo, bem como os procedimentos e normas utilizados para avaliação, estão elencados na subseção 5.2.4.

5.2.2 Planejamento experimental de dosagem do concreto de cimento álcali-ativado

A dosagem de concreto para fabricação de peça de concreto para pavimentação utiliza, além do aglomerante e areia, agregado graúdo britado conhecido como brita N°0 ou pedrisco (FILHO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018; TONETTI *et al.*, 2019). Trata-se de um material com faixa granulométrica entre 4,75 mm a 9,5 mm, que confere um acabamento superficial menos poroso às peças de concreto.

Filho *et al.* (2017) e Santos *et al.* (2018) ao desenvolverem blocos de pavimentação de concreto utilizaram uma relação em massa entre aglomerante e agregados de 1:3. Neste sentido, o planejamento experimental da dosagem de CCAA utilizou essa mesma relação, todavia variou-se a relação entre agregado miúdo e graúdo, conforme mostra Tabela 16. Destaca-se que o CAA utilizado nesta fase é baseado nos resultados do planejamento de dosagem descritos na seção anterior, o qual demonstrou os melhores valores para as propriedades de resistência à compressão e durabilidade.

Tabela 16 - Composição em massas dos componentes utilizados para dosagem dos concretos de cimentos álcali-ativados utilizados com variações nas relações entre os agregados.

Dosagem	Relação entre os materiais	LETA + MK (g)	Areia (g)	Brita N°0 (g)
MC1	1:1,7:1,3	650	1105	845
MC2	1:1,8:1,2	650	1170	780
MC3	1:1,9:1,1	650	1235	715

Fonte: Autor, 2023.

A nomenclatura adotada para a dosagem dos concretos de cimento álcali-ativado (MC) é baseada na relação entre as massas de aglomerante, areia e brita N°0. O concreto com relação 1:1,7:1,3 foi denominado MC1, enquanto o concreto com relação 1:1,8:1,2 foi denominado MC2 e o concreto com relação 1:1,9:1,1 foi denominado MC3. Essa nomenclatura indica as diferentes proporções utilizadas na dosagem dos concretos.

No planejamento experimental de dosagem dos concretos álcali-ativado, um outro aspecto considerado foi a origem do ativador alcalino. Para tal, foi adotada a seguinte nomenclatura: MC1C para o concreto com relação 1:1,7:1,3, cujo CAA foi obtido a partir de ativador alcalino convencional, e MC1A para o CAA obtido a partir

de ativador alcalino alternativo. Essa nomenclatura foi aplicada de forma análoga para as dosagens MC2C, MC2A, MC3C e MC3A, conforme mostra Tabela 17.

Tabela 17 - Dosagens dos concretos álcali-ativados com variações nas relações entre os agregados e nos tipos de ativadores alcalinos utilizados.

Dosagens	Relação em massa entre precursor, areia e brita	Tipo de ativador alcalino
MC1C	1:1,7:1,3	Convencional
MC2C	1:1,8:1,2	Convencional
MC3C	1:1,9:1,1	Convencional
MC1A	1:1,7:1,3	Alternativo
MC2A	1:1,8:1,2	Alternativo
MC3A	1:1,9:1,1	Alternativo

Fonte: Autor, 2023.

Considerando também a aplicação do concreto de CAA na produção de peças de concreto com requisitos de baixa absorção de água, foi incorporado na dosagem o aditivo hidrofugante Sika[®]-1, conforme recomendação do fabricante: 2% em relação à massa do cimento. A utilização desse aditivo tem a expectativa de reduzir a absorção de água, impedindo a dissolução e deterioração dos íons de metal alcalino no material, através de processos dependentes do transporte de água. Com isso, espera-se aumentar a durabilidade das peças de concreto (RUAN *et al.*, 2022).

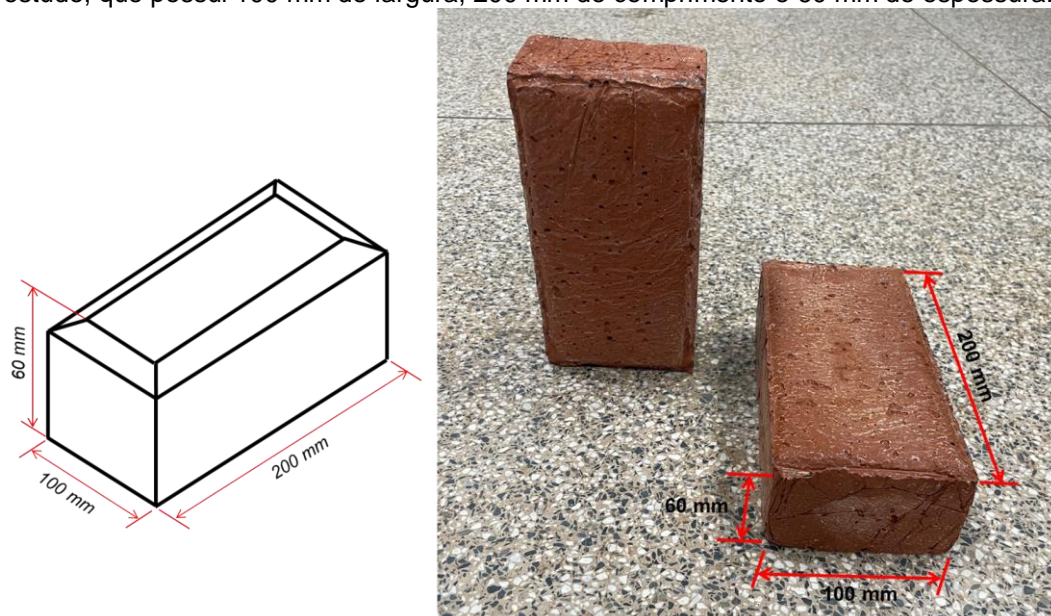
5.2.3 Preparo do concreto de cimento álcali-ativado

Os concretos de cimento álcali-ativado foram preparados e moldados no Laboratório de Resistência dos Materiais do Instituto Federal de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama. Inicialmente, a pasta de CAA foi preparada seguindo as descrições da subseção 3.2.3.

Em seguida, a areia e a brita, previamente medidas em massa com precisão de duas casas decimais e misturadas, foram utilizadas para preparar o concreto. Os agregados foram manualmente misturados com a pasta de CAA em uma bandeja metálica, utilizando espátulas como auxílio.

Considerando os objetivos deste estudo e a limitação de quantidade de material disponível, foram moldadas peças de concreto para pavimentação no formato Tipo I, conforme estabelecido na norma NBR 9781 (ABNT, 2013). Essas peças possuem formato retangular, com uma relação comprimento/largura igual a dois e uma espessura nominal mínima de 60 mm, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Dimensões da peça de concreto de cimento álcali-ativado desenvolvido neste estudo, que possui 100 mm de largura, 200 mm de comprimento e 60 mm de espessura.



Fonte: Autor, 2023.

As peças de concreto foram moldadas com auxílio de um equipamento manual para tal finalidade da Usimak, composto por uma forma metálica retangular e uma parte móvel que aplica pressão e realiza acabamento superficial, conforme mostra a Figura 35.

Figura 35 - Detalhe do equipamento da Usimak utilizado para moldagem das peças de concreto de cimento álcali-ativado.



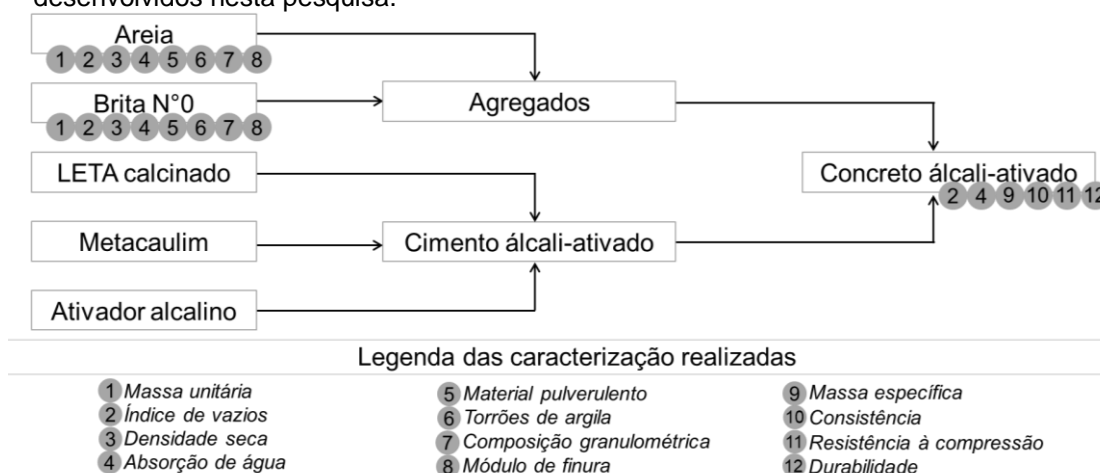
Fonte: Autor, 2023.

Os corpos de provas foram desmoldados após 24 h de cura e submetido aos ensaios aos 28 dias. A cura ocorreu em condições ambientais normais de temperatura local do laboratório à 23 ± 5 °C e umidade relativa inicial de 60 ± 5 %.

5.2.4 Ensaios de caracterização das peças de concreto

Foram realizados uma série de ensaios para caracterizar tanto os agregados quanto os concretos de cimento álcali-ativado, conforme ilustra o fluxograma da Figura 36.

Figura 36 - Ensaios de caracterização dos agregados e concretos álcali-ativados desenvolvidos nesta pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

O Quadro 4 resume os ensaios realizados nesta etapa, que foram desenvolvidos no Laboratório de Resistência e Caracterização de Materiais do Instituto Federal de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama.

Quadro 4 - Resumos dos ensaios de caracterização realizados com as respectivas referências utilizadas.

Ensaios	Referências
Massa unitária e índice de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Densidade seca e absorção de água do agregado miúdo	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Densidade seca e absorção de água do agregado graúdo	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Torrões de argila	NBR 7218 (ABNT, 2010)
Composição granulométrica	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2022)
Consistência	NBR 16889 (ABNT, 2020)
Massa específica, absorção de água e índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2005).
Absorção de água e resistência das peças de concreto	NBR 9781 (ABNT, 2013)
Durabilidade por ciclos de molhagem e secagem	HORPIBULSUK <i>et al.</i> , (2016)

Fonte: Autor, 2023.

Encontra-se no Apêndice A o programa dos ensaios de caracterização com os detalhes dos procedimentos realizados, no qual constam também os parâmetros utilizados, equipamentos e demais informações.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Caracterização dos agregados

5.3.1.1 Agregado miúdo

As propriedades físicas do agregado miúdo utilizados neste estudo, bem como os métodos utilizados, estão elencados na Quadro 5. Observa-se que a areia possui menos de 3% de material pulverulento, logo é adequado para produção de concreto submetido a desgaste superficial, conforme estabelece a NBR 7211 (ABNT, 2022).

Quadro 5 – Propriedades físicas da areia utilizada neste estudo.

Propriedades físicas	Métodos de ensaio	Valores característicos
Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,52 g/cm ³
Índice de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)	65,46%
Densidade na condição seca	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2,65 g/cm ³
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2,86%
Material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021)	1,85%
Torrões de argila	NBR 7218 (ABNT, 2010)	Isento
Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2022)	2,30

Fonte: Autor, 2023.

Além disso, com base no módulo de finura, é possível classificar esta areia como tendo uma distribuição granulométrica na zona ótima, uma vez que o valor está entre 2,20 e 2,90, de acordo com as especificações estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Portanto, estima-se que o agregado miúdo possua propriedades adequadas para a produção de concreto.

A Tabela 18 possui a composição granulométrica da areia utilizada neste estudo, no qual se observa que possui diâmetro máximo de 4,75 mm e se trata de uma areia média, pois majoritariamente a massa fica retida entre 0,15 e 0,60 mm.

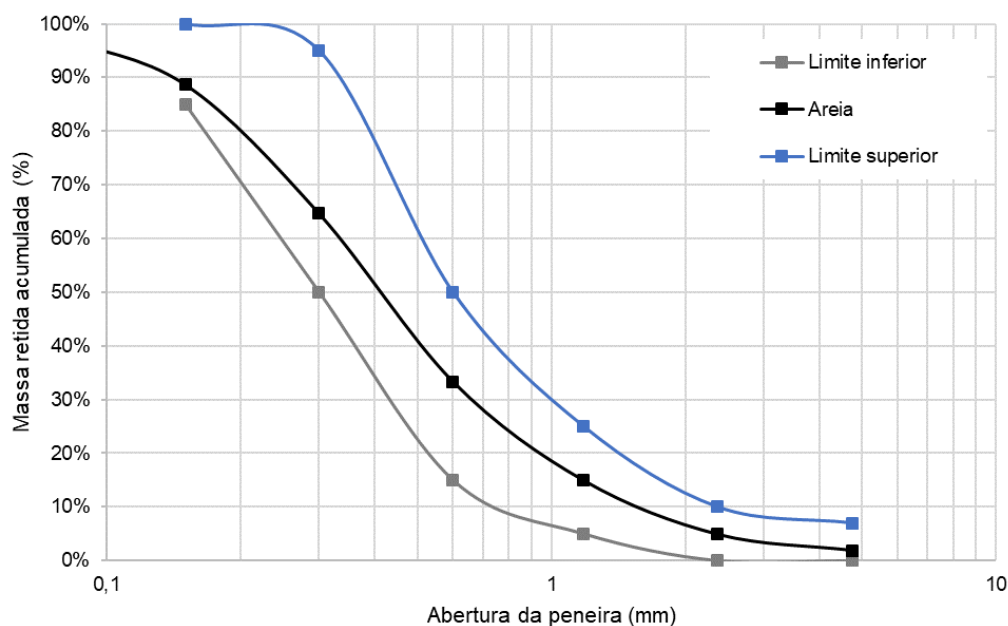
Tabela 18 - Composição granulométrica da areia utilizada neste estudo.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Massa percentual (%)		
		Retida	Retida acumulada	Passante acumulada
4,75	8,45	1,88	1,88	98,12
2,36	13,52	3,00	4,88	95,12
1,18	45,12	10,03	14,91	85,09
0,60	82,85	18,41	33,32	66,68
0,30	141,05	31,34	64,66	35,34
0,15	108,35	24,08	88,74	11,26
0,075	41,3	9,18	97,92	2,08
Fundo	9,36	2,08	100	0
Σ	450	100	-	-

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 37 consta-se que a areia utilizada possui distribuição granulométrica contínua e enquadra-se nos limites da zona utilizável de agregado miúdo para produção de concreto, conforme estabelecido na NBR 7211 (ABNT, 2022).

Figura 37 - Curva granulométrica da areia acompanhada dos limites inferiores e superiores da zona utilizável da distribuição granulométrica do agregado miúdo estabelecidos pela NBR 7211.



Fonte: Autor, 2023.

Essa curva granulométrica confirma o valor obtido no módulo de finura do agregado miúdo. Portanto, a partir das propriedades físicas e da característica

granulométrica, admite-se que a areia selecionada é adequada para produção das peças de concreto.

5.3.1.2 Agregado graúdo

As propriedades físicas deste agregado graúdo, bem como os métodos utilizados, estão elencadas na Quadro 6.

Quadro 6 – Propriedades físicas do agregado graúdo utilizada neste estudo.

Propriedades	Métodos de ensaio	Valores característicos
Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1,47 g/cm ³
Índice de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)	36,42%
Densidade na condição seca	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2,71 g/cm ³
Material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021)	0,22%
Torrões de argila	NBR 7218 (ABNT, 2010)	Isento
Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2022)	6,01

Fonte: Autor, 2023.

Complementarmente, a partir do módulo de finura do agregado graúdo, é possível classifica-lo com distribuição na zona granulométrica 4,75/12,5, visto que o valor está entre 5,77 e 6,15, conforme definido pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Neste sentido, estima-se que este agregado graúdo é de fato material britado N° 0.

A Tabela 19 possui a composição granulométrica da areia utilizada neste estudo, no qual se observa que possui diâmetro máximo de 9,5 mm e se trata de uma brita N°0, pois majoritariamente a massa fica retida entre 4,75 mm a 9,5 mm.

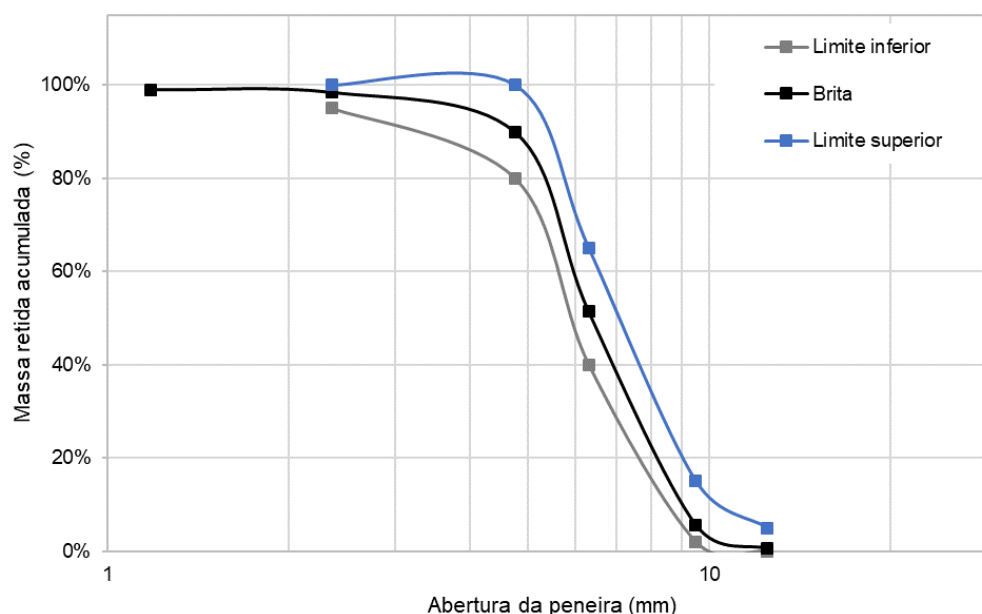
Tabela 19 - Composição granulométrica do agregado graúdo utilizada neste estudo.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Massa percentual (%)		
		Retida	Retida acumulada	Passante acumulada
19	0	0	0	100
12,5	6,15	0,62	0,62	99,39
9,5	50,41	5,04	5,66	94,34
6,3	457,12	45,71	51,37	48,63
4,75	385,12	38,51	89,88	10,12
2,36	85,12	8,51	98,39	1,61
1,18	5,83	0,58	98,98	1,03
0,60	4,38	0,44	99,41	0,59
0,13	3,08	0,31	99,72	0,28
0,15	1,68	0,17	99,89	0,11
Fundo	1,11	0,11	100	0
Σ	1000	-	-	-

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 38 consta-se que a brita utilizada possui distribuição granulométrica contínua e enquadra-se na zona granulométrica 4,75/12,5 de agregado graúdo para produção de concreto, conforme estabelecido na NBR 7211 (ABNT, 2022).

Figura 38 - Curva granulométrica da brita acompanhada dos limites inferiores e superiores da zona utilizável da distribuição granulométrica do agregado graúdo estabelecidos pela NBR 7211.



Fonte: Autor, 2023.

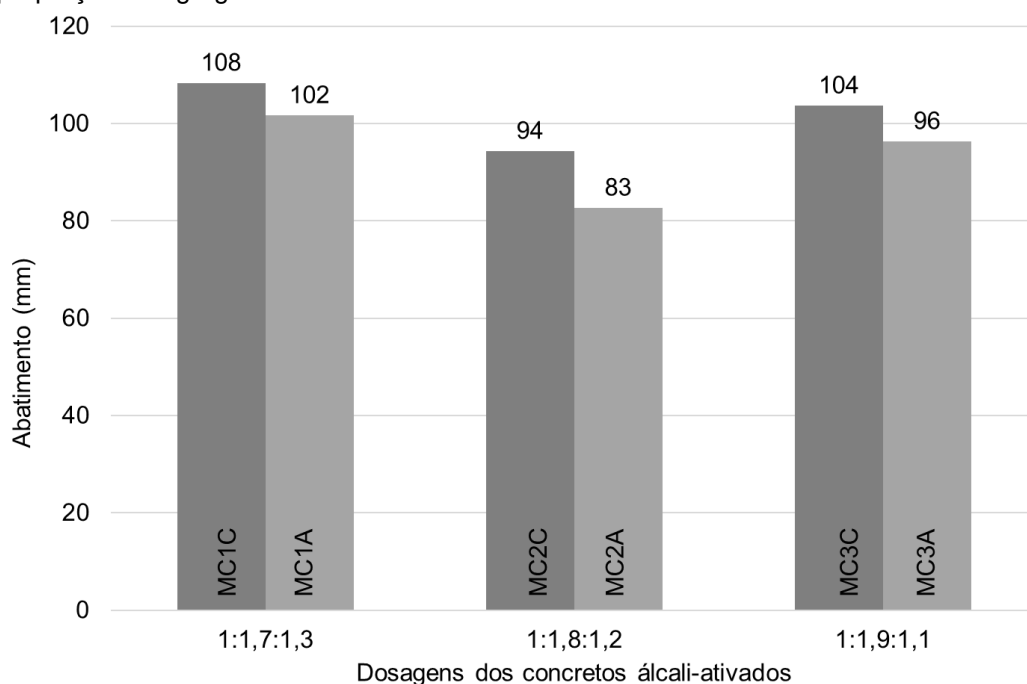
Portanto, a partir das propriedades físicas e da característica granulométrica, admite-se que o agregado graúdo selecionado é adequado para produção das peças de concreto.

5.3.2 Caracterização dos concretos álcali-ativados

5.3.2.1 Consistência

A Figura 39 apresenta o gráfico dos abatimentos dos concretos álcali-ativados produzidos neste estudo, no qual observa-se que o tipo de CAA e a relação entre agregados exercem efeito sobre a consistência dos concretos. A dosagem MC1C apresentou o maior abatimento (108 mm), enquanto a dosagem MC2A apresentou menor abatimento (83 mm).

Figura 39 - Abatimentos dos concretos álcali-ativados em função do tipo de cimento e da proporção de agregado.



Quanto ao tipo de cimento, observa-se que os que as dosagens produzidas com CC apresentaram maiores abatimentos em comparação às dosagens produzidas com CA. Isso pode ser atribuída ao fato de que os CA possuem maior quantidade de NaOH em comparação com as dosagens de CC, o que aumenta a viscosidade da solução ativadora alcalina, resultando em mistura de concreto mais pegajosa, conforme já destacado por Farhan, Sheikh e Hadi (2019). Segundo esses autores, o aumento da quantidade de NAOH afeta a consistência dos concretos álcali-ativados, diminuindo o abatimento.

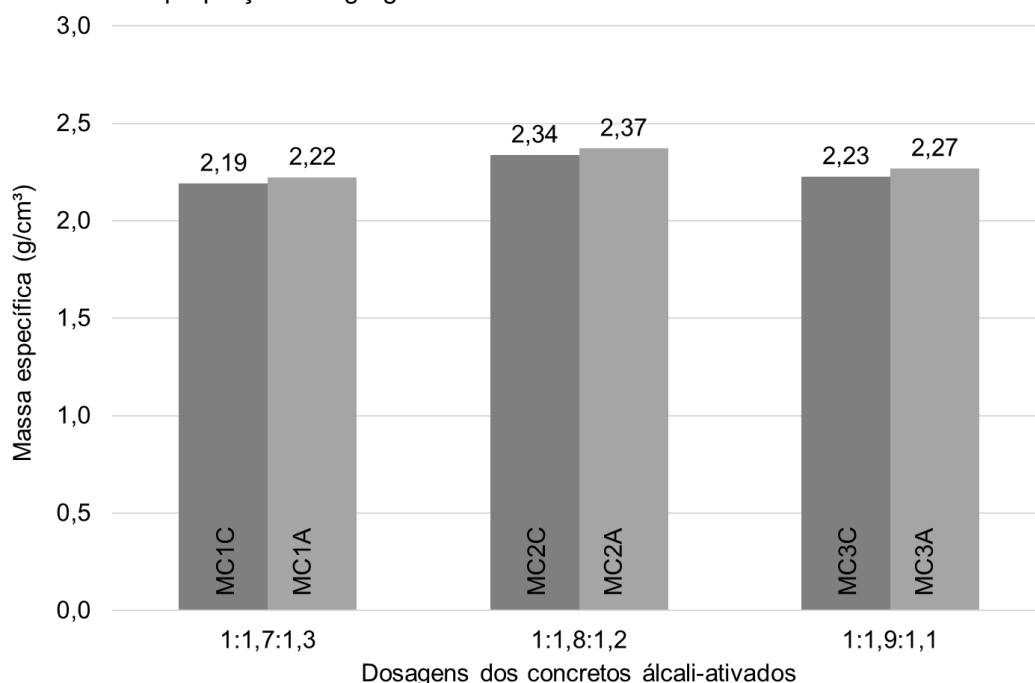
Essa diferença de consistência entre os concretos também pode ser atribuída à incorporação de sílica ativa nos CAs, que ocorreu indiretamente por meio do ativador alcalino alternativo. O uso de sílica ativa na dosagem tende a aumentar a necessidade de água na mistura devido ao seu tamanho de partícula reduzido, o que consequentemente promove uma redução da consistência do concreto álcali-ativado (LIU *et al.*, 2020; OU *et al.*, 2022).

Ao analisar as proporções entre os agregados, que impactam no empacotamento da mistura, verifica-se que as dosagens MC2 apresentaram um menor valor de abatimento em comparação com as outras dosagens. Campos, Klein e Marques Filho (2020) e Li *et al.* (2018) destacam que dosagens de concretos álcali-ativados que possuem melhor empacotamento entre os agregados resultam em mistura com menor fluidez e, consequentemente, em um menor valor de abatimento.

5.3.2.2 Propriedades físicas

A Figura 40 apresenta o gráfico das massas específicas seca dos concretos álcali-ativados, no qual observa-se que tanto o tipo de CAA quanto a relação entre agregados influenciam nas massas específicas dos concretos. A dosagem MC2A apresentou o maior valor registrado (2,37 g/cm³). Além disso, esses valores estão de acordo com os encontrados por Filho *et al.* (2017), que variaram entre 2,2 e 2,6 g/cm³, e são ligeiramente menores que as massas específicas de concretos convencionais de cimento Portland, conforme já constatado por Wardhono *et al.* (2017).

Figura 40 - Massas específicas seca dos concretos álcali-ativados em função do tipo de cimento e da proporção de agregado.



Fonte: Autor, 2023.

Em relação ao tipo de cimento álcali-ativados, verifica-se que as dosagens produzidas com CA apresentaram valores relativamente maiores em comparação às dosagens produzidas com CC. Isso pode ser justificado pelo fato de que as pastas de CA possuem valores de massa específica mais elevados do que as pastas de CC, conforme constatado na seção anterior, o que se reflete nas massas específicas dos concretos.

Constata-se que variação da proporção entre os agregados miúdo e graúdo também possui influência na massa específica dos concretos álcali-ativados. Ao aumentar a quantidade de areia na mistura, observa-se um aumento médio de 6,79%

na massa específica, comparando as dosagens MC1 e MC2. No entanto, ao aumentar ainda mais a quantidade de areia, ao comparar as dosagens MC2 e MC3, ocorre uma leve redução média de 4,45% na massa específica dos concretos álcali-ativados, embora ainda seja superior à MC1.

A variação da massa específica dos concretos está diretamente relacionada ao empacotamento entre os agregados miúdo e graúdo, conforme apontado por Campos, Klein e Marques Filho (2020), sendo que a dosagem MC2 apresentou um empacotamento mais eficiente, pois apresentou maior massa específica.

Essa diferença no empacotamento dos agregados impactou nas demais propriedades físicas de absorção de água e índice de vazios dos concretos, conforme é mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Propriedades físicas dos concretos álcali-ativados em função do tipo de cimento e da proporção de agregado.

Dosagens	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
MC1C	6,97	15,27
MC2C	5,90	13,83
MC3C	6,47	14,45
MC1A	6,78	15,04
MC2A	4,92	11,66
MC3A	5,27	11,94

Fonte: Autor, 2023.

Visto que as dosagens MC2, independentemente do tipo de cimento, apresentaram menores valores de absorção de água e de índice de vazios, infere-se que essa proporção entre agregados miúdo e graúdo proporciona melhor empacotamento às misturas de concreto álcali-ativado.

5.3.3 Caracterização das peças de concretos álcali-ativados

5.3.3.1 Absorção de água

A Tabela 21 apresenta os valores de absorção de água das amostras das peças de concreto álcali-ativado produzidas neste estudo. Observa-se que individualmente nenhuma peça apresentou uma absorção de água superior a 7%, satisfazendo, assim, o requisito estabelecido pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

Tabela 21 - Absorção de água das peças de concretos álcali-ativados em função do tipo de cimento e da proporção de agregado.

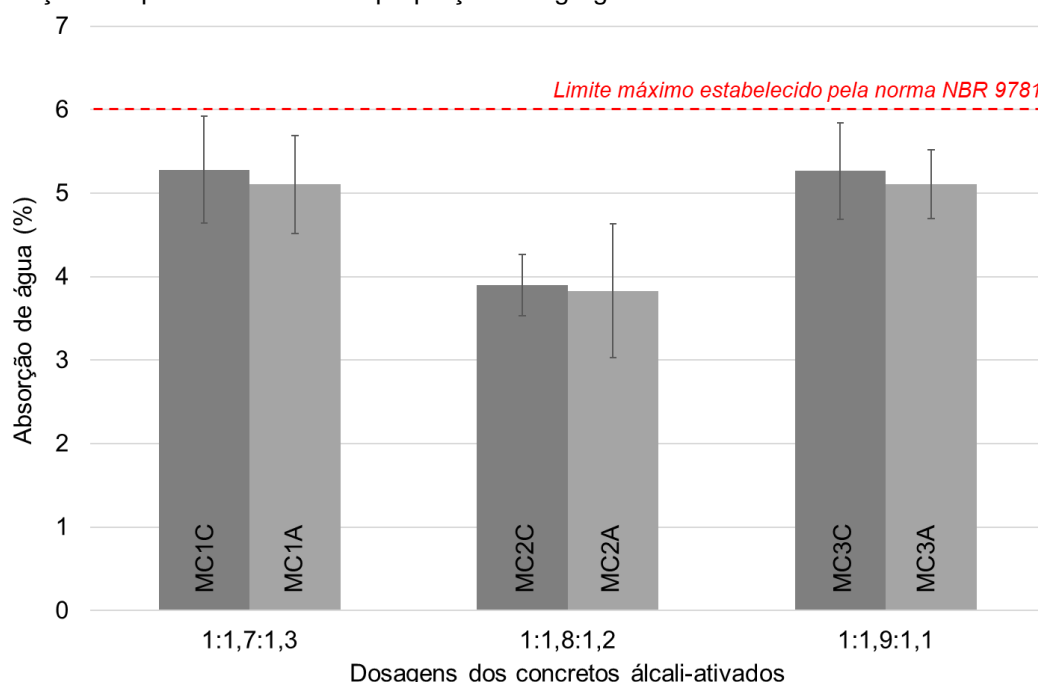
Dosagens	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 3 (%)	Média (%)	Des. Padrão (%)
MC1C	4,60	5,38	5,86	5,28	0,64
MC2C	4,06	3,48	4,17	3,90	0,37
MC3C	5,60	4,59	5,60	5,26	0,58
MC1A	4,59	4,98	5,75	5,10	0,59
MC2A	2,96	4,54	3,98	3,83	0,80
MC3A	4,69	5,11	5,52	5,11	0,41

Fonte: Autor, 2023.

Ademais, verifica-se que os valores dos desvios padrão são relativamente baixos (<20%), o que indica uma maior consistência e precisão nos resultados encontrados. Isso proporciona uma maior confiabilidade das medidas obtidas no ensaio de absorção de água das peças de concreto álcali-ativados.

Na Figura 41 tem-se o gráfico com a absorção média de água das peças de concreto de cimento álcali-ativados. Nota-se que todas as dosagens apresentaram uma taxa de absorção média de água inferior a 6%, o que satisfaz o requisito estabelecido pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

Figura 41 - Gráfico de absorção média de água das peças de concretos álcali-ativados em função do tipo de cimento e da proporção de agregado.



Fonte: Autor, 2023.

Comparativamente, é observado que as peças de concreto dosadas CAs apresentaram menor absorção de água. Acredita-se que o uso de ativador alcalino alternativo tenha contribuído para essa redução na absorção de água das peças de

concreto álcali-ativados, pois a sílica ativa presente auxilia na densificação da matriz cimentícia durante a reação de álcali-ativação (LIU *et al.*, 2020). Consequentemente, isso reduz a absorção de água das peças de concretos produzidas com CAs.

Independentemente do tipo de cimento utilizado, a dosagem MC2 demonstrou menores valores médios de absorção de água. Essa ocorrência pode ser atribuída ao melhor empacotamento dos grãos entre os agregados graúdos e miúdos, conforme evidenciado ao analisar as propriedades físicas dos concretos álcali-ativados.

5.3.3.2 Resistência à compressão

A Tabela 22 apresenta os valores de resistência à compressão das peças de concreto álcali-ativado produzidas neste estudo. Observa-se que a dosagem MC2A obteve a maior resistência média à compressão (61,31 MPa). Além disso, todas as dosagens das peças de concreto álcali-ativado exibiram um desvio padrão relativamente baixo, inferior a 8%, em relação à média.

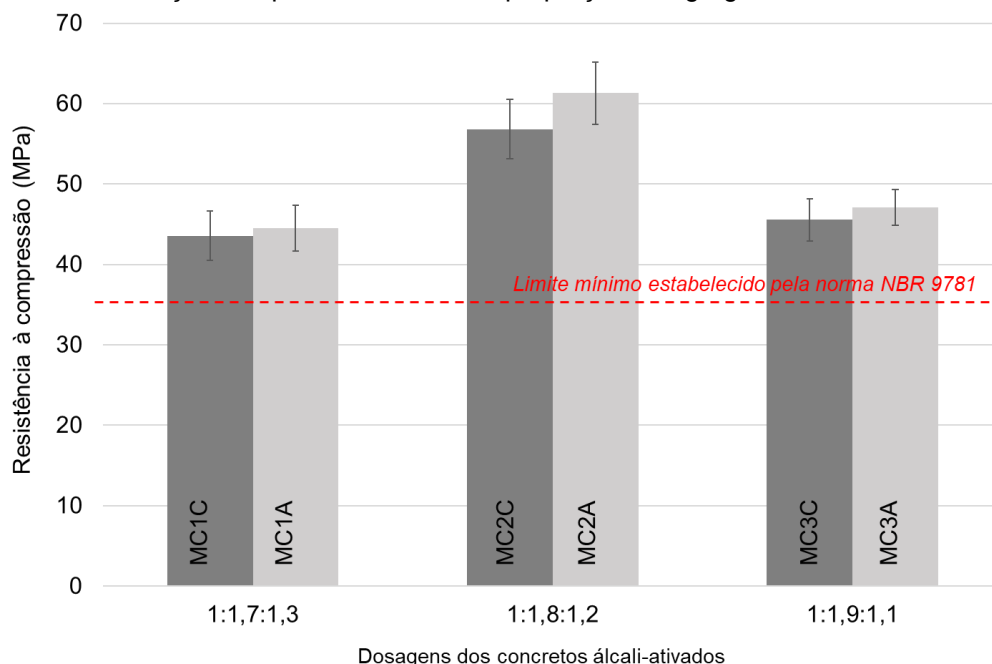
Tabela 22 – Resistência à compressão das peças de concretos álcali-ativados em função do tipo de cimento e da proporção de agregado.

Dosagens	Amostra 1 (MPa)	Amostra 2 (MPa)	Amostra 3 (MPa)	Média (MPa)	Des. Padrão (MPa)
MC1C	44,45	46,10	40,15	43,57	3,07
MC2C	60,12	52,87	57,48	56,82	3,67
MC3C	48,41	43,24	44,98	45,54	2,63
MC1A	47,54	44,15	41,85	44,51	2,86
MC2A	62,54	56,97	64,41	61,31	3,87
MC3A	49,54	45,28	46,49	47,10	2,20

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 42 tem-se o gráfico com a resistência média à compressão das peças de concreto de cimento álcali-ativados. Nota-se que todas as dosagens apresentaram uma resistência média a compressão superior a 35 MPa, atendendo assim o requisito estabelecido pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013) para suportar tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

Figura 42 - Gráfico de resistência média à compressão das peças de concretos álcali-ativados em função do tipo de cimento e da proporção de agregado.



Fonte: Autor, 2023.

Quanto ao tipo de cimento álcali-ativado, não se observa diferença significativa nas resistências à compressão das peças de concreto produzidas com ativador alcalino convencional ou alternativo, nas dosagens MC1 e MC3. Isso foi verificado por meio do Teste t unicaudal, no qual o valor calculado de $t_{\text{calculado}}$ foi menor que o valor $t_{\text{crítico}}$ (vide apêndice C). Entretanto, existe diferença significativa entre as dosagens MC2C e MC2A ($t_{\text{calculado}}=0,8988 > t_{\text{crítico}}=0,0526$). Isso ocorre devido a adição indireta de sílica ativa na dosagem do concreto, que combinado com empacotamento adequado dos agregados, promove maior resistência à compressão, conforme apontado por Ou *et al.* (2022).

No que tange a relação entre os agregados grão e miúdo, as resistências à compressão das peças de concreto com dosagem MC2 são significativamente maiores ($t_{\text{calculado}} > t_{\text{crítico}}$) do que a as dosagens MC1 e MC3. Todavia, estatisticamente não existe diferença entre as resistências à compressão MC1 e MC3. Portanto, a relação entre agregados da dosagem MC2 é mais eficiente, pois resulta em maior resistência à compressão das peças de concreto álcali-ativado.

5.3.3.3 Durabilidade

Na Tabela 23 tem-se os resultados do ensaio de durabilidade das peças de concretos álcali-ativados avaliados por meio de ciclos de saturação e secagem, na

qual constam as resistências médias à compressão (RES) e seus respectivos desvios padrão (DP), ambos em MPa. Após 30 ciclos, observa-se que todas as peças de concretos, com exceção daquelas da dosagem MC1CC, apresentaram resistência à compressão compatível (35 MPa) com o estabelecido pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

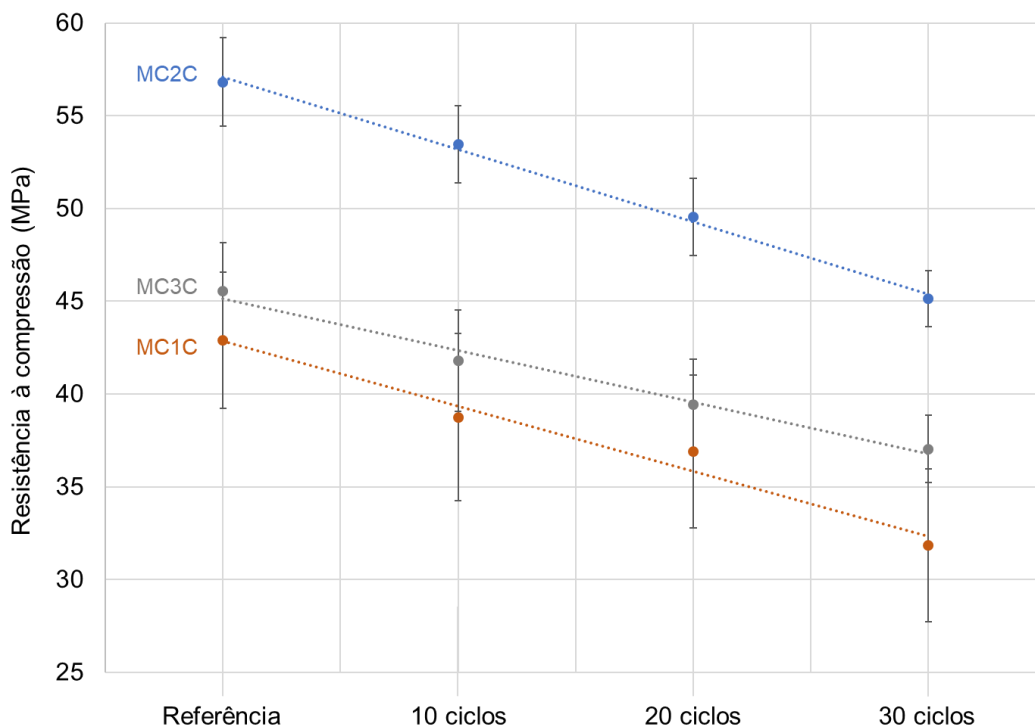
Tabela 23 - Influência dos ciclos saturação e secagem na resistência média à compressão dos CAAs obtidos a partir de ativadores alcalinos convencional e alternativo com diferentes concentrações de NaOH.

Dosagens	Referência		10 ciclos		20 ciclos		30 ciclos	
	RES	DP	RES	DP	RES	DP	RES	DP
MC1C	42,90	2,39	38,76	2,09	36,90	2,08	31,85	1,51
MC2C	56,82	3,67	53,46	4,51	49,55	4,14	45,15	4,11
MC3C	45,54	2,63	41,81	2,73	39,45	2,42	37,03	1,81
MC1A	44,51	2,86	40,35	3,36	38,10	2,58	35,38	2,14
MC2A	61,31	3,87	57,49	3,11	54,96	2,45	52,05	3,09
MC3A	47,10	2,20	43,08	2,86	40,46	1,45	37,18	2,25

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 43 tem-se as resistências à compressão das peças de concreto produzidos com ativador alcalino convencional, após serem submetidos a ciclos de saturação e secagem. Observa-se que a dosagem MC2C apresentou menor redução da resistência à compressão quando comparados à amostra de referência (0 ciclo). Ao final dos ciclos 10, 20 e 30, as reduções foram de 5,92%, 12,81% e 20,54%, respectivamente. Enquanto as demais dosagens (MC1 e MC3) apresentaram reduções maiores na resistência à compressão, em relação à amostra de referência (0 ciclo), sendo de 8,20%, 13,38% e 18,69% ao final dos ciclos 10, 20 e 30, respectivamente.

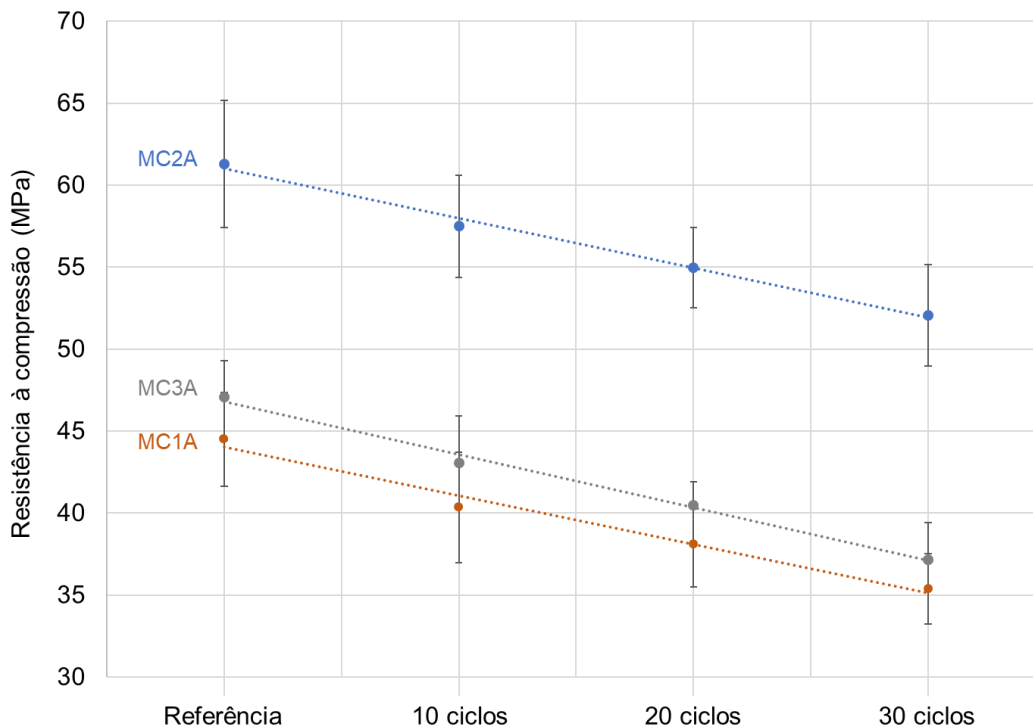
Figura 43 - Influência dos ciclos de saturação e secagem na resistência média à compressão das peças de concretos álcali-ativados produzidos a partir de ativador alcalino convencional e diferentes proporções entre os agregados graúdo e miúdo.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 44 são apresentadas as resistências à compressão dos concretos álcali-ativados produzidos com ativador alcalino alternativo, após serem submetidos a ciclos de saturação e secagem. Observa-se que as peças de concretos produzidas com a dosagem MC2A apresentaram menor redução da resistência à compressão quando comparados à amostra de referência (0 ciclo). Ao final dos ciclos 10, 20 e 30, as reduções foram de 6,23%, 10,35% e 15,10%, respectivamente. Enquanto as peças produzidas a partir das demais dosagem apresentaram reduções maiores na resistência à compressão, em relação à amostra de referência (0 ciclo), sendo de 8,55%, 14,10% e 20,52% ao final dos ciclos 10, 20 e 30, respectivamente.

Figura 44 - Influência dos ciclos de saturação e secagem na resistência média à compressão das peças de concretos álcali-ativados produzidos a partir de ativador alcalino alternativo e diferentes proporções entre os agregados graúdo e miúdo.



Fonte: Autor, 2023.

Independentemente do tipo de cimento, é notável que a dosagem MC2 apresentou menor redução percentual de resistência à compressão devido aos ciclos de saturação e secagem. Entretanto, na dosagem produzida com ativador alcalino alternativo (MC2A), essa perda de resistência foi relativamente ainda menor.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizou-se uma análise comparativa das propriedades dos concretos álcali-ativados produzidos utilizando o ativador alcalino convencional ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) e o ativador alcalino alternativo ($\text{NaOH} + \text{sílica ativa}$) em função da variação da relação entre agregado miúdo e graúdo. A partir dos resultados obtidos, é possível concluir:

- Os agregados utilizados, tanto miúdo quanto graúdo, no preparo dos concretos possuem propriedades física e granulometria que o tornam adequados para a produção de concreto;
- A dosagem MC2 apresentou melhor empacotamento entre os grãos dos agregados, visto que apresentou menor consistência, maior massa específica,

menor absorção de água e menor índice de vazios, indecentemente do tipo de ativador alcalino utilizado no preparo do concreto álcali-ativado;

- As dosagens desenvolvidas a partir de ativador alcalino alternativo apresentaram menor consistência, maior massa específica, maior massa específica, menor absorção de água e menor índice de vazios. Estima-se que a sílica ativa utilizada no preparo do ativador alcalino contribuiu para melhora nas propriedades dos concretos álcali-ativados;
- As peças de concretos álcali-ativados desenvolvidas atenderam aos requisitos de absorção de água ($\leq 6\%$) e resistência à compressão (≥ 35 MPa) estabelecidos para peças de pavimentação solicitada por tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha;
- A durabilidade das peças de concretos álcali-ativados diminuiu em função do aumento dos ciclos de saturação e secagem. Entretanto, as dosagens MC2, especialmente CA, apresentaram menor perda de resistência ao final de cada ciclo;
- A dosagem MC2A, que é obtida de ativador alcalino alternativo, apresentou melhores características, visto que apresentou menor absorção de água (3,83%), maior resistência à compressão (61,31 MPa) aos 28 dias de cura e maior durabilidade ($>15\%$) ao final dos 30 ciclos de saturação e secagem;

Por fim, ao considerar a resistência à compressão e a durabilidade das peças de concretos de CAAs produzidos com nesta etapa do estudo, decidiu-se por utilizar a dosagem MC2, que possui relação entre massa de 1:1,8:1,2 (cimento:areia:brita), para avaliação do impacto ambiental associado a fabricação das peças de concreto álcali-ativado na próxima etapa da pesquisa.

6 PEGADA DE CARBONO DAS PEÇAS DE CONCRETO

6.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável na construção civil exige a implementação de processos e produtos ambientalmente corretos nos projetos de engenharia (GOMES *et al.*, 2019a; HERTEL; PONTIKES, 2020). Uma solução promissora é a utilização de cimentos álcali-ativados (CAAs) para reduzir as emissões de carbono antropogênicas na atmosfera, pois esses materiais apresentam baixas emissões de gases de efeito estufa e propriedades semelhantes ao cimento Portland à base de clínquer (ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2018).

Os CAAs são produzidos pela ativação alcalina de materiais aluminossilicatos, como metacaulim, pozolana vulcânica, cinzas volantes, escórias de alto forno, lama vermelha e outros subprodutos industriais. Eles são amplamente utilizados na produção de argamassa e concreto, sendo destacada na literatura sua principal vantagem ambiental em relação ao cimento Portland, que é a redução de 40-80% nas emissões de gases de efeito estufa (MESHRAM; KUMAR, 2018; ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2018; SHI *et al.*, 2021; SHILAR *et al.*, 2022).

Essas emissões englobam diversos gases, como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonos, perfluorcarbonos, entre outros, frequentemente denominados como dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{-eq}}$) devido ao seu potencial de aquecimento global (TEH *et al.*, 2017). Portanto, é importante observar que, quando a literatura aborda o conceito de "pegada de carbono" dos CAAs e seus derivados, está se referindo à quantificação das emissões de gases de efeito estufa expressas em $\text{CO}_{2\text{-eq}}$.

Para avaliar as emissões de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ associadas a qualquer processo ou produto, como os CAAs, é necessário realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Segundo a NBR ISO 14004 (ABNT, 2009), a ACV é uma técnica utilizada para avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a um produto, processo ou atividade ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a disposição final.

Estudos sobre ACV dos CAAs, bem como de argamassa, concreto e outros derivados, apontam que os ativadores alcalinos à base de silicato são os principais contribuintes para a pegada ambiental desses materiais (LUUKKONEN *et al.*, 2018; DAL POZZO *et al.*, 2019; SALAS *et al.*, 2018). Dependendo da composição química

do silicato alcalino, bem como da fronteira do sistema utilizado na ACV, o uso dos CAAs na construção civil pode se tornar ambientalmente inviável (NIKRAVAN; FIRDOUS; STEPHAN, 2023). Isso ocorre principalmente devido à produção de silicatos por rotas térmicas e uso de sílica e carbonatos ou hidróxidos alcalinos em seu processo produtivo, o que resulta em um consumo significativo de energia e emissões de gases do efeito estufa (SHILAR *et al.*, 2022).

Uma maneira de reduzir as emissões de CO₂-eq durante a produção de CAAs é o uso de ativadores alcalinos alternativos. Geralmente, esses ativadores alcalinos alternativos não incluem silicatos alcalinos industrializados e utilizam resíduos em seu processo de produção, como resíduos de vidro, cinzas de casca de arroz e sílica ativa (TCHAKOUTÉ *et al.*, 2016; TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017b; JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; ALSALMAN *et al.*, 2021). Dessa forma, a fonte de sílica para o ativador alcalino é um resíduo e não um silicato alcalino industrializado, o que reduz significativamente o impacto potencial no aquecimento global do produto (TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017a).

Portanto, a avaliação do impacto ambiental relacionado aos ativadores alcalinos nos CAAs, bem como a busca por soluções alternativas derivadas de subprodutos industriais, abre novos caminhos para o desenvolvimento de materiais com critérios sustentáveis mais rigorosos (PASSUELO *et al.*, 2017). No entanto, ainda são necessárias investigações sobre a ACV de produtos derivados de CAAs obtidos com ativadores alcalinos alternativos (MENDES *et al.*, 2021).

Dessa forma, o objetivo desta seção é investigar o impacto ambiental, em termos de emissões de CO₂-eq, associado à produção de peças de concreto com CAAs obtidos a partir de ativadores alcalinos convencionais e alternativos. Além disso, os resultados obtidos são comparados com as emissões de CO₂-eq provenientes da produção de peças de concreto convencional obtido com cimento Portland.

6.2 METODOLOGIA

O inventário do Ciclo de Vida da produção das peças de concreto foi desenvolvido em escala de laboratório. No entanto, este estudo estimou os potenciais impactos ambientais de sua produção em escala industrial. Assim, uma escala de escala de laboratório para escala industrial é modelada.

O estudo do inventário do ciclo de vida do produto desenvolvido nesta tese foi feito conforme orientação das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009), que descrevem os princípios, os requisitos e a estrutura de uma avaliação de ciclo de vida. Nas subseções seguintes são definidos o objetivo e o escopo, em seguida é feita a análise do inventário, e por fim, a interpretação.

6.2.1 Definição de objetivo

Este inventário foi elaborado devido a escassez de dados nacionais relativos ao concreto de cimento álcali-ativado, especialmente no que se refere a produção de pré-moldados, como a produção de peças de concreto para pavimentação. Além disso, estudos desenvolvidos, tanto na forma de estudo de caso quanto na forma de revisão bibliográfica, apontam divergência da viabilidade ambiental sobre o uso de CAAs em substituição ao cimento Portland.

Os principais objetivos são: i) realizar o inventário do ciclo de vida para as etapas de produção de matérias-primas, transporte e produção das peças de concreto para pavimentação de passeio utilizando CAA a base de LETA; ii) quantificar os benefícios ambientais obtidos com a utilização de CAA em substituição ao cimento Portland para produção de peças de concreto para pavimentação e; iii) obter indicadores primários de emissão de CO₂ para a produção desses blocos.

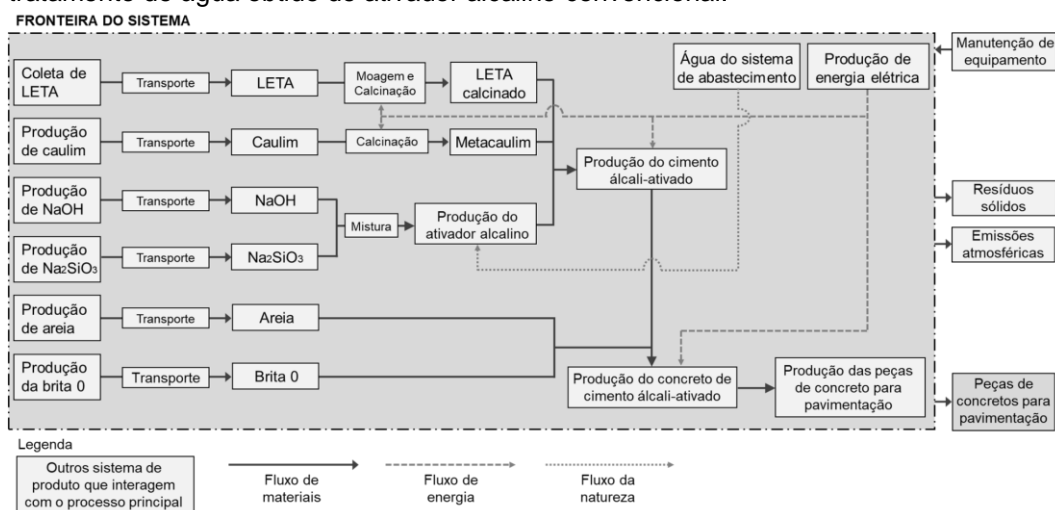
Este estudo se destina a classe de engenheiros (consumidores técnicos) que desenvolvem pesquisa sobre o tema ou que atuam de forma direta com a construção de pavimentos e/ou construções sustentáveis no Brasil.

6.2.2 Definição de escopo

A função do sistema é pavimentar um passeio com largura de 2 metros e comprimento de 50 metros, conforme orienta os Cadernos Técnicos de Composições para Pavimento Intertravado (CAIXA, 2017). Neste sentido, para esse serviço demanda-se para cada metro quadrado de passeio 53 blocos retangulares de concreto nas dimensões 10 cm por 20 cm com 6 cm de espessura para cada m² de passeio (CAIXA, 2022). Portanto, são necessárias 5.300 peças de concreto no formato de bloco de concreto retangular para a função do sistema.

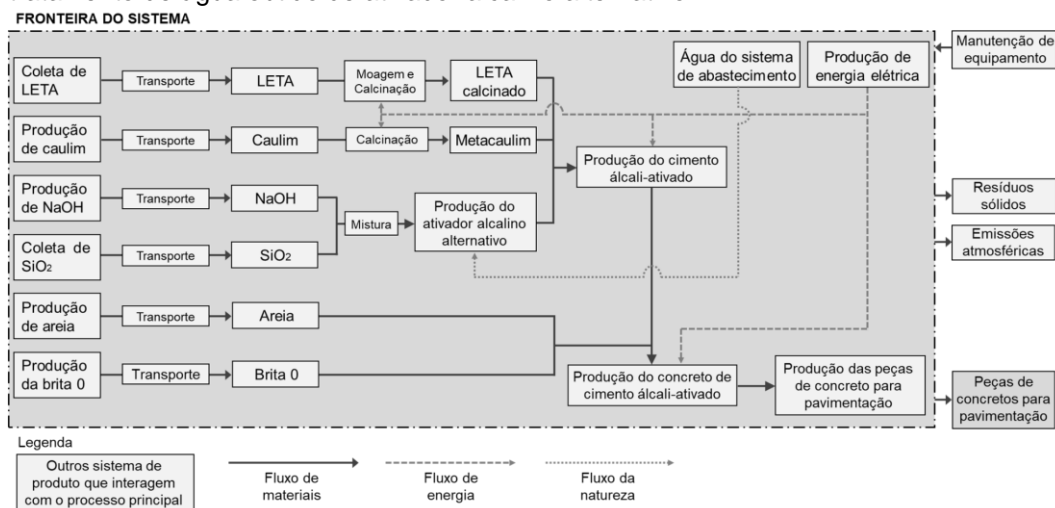
As figuras 45, 46 e 47 ilustram os sistemas de produtos com os processos e fluxos elementares, conforme as etapas definidas no objetivo deste ICV. Observa-se que são considerados três cenários para produção de peças de concreto. No primeiro, utiliza-se concreto álcali-ativado a partir de ativador alcalino convencional (CC), enquanto o segundo utiliza concreto álcali-ativado a partir de ativador alcalino alternativo (CA). E no terceiro cenário, utiliza-se concreto de cimento Portland.

Figura 45 - Definição do sistema de produto para produção das peças de concreto para pavimentação de passeio a partir de cimento álcali-ativado de lodo de estação de tratamento de água obtido de ativador alcalino convencional.



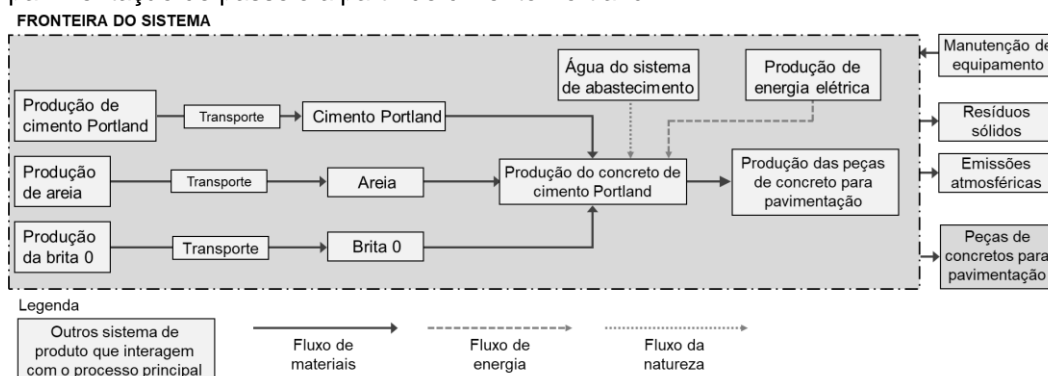
Fonte: Autor, 2023.

Figura 46 - Definição do sistema de produto para produção das peças de concreto para pavimentação de passeio a partir de cimento álcali-ativado de lodo de estação de tratamento de água obtido de ativador alcalino alternativo.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 47 - Definição do sistema de produto para produção das peças de concreto para pavimentação de passeio a partir de cimento Portland.



Fonte: Autor, 2023.

Ressalta-se que não foram incluídas nos sistemas de produto as fases de obra, de uso e manutenção, e de demolição do pavimento. Neste sentido, não está sendo considerado todo o ciclo de vida do produto, pois este estudo não se trata de estudo de ACV. Trata-se, portanto, de uma avaliação de desempenho ambiental do produto, ou seja, um inventário do ciclo de vida de peças de concreto para pavimentação. Dessa forma, a categoria de desempenho ambiental que foi avaliada é a emissão de gases do efeito estufa quantificada em termos de CO₂-eq, conforme a fronteira do sistema de produto.

6.2.3 Requisitos dos dados

Neste estudo foram considerados dados de entrada tanto primários quanto secundários. Os dados primários representam o beneficiamento do caulim e do LETA em termos de consumo de energia elétrica, bem como a demanda para produção de ativador alcalino alternativo.

O Quadro 7 elenca os principais dados primários de entrada considerados nos processos de produção e transporte de insumos utilizados para produção das peças de concreto de CAA e cimento Portland.

Quadro 7 - Resumo dos dados primários de entrada para produção e transporte dos insumos utilizados neste estudo.

Dados	Descrição do processo	Fator
LETA	Distância de transporte da ETA/CAERD até o IFRO (RO)	9,10 km
Caulim	Distância de transporte da fábrica localizada em Barbacena (PA) até o IFRO (RO)	2.491 km
NaOH e Na ₂ SiO ₃	Distância de transporte da fábrica da Kalim em Junqueirópolis (SP) até o IFRO (RO)	2.541 km
Areia	Distância de transporte da jazida em Candeias do Jamari (RO) até o IFRO (RO)	27 km
Brita	Distância de transporte da jazida em Candeias do Jamari (RO) até o IFRO (RO)	52 km
Sílica ativa	Distância de transporte da fábrica Tecnosil em Itupeva (SP) até o IFRO (RO)	2.922 km
Cimento Portland CP IV	Distância de transporte da fábrica Votorantim em Nobres (MT) até o IFRO (RO)	1.322 km
Estufa	Potência do equipamento utilizado para secagem do LETA	1.200 W
Mufla	Potência do equipamento utilizado para calcinação do LETA e caulim	1.800 W
Agitador magnético	Potência do equipamento utilizado para preparo do ativado alcalino alternativo	200 W
Misturador mecânico	Potência do equipamento utilizado para preparo das pastas de CAAs	200 W

Fonte: Autor, 2023 (compilado).

Já os dados secundários de entrada, foram oriundos da base de dados Ecoinvent versão 3.8 (2021), cujas características estão apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Resumo dos dados secundários de entrada e dos fatores de CO₂ dos insumos utilizados neste estudo.

Dados	Descrição do processo	Fator de emissão
Produção de caulim	Processo de produção de caulim no Brasil envolvendo as etapas desde a extração até o transporte e processamento.	0,087 kg CO ₂ -eq/kg
Produção de NaOH	Processo de produção de NaOH a partir de soda cáustica sólida (processo "hidróxido de sódio, sem água, sólido").	2,41 kg CO ₂ -eq/kg
Produção de Na ₂ SiO ₃	O processo de produção de silicato de sódio envolve a fusão de sílica e carbonato de sódio a altas temperaturas.	1,35 kg de CO ₂ -eq/kg
Produção de areia	Extrativismo de areia de aluvião a céu aberto, que representa a produção de areia natural em leitos de rios.	11,5 kg de CO ₂ -eq/t
Produção de brita	Produção de pedra britada, granito, beneficiamento a seco, na pedreira.	18,5 kg de CO ₂ -eq/t
Produção e distribuição de água	Processo que captação da água, o tratamento para remover impurezas e contaminantes, e a distribuição da água tratada para as redes de abastecimento.	0,034 kg de CO ₂ -eq/m ³
Produção e distribuição de energia elétrica	Processo de produção de energia elétrica em hidrelétricas, que envolve desde a construção e operação da usina até a transmissão e distribuição da energia elétrica.	0,0065 kg de CO ₂ -eq/kWh
Transporte	Transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário	0,142 kg de CO ₂ -eq/km
Produção de cimento Portland	A produção de cimento Portland envolve processos desde a extração dos insumos até o transporte e processamento.	0,865 kg kg de CO ₂ -eq/kg

Fonte: Ecoinvent, 2021 (adaptado).

Os dados coletados na base de dados Ecoinvent versão 3.8 (2021) são baseados nas características do Brasil, ou seja, considera-se que os insumos foram produzidos no território nacional, visto que a emissão de gases do efeito estufa (CO₂-eq) pode variar de acordo com o nível de tecnologia empregado, os processos envolvidos na produção, o tipo de combustível utilizado, a eficiência energética da dos equipamentos, entre outros fatores.

A partir dos dados de quantidades para produção das peças de concreto para pavimentação (vide Apêndice D) e fatores de emissão, foram realizados os cálculos

para determinar o impacto no Microsoft Office Excel, considerando a unidade funcional e as fronteiras do sistema estabelecidas neste estudo.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Apêndice C consta toda a memória de cálculo da emissão de CO_{2-eq} dos processos envolvidos na produção das peças de concreto para pavimentação tanto oriundo de CAA a partir de ativadores alcalinos convencional e alternativo quanto de cimento Portland.

A Tabela 24 apresenta o resumo da emissão de CO_{2-eq} para produção das peças de concreto álcali-ativado obtido em função do ativador alcalino convencional. Observa-se que emissão total foi de 7.705,88 kg de CO_{2-eq} para produção de 5.300 peças de concretos.

Tabela 24 – Resumo da memória de cálculo da emissão de CO_{2-eq} para a produção de 5.300 peças de concreto de cimento álcali-ativado obtido em função do ativador alcalino convencional.

Processos envolvidos na emissão de CO _{2-eq}	Quantidade (kg)	Quantidade (%)
Produção de LETA calcinado	400,02	5,19
Produção de metacaulim	856,16	11,11
Produção e transporte de NaOH	824,73	10,70
Produção e transporte de Na ₂ SiO ₃	5.422,28	70,37
Produção e transporte de areia	95,09	1,23
Produção e transporte da brita	107,00	1,39
Produção e distribuição de água	0,03	0,00
Produção das peças	0,57	0,01
Total de emissão de CO _{2-eq}	7.705,88	100%

Fonte: Autor, 2023.

Verifica-se que o processo de produção e transporte de Na₂SiO₃ é responsável por 70,37% de toda emissão de CO_{2-eq} gerada na produção das peças de concreto. Esse resultado está de acordo com estudos desenvolvidos por Luukkonen *et al.* (2018) e Dal Pozzo *et al.* (2019), os quais destacam que o ativador alcalino derivado de Na₂SiO₃ é o principal fator que impacta negativamente o meio ambiente durante a produção de concreto álcali-ativado, tal que contribui entre 65% a 90% das emissões. Além disso, Shilar *et al.* (2022) apontam que altas emissões de CO_{2-eq} associadas ao Na₂SiO₃ ocorrem principalmente devido à energia consumida durante o seu processo de fabricação.

Estima-se que a emissão de CO_{2-eq} é 1.211,62 kg/m³, o que representa um aumento de 36,56% em relação a emissão encontrada por Meshram e Kumar (2018),

que produziu concreto álcali-ativador na Índia a partir de metacaulim, cinza volante, Na_2SiO_3 e NaOH . Por sua vez, a emissão dos concretos álcali-ativados produzidos na China por Shi *et al.* (2021) a partir de cinza volante, Na_2SiO_3 e NaOH é corresponde a cerca de 27,77% (336,56 kg de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$), enquanto a emissão obtida por Gomes *et al.* (2019a) no Brasil a partir de metacaulim, Na_2SiO_3 e NaOH corresponde a 19,79% (239,82 kg de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$) das emissões encontradas neste estudo.

Essa diferença observada, quando comparada aos valores da literatura, pode ser atribuída às emissões resultantes do transporte dos insumos utilizados na produção do concreto álcali-ativado. Devido às dimensões continentais do Brasil e à ausência de indústrias na região norte, especialmente no Estado de Rondônia, onde esta pesquisa foi realizada, foi necessário transportar caulim, Na_2SiO_3 e NaOH por longas distâncias. Portanto, o transporte desses insumos por meio rodoviário contribui com 23,59% das emissões de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$.

A Tabela 25 resume as emissões de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ associadas à produção das peças de concreto álcali-ativado em relação ao ativador alcalino alternativo. Verifica-se que a emissão total foi de 3.820,87 kg de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ para a fabricação das peças de concreto destinadas à pavimentação de um passeio com dimensões de 2 metros de largura e 50 metros de comprimento.

Tabela 25 – Resumo da memória de cálculo da emissão de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ para a produção de 5.300 peças de concreto de cimento álcali-ativado obtido em função do ativador alcalino alternativo.

Processos envolvidos na emissão de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$	Quantidade (kg)	Quantidade (%)
Produção de LETA calcinado	400,02	10,47
Produção de metacaulim	856,16	22,41
Produção e transporte de NaOH	2.070,07	54,18
Produção e transporte de sílica ativa	290,17	7,59
Produção e transporte de areia	95,09	2,49
Produção e transporte da brita	107,01	2,80
Produção do ativador alcalino alternativo	1,72	0,05
Produção e distribuição de água	0,06	0,00
Produção das peças	0,57	0,02
Total de emissão de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$	3.820,87	100%

Fonte: Autor, 2023.

Nota-se que o processo de produção e transporte de NaOH contribuiu com 54,18% de toda emissão de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ da produção das peças de concreto. Adicionalmente, verifica-se o processo utilizado de desenvolvimento do ativador alcalino alternativo contribuiu com apenas 7,64%, oriundo dos processos de produção e transporte de sílica ativa (7,59%) e produção do ativador alcalino (0,05%).

Resultados semelhantes foram encontrados por Salas *et al.* (2018) que destacam que o NaOH é um fator que possui maior carga ambiental da produção de concreto álcali-ativado, correspondendo a 55-74% das emissões.

Ao considerar a produção de um metro cúbico de concreto álcali-ativado, estima-se que a emissão de CO_{2-eq} seja de 600,77 kg. Essa quantidade é semelhante às emissões encontradas em estudos anteriores (MESHRAM; KUMAR, 2018) e até mesmo maior (GOMES *et al.*, 2019a; SHI *et al.* 2021), que produziram concretos álcali-ativados com ativadores alcalinos convencionais. No entanto, não foram encontradas avaliações ou inventários de ciclo de vida específicos para concretos álcali-ativados obtidos com ativadores alcalinos alternativos, o que dificulta uma comparação direta nesse aspecto.

Entretanto, vale ressaltar essa diferença de emissões entre este estudo e a literatura pode ser atribuída às emissões resultantes do transporte de caulim, sílica ativa e NaOH utilizados na produção das peças de concreto álcali-ativado, que precisaram ser transportados por milhares de quilômetros entre a fábrica e o local de uso. Portanto, o transporte desses insumos por meio rodoviário contribui com 40,08% das emissões de CO_{2-eq}.

A Tabela 26 apresenta o resumo da emissão de CO_{2-eq} para produção das peças de concreto convencional obtido em função de cimento Portland CP IV. Para produção de 5.300 peças de concreto convencional, observa-se que emissão total foi de 3.829,36 kg de CO_{2-eq}.

Tabela 26 – Resumo da memória de cálculo da emissão de CO_{2-eq} para a produção de 5.300 peças de concreto de convencional obtido em função de cimento Portland CP IV.

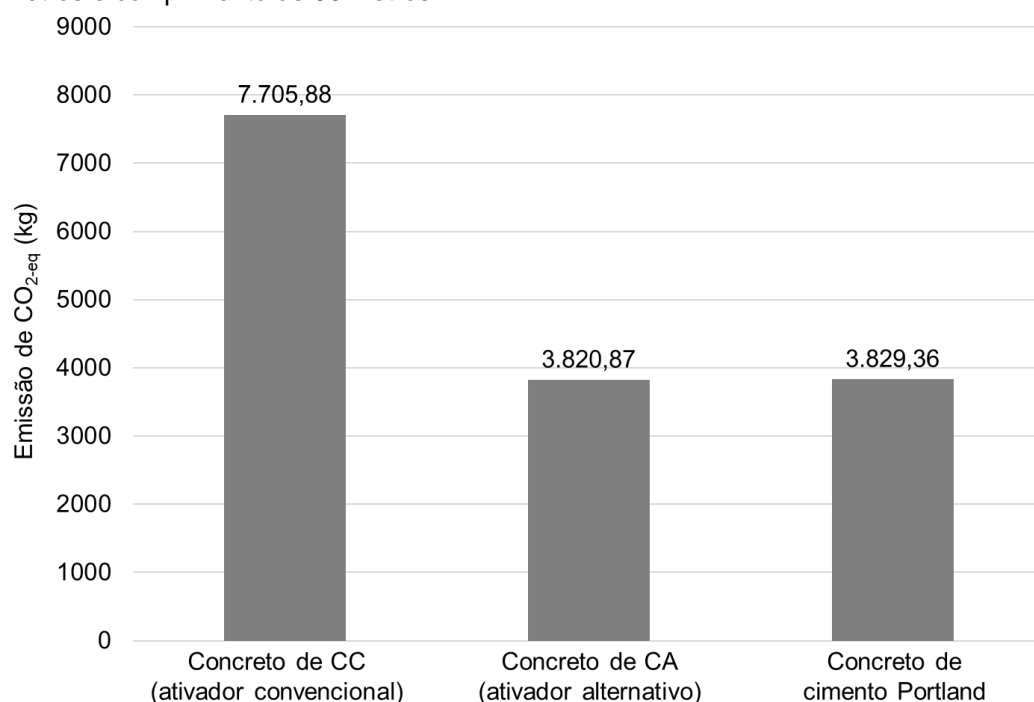
Processos envolvidos na emissão de CO_{2-eq}	Quantidade (kg)	Quantidade (%)
Produção e transporte de cimento Portland	3.626,63	94,71
Produção e transporte de areia	95,09	2,48
Produção e transporte da brita	107,00	2,79
Produção e distribuição de água	0,06	0,00
Produção das peças	0,57	0,01
Total de emissão de CO_{2-eq}	3.829,36	100%

Fonte: Autor, 2023.

Verifica-se que 94,71% de toda emissão de CO_{2-eq} para produção das peças de concreto convencional advém do processo de produção e transporte do cimento Portland. Resultados semelhantes foram encontrados por Gomes *et al.* (2019a), que produziram concreto de cimento Portland CP-II-E no Brasil e observaram que 93,60% das emissões de gases advém da produção e transporte do cimento Portland.

Na Figura 48 tem-se um gráfico comparativo com as emissões de CO₂-eq para produção de 5.300 peças de concreto obtidas a partir de diferentes tipos de cimento, no qual se observa que a produção das peças de concreto de CC possui a maior emissão de CO₂-eq (7.705,88 kg). Um resultado semelhante foi observado por Alsalman *et al.* (2021), que constataram que uma mistura de concreto álcali-ativado obtida com uma solução ativadora de hidróxido de sódio e sílica ativa apresenta menor consumo de energia e emissão de CO₂-eq. Por outro lado, os autores verificaram que a mistura proveniente de uma solução ativadora de hidróxido de sódio e silicato de sódio é menos eficiente do ponto de vista ambiental quando comparada ao cimento Portland.

Figura 48 – Gráfico da pegada de carbono para a produção de peças de concretos a partir de diferentes cimentos em função do cenário pavimentar um passeio com largura de 2 metros e comprimento de 50 metros.



Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que a produção das peças de concreto de CA é 50,42% menor do que a produção de peças de CC. Portanto, substituir o ativador alcalino convencional (Na₂SiO₃ + NaOH) pelo ativador alcalino alternativo (NaOH + sílica ativa) na produção de concretos álcali-ativados é eficiente na redução da pegada de carbono. Esse resultado é consistente com o encontrado por Passuelo *et al.* (2018), que constataram o potencial de redução das emissões de gases do efeito estufa ao utilizarem ativadores alcalinos alternativos derivados de cinzas da casca de arroz para produção de CAAs.

Destaca-se que, ao substituir o ativador alcalino convencional pelo ativador alcalino alternativo, foi necessário aumentar o consumo de NaOH em 151%. Apesar

desse aumento, o uso do ativador alcalino alternativo demonstrou ser ambientalmente eficiente na redução da pegada de carbono na produção de concreto álcali-ativado. No entanto, Rossi *et al.* (2022) alertam para a inviabilidade do uso de NaOH em escala industrial para atender à demanda de aplicação mais ampla dos concretos álcali-ativados no setor da construção.

Verifica-se que a emissão de CO_{2-eq} da produção de peças de concretos de CC é 49,69% maior que a emissão associada a produção das peças de concreto de cimento Portland. Esse valor diverge de valores encontrados na literatura que apontam que os concretos álcali-ativados possuem menor pegada de carbono que os concretos de cimento Portland (GOMES *et al.*, 2019a; MESHRAM; KUMAR, 2018; SALAS *et al.*, 2018; SHI *et al.*, 2021). Estima-se que essa divergência esteja em partes relacionada a distância de transporte dos insumos, conforme já discutido, que impactou negativamente a pegada de carbono das peças de concretos em mais de 23%.

Em relação as peças de concreto de CA, a produção das peças de concreto de cimento Portland apresentou uma maior emissão de gases do efeito estufa, o equivalente a 8,48 kg de CO_{2-eq}. Embora essa diferença seja relativamente baixa, fica evidente a viabilidade ambiental da produção de peças de CAA a partir de LETA e ativador alcalino alternativo. Isso ocorre por diversos motivos. Primeiramente, o uso de LETA na produção de concreto álcali-ativado proporciona uma destinação ambientalmente adequada para esse resíduo, que geralmente é descartado inadequadamente nos corpos d'água. Em segundo lugar, ao utilizar esse resíduo na fabricação de um novo ligante, evita-se a exploração de jazidas naturais utilizadas na produção de cimento Portland. Além disso, o uso de sílica ativa na produção do ativador alcalino alternativo abre uma nova perspectiva de aproveitamento desse resíduo proveniente da indústria siderúrgica.

Conforme destacado por Hertel e Pontikes (2020), a adoção dos materiais álcali-ativados na construção civil enfrenta diversas barreiras técnicas, econômicas, ambientais e legislativas. Nesse contexto, este estudo contribui para aumentar a conscientização sobre a viabilidade ambiental do uso de concretos álcali-ativados provenientes de subprodutos industriais, ao evidenciar que essas peças apresentam uma pegada de carbono inferior às peças de cimento Portland. No entanto, como mencionado por Provis (2018) e Rossi *et al.* (2022), ainda há outros desafios que limitam a aplicação de concretos álcali-ativados na engenharia civil, tais como a

aceitação no mercado e a capacidade da indústria de suprimentos em atender à demanda por Na_2SiO_3 e NaOH , por exemplo.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de uma análise do inventário do ciclo de vida é possível concluir que a produção de peças de concreto álcali-ativado utilizando LETA e ativador alcalino alternativo apresenta uma menor pegada de carbono em comparação com as produções de peças de concreto álcali-ativado obtidas através de um ativador convencional (redução de 50,42%) e de cimento Portland (redução de 0,22%). Entretanto, as emissões de $\text{CO}_2\text{-eq}$ da produção de peças de concreto de CA foi negativamente afetada pela produção e transporte de NaOH .

Os resultados revelaram também que a produção das peças de concreto CC apresenta uma emissão maior de $\text{CO}_2\text{-eq}$ em comparação com a produção das peças de concreto de cimento Portland. Essa diferença é atribuída principalmente à produção do Na_2SiO_3 , que exerce um impacto significativo na inviabilidade ambiental da fabricação desses concretos álcali-ativados para a produção de peças pré-moldadas.

Adicionalmente, verificou-se que a distância de transporte dos insumos industrializados utilizados na produção dos concretos álcali-ativados, como caulim, NaOH e Na_2SiO_3 , contribuiu com um aumento de mais de 20% na pegada de carbono da produção das peças de concreto álcali-ativado. No entanto, mesmo com esse aumento, a produção das peças de concreto álcali-ativado mostrou-se viável ambientalmente devido à redução das emissões de gases do efeito estufa e à utilização de resíduos em seu processo produtivo.

Portanto, fica evidente a viabilidade ambiental do uso de um ativador alcalino alternativo na produção de CAA e, conseqüentemente, de peças de concreto álcali-ativado, conforme comprovado pelas emissões de $\text{CO}_2\text{-eq}$. Essa constatação representa os primeiros passos dos projetos de engenharia com base em conceitos de sustentabilidade. Os resultados obtidos nesta seção reforçam a importância da aplicação da ACV como uma ferramenta fundamental para garantir a sustentabilidade e a melhoria contínua no setor da construção civil.

7 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo desenvolver peças de concreto álcali-ativado para pavimentação utilizando lodo calcinado proveniente de Estação de Tratamento de Água (LETA) como matéria-prima. Para isso, realizou-se uma análise abrangente que abordou aspectos técnicos e ambiental. Inicialmente caracterizou-se os insumos utilizados para produção de cimentos álcali-ativados (CAAs). Em seguida, determinou-se as propriedades dos cimentos e peças de concreto. Por fim, analisou-se as emissões de gases do efeito estufa associada a produção das peças de concreto para pavimentação.

Na revisão bibliográfica, identificou-se as potencialidades do uso de resíduos para produção de CAAs. Os resultados obtidos também indicam a equivalência do ativador alternativo em relação ao convencional, e seu potencial de aplicação para desenvolvimento de CAAs, não só do ponto de vista ambiental, mas também do ponto de vista técnico. Portanto, a substituição do ativador convencional pelo alternativo e a utilização de resíduos como precursores sólidos são estratégias importantes para a produção sustentável de CAAs, que contribuem para a redução das emissões de CO₂, para a gestão adequada de resíduos e até mesmo para melhoria da economia circular.

Na caracterização dos cimentos álcali-ativados (CAAs), constatou-se a viabilidade de utilizar o LETA para produção de aglutinante ativado por álcalis. A partir de um planejamento fatorial, verificou-se que a molaridade do ativador alcalino e a substituição de LETA por metacaulim afetam estatisticamente as propriedades dos CAAs. Portanto, ao aumentar a molaridade do ativador alcalino e da substituição parcial, observou-se uma melhora das propriedades dos CAAs no que tange aumento da massa específica, redução da absorção de água e aumento da resistência à compressão. No entanto, identificou-se que os CAAs são suscetíveis a ciclos de saturação e secagem, tal que a resistência diminuiu significativamente com aumento do número de ciclos.

Ao avaliar a influência do tipo de ativador alcalino nas propriedades, constatou-se a viabilidade de utiliza-se ativador alcalino alternativo derivado de NaOH e sílica ativa para produção de CAAs, visto que os CAAs possuem propriedades semelhantes aos CAAs desenvolvidos em função do ativador alcalino convencional. Entretanto, os CAs possuem diferença de propriedades de tempo de pega, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade, em relação aos CCs, que pode ser

associado maior disponibilidade de sílica no ativador alcalino alternativo. Além disso, constatou-se que a diferença de propriedades observadas entre CAs e CCs pode também está relacionada a quantidade de álcalis, representado pela concentração molar do ativador alcalino.

Na caracterização das peças de concreto álcali-ativados (CCAAs), verificou-se a relação entre agregado miúdo e graúdo afeta as propriedades dos CCAAs. Constatou-se que a relação em massa de 1,8:1,2 (areia:brita) proporciona um melhor empacotamento entre os grãos, resultando em maior massa específica, menor absorção de água e maior resistência à compressão dos CCAAs. Complementarmente, todas as peças de concretos álcali-ativados atendem aos critérios de resistência à compressão e absorção de água estabelecidos por norma. Entretanto, notou-se que as peças de CCAA obtidas de ativador alcalino alternativo apresentaram maior durabilidade após os ciclos de saturação e secagem, quando comparadas com as peças de concretos CCAA obtidas de ativador alcalino convencional.

Em relação a pegada de carbono, identificou-se que as distâncias de transporte dos insumos afetam em até mais de 20% nas emissões de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ durante a produção de peças de concreto. As peças de concreto para pavimentação obtidas CCs possuem maior pegada de carbono, quando comparada as com emissões de gases do efeito estufa associada a produção de peças de concreto obtidas de CAs e cimento Portland. Entretanto, ressalta-se que as peças de concreto obtidas de CAs possuem menor emissão de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ e maior durabilidade, o que evidenciaria a viabilidade ambiental de se utilizar ativador alcalino alternativo para produção de peças de concreto para pavimentação.

Enfim, neste estudo buscou evidenciar a viabilidade técnica e ambiental do uso de LETA e ativador alcalino alternativo para produção peças de concreto, aplicado a construção. Essa abordagem oferece uma alternativa viável para a aplicação dos CCAAs, considerando suas características específicas, e pode contribuir para a expansão do uso desses materiais em projetos de engenharia. Ademais, investigou-se a durabilidade dos CAAs, CAs e de das peças de concretos, visto que compreensão da durabilidade desses materiais é de suma importância para garantir sua viabilidade e confiabilidade em aplicações de engenharia, bem como para orientar o desenvolvimento de estratégias de manutenção e conservação adequadas.

Apesar dos avanços na compreensão das propriedades dos CAAs obtidos a partir de LETA proporcionados por este estudo, ainda se fazem necessários estudos futuros para aprimorar os conhecimentos desses materiais. Esses estudos devem direcionar-se para a análise da micrografia, reologia e durabilidade em diferentes ambientes, a fim de obter um entendimento mais abrangente dos CAAs. Além disso, considerando que a substituição do ativador alcalino convencional pelo alternativo demonstrou ser ambientalmente viável, devido às reduzidas emissões de $\text{CO}_2\text{-eq}$, é ainda necessário investigar outras categorias de impacto ambiental, como a energia incorporada, ecotoxicidade, acidificação, desertificação, entre outras. Somente através da continuação desses estudos sobre os CAAs será possível viabilizar a aplicação sustentável desse material em projetos de engenharia.

REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, Mariam *et al.* Environmental and economic perspective of waste-derived activators on alkali-activated mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124651, 2021.
- ABDULLAH, Alida *et al.* The Effects of various concentrations of NaOH on the inter-particle gelation of a fly ash geopolymer aggregate. **Materials**, v. 14, n. 5, p. 1111, 2021.
- AKBAR, Arslan *et al.* Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101492, 2021.
- ALBITAR, Mohammad *et al.* Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 374-385, 2017.
- ALMUTAIRI, Ahmad *et al.* Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00733, 2021.
- ALSALMAN, Ali *et al.* Energy and CO₂ emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete. **Cleaner Environmental Systems**, v. 3, p. 100047, 2021.
- AMIN, Shereen Kamel *et al.* Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 610-620, 2017.
- ANDREOLI, Cleverson V. *et al.* Produção, Composição e constituição de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). In: **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 2006. p. 29 – 48.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos** — Classificação. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.
- 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 16607: Cimento Portland** — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro. ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16889: Concreto** — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland** — Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16915:**
Agregados — Amostragem. Rio de Janeiro. ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16916:**
Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro. ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16917:**
Agregado graúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro. ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16972:**
Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro. ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16973:**
Agregados — Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro. ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 17054:**
Agregados — Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738:**
Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7211:**
Agregados para concreto — Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7215:**
Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7218:**
Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

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 9781: Peças de concreto para pavimentação** — Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040:**
Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro. ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental** — Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações. Rio de Janeiro. ABNT, 2009.

AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez *et al.* Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 359-368, 2017.

BAJPAI, Rishabh *et al.* Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120147, 2020.

BENHELAL, Emad; SHAMSAEI, Ezzatollah; RASHID, Muhammad Imran. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 104, p. 84-101, 2021.

BERNAL, Susan A. *et al.* Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 91, n. 9, p. 2365-2388, 2016.

BERNAL, Susan A.; PROVIS, John L. Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 4, p. 997-1008, 2014.

BHATT, Arpita *et al.* Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. e00263, 2019.

BIANCO, Isabella; TOMOS, Branwen Ap Dafydd; VINAI, Raffaele. Analysis of the environmental impacts of alkali-activated concrete produced with waste glass-derived silicate activator—A LCA study. **Journal of Cleaner Production**, v. 316, p. 128383, 2021.

BOSKOVIC, I.; VUKCEVIC, M.; KRGOVIC, M. Role of binder in the process of geopolymerisation of red mud-based products. **Journal of Environmental Protection and Ecology**, v. 16, n. 4, p. 1407-1413, 2015.

BOURZIK, Oumaima *et al.* Study of the effects of drinking water treatment sludge on the properties of Class F fly ash-based geopolymer. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 58, p. 87668-87679, 2022.

BRITO, Woshington S.; RACANELLI, Lêda A.; SOUZA, José A. S. Geopolimerização de lama vermelha: influência da concentração de naoh na síntese à temperatura ambiente. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL - CAIXA. **Cadernos técnicos de composições para pavimento intertravado**. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI. Brasília: CAIXA, 2017. Disponível em: www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-composicoes-aferidas-lote3-saneamento-infraestrutura-urbana/SINAPI_CT_LOTE3_INTERTRAVADO_v004.pdf. Acessado em: 10 jun. 2022.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL - CAIXA. **Custos de composições analítico.** Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI. Brasília: CAIXA, 2022. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_658. Acessado em: 10 jun. 2022.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121907, 2020.

CASTILLO, Hengels *et al.* Factors affecting the compressive strength of geopolymers: A review. **Minerals**, v. 11, n. 12, p. 1317, 2021.

CASTILLO, Hengels *et al.* State of the art of geopolymers: A review. **e-Polymers**, v. 22, n. 1, p. 108-124, 2022.

CHEN, Kailun *et al.* Effect of NaOH concentration on properties and microstructure of a novel reactive ultra-fine fly ash geopolymer. **Advanced Powder Technology**, v. 32, n. 8, p. 2929-2939, 2021.

CHEN, Zhen *et al.* Compressive strength and microstructural properties of dry-mixed geopolymer pastes synthesized from GGBS and sewage sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 597-607, 2018.

CHENG, Yaqian *et al.* Study on the effectiveness of silica fume-derived activator as a substitute for water glass in fly ash-based geopolymer. *Journal of Building Engineering*, v. 51, p. 104228, 2022.

CHITSAZ, S.; TARIGHAT, A. Molecular dynamics simulation of N-A-S-H geopolymer macromolecule model for prediction of its modulus of elasticity. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118176, 2020.

CHOWDHURY, Raja; APUL, Defne; FRY, Tim. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 4, p. 250-255, 2010.

COPPOLA, Luigi *et al.* Binders alternative to Portland cement and waste management for sustainable construction - Part 1. **Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials**, v. 16, n. 3, p. 186-202, 2018a.

COPPOLA, Luigi *et al.* Binders alternative to Portland cement and waste management for sustainable construction - Part 2. **Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials**, v. 16, n. 3, p. 186-202, 2018b.

DAL POZZO, Alessandro *et al.* Life cycle assessment of a geopolymer mixture for fireproofing applications. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 1743-1757, 2019.

DARMAWAN, Muhammad Sigit *et al.* The effect of chloride environment on mechanical properties geopolymer binder with fly ash. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, p. 648-655, 2014.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, Joseph. Why alkali-activated materials are not geopolymers. **Geopolymer Institute**, 2018.

DEB, Partha Sarathi; NATH, Pradip; SARKER, Prabir Kumar. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. **Materials & Design** (1980-2015), v. 62, p. 32-39, 2014.

DIMAS, Dimitrios D.; GIANNOPOULOU, Ioanna P.; PANIAS, Dimitrios. Utilization of alumina red mud for synthesis of inorganic polymeric materials. **Mineral processing & Extractive metallurgy review**, v. 30, n. 3, p. 211-239, 2009.

DOLLENTE, Ithan Jessemar R.; TAN, Raymond R.; PROMENTILLA, Michael Angelo B. Life cycle assessment of precast geopolymer products. **Chemical Engineering Transactions**, v. 88, p. 799-804, 2021.

DUXSON, Peter *et al.* Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of materials science**, v. 42, p. 2917-2933, 2007.

ECOINVENT. **Ecoinvent database version 3.8**. [base de dados]. Saint Gallen: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2021. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>. Acesso em: 23 jan. 2023.

FARHAN, Khatib Zada; JOHARI, Megat Azmi Megat; DEMIRBOĞA, Ramazan. Assessment of important parameters involved in the synthesis of geopolymer composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120276, 2020.

FARHAN, Nabeel A.; SHEIKH, M. Neaz; HADI, Muhammad NS. Investigation of engineering properties of normal and high strength fly ash based geopolymer and alkali-activated slag concrete compared to ordinary Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 26-42, 2019.

FERNANDO, Sarah *et al.* Life cycle assessment and cost analysis of fly ash–rice husk ash blended alkali-activated concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 113140, 2021.

FILHO, Joaquim Nery Sant'ana *et al.* Technical and environmental feasibility of interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017104, 2017.

GARCIA-LODEIRO, Ines *et al.* The role of aluminium in alkali-activated bentonites. **Materials and Structures**, v. 48, p. 585-597, 2015.

GERALDO, Rodrigo H.; FERNANDES, Luiz FR; CAMARINI, Gladis. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 146-155, 2017.

GERALDO, Rodrigo H.; GONÇALVES, Jardel P.; CAMARINI, Gladis. Mechanical properties of an eco-friendly one-part alkali-activated binder: Influence of metakaolin and water content. **Ceramics International**, v. 49, n. 8, p. 11854-11864, 2023.

GHANI, Usman *et al.* Role of calcination on geopolymerization of lateritic clay by alkali treatment. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 25, n. 3, p. 101198, 2021.

GLASBY, Tom *et al.* EFC geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. **Concrete**, v. 2015, p. 1-9, 2015.

GODOY, Luis Gabriel Graupner *et al.* Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00329, 2020.

GOMES, Kelly Cristiane *et al.* Carbon emissions associated with two types of foundations: CP-II Portland cement-based composite vs. geopolymer concrete. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019a.

GOMES, Samuel de Carvalho *et al.* Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, conservation and recycling**, v. 145, p. 148-159, 2019b.

GRÄFE, M.; POWER, Greg; KLAUBER, Craig. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. **Hydrometallurgy**, v. 108, n. 1-2, p. 60-79, 2011.

GRAYTEE, Ahmed; SANJAYAN, Jay G.; NAZARI, Ali. Development of a high strength fly ash-based geopolymer in short time by using microwave curing. **Ceramics International**, v. 44, n. 7, p. 8216-8222, 2018.

HAMDANE, Hasna *et al.* Effect of alkali-mixed content and thermally untreated phosphate sludge dosages on some properties of metakaolin based geopolymer material. **Materials Chemistry and Physics**, v. 248, p. 122938, 2020.

HAMIDI, Rashidah Mohamed; MAN, Zakaria; AZIZLI, Khairun Azizi. Concentration of NaOH and the effect on the properties of fly ash based geopolymer. **Procedia engineering**, v. 148, p. 189-193, 2016.

HERTEL, Tobias; PONTIKES, Yiannis. Geopolymers, inorganic polymers, alkali-activated materials and hybrid binders from bauxite residue (red mud) - Putting things in perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120610, 2020.

HOANG, Minh D.; DO, Quang M.; LE, Van Q. Effect of curing regime on properties of red mud based alkali activated materials. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 119779, 2020.

HORPIBULSUK, Suksun *et al.* Durability against wetting–drying cycles of water treatment sludge–fly ash geopolymer and water treatment sludge–cement and silty clay–cement systems. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 1, p. 04015078, 2016.

HUANG, Teng *et al.* Optimization for the COD reduction and thermodynamics research of coal-series kaolin. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, p. 1-10, 2019.

HUMAD, Abeer M.; PROVIS, John L.; CWIRZEN, Andrzej. Alkali activation of a high MgO GGBS–fresh and hardened properties. **Magazine of Concrete Research**, v. 70, n. 24, p. 1256-1264, 2018.

HWANG, Chao-Lung *et al.* Properties of alkali-activated controlled low-strength material produced with waste water treatment sludge, fly ash, and slag. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 459-471, 2017.

ISTUQUE, Danilo Bordan *et al.* Effect of sewage sludge ash on mechanical and microstructural properties of geopolymers based on metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 95-103, 2019.

JAIN, Mohit. Use and Properties of Blast Furnace Slag as a Building Material-A Review. **International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES)**, v. 2, n. 4, p. 54-60, 2014.

JESUS, A. M.; VIEIRA, R. K.; VIEIRA, A. K. Use of sludge from water treatment station to produce Geopolymer cement. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 6, p. 3367-3378, 2020.

JINDAL, Bharat Bhushan *et al.* Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-26, 2022.

JOYCE, P. James *et al.* Identifying hotspots of environmental impact in the development of novel inorganic polymer paving blocks from bauxite residue. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, p. 87-98, 2018.

KANKIA, Mubarak Usman *et al.* Effects of petroleum sludge ash in fly ash-based geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121939, 2021.

KAWATRA, S. Komar; RIPKE, S. Jayson. Pelletizing steel mill desulfurization slag. **International journal of mineral processing**, v. 65, n. 3-4, p. 165-175, 2002.

KHALE, Divya; CHAUDHARY, Rubina. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of materials science**, v. 42, p. 729-746, 2007.

KUMAR, Aman *et al.* A review on the utilization of red mud for the production of geopolymer and alkali activated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124170, 2021.

KUMAR, S.; KUMAR, R.; MEHROTRA, S. P. Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. **Journal of Materials Science**, v. 45, n. 3, p. 607-615, 2010.

LASVAUX, Sébastien *et al.* Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, p. 1473-1490, 2015.

LI, Liming *et al.* A state-of-the-art review on the setting behaviours of ground granulated blast furnace slag-and metakaolin-based alkali-activated materials. **Construction and Building Materials**, v. 368, p. 130389, 2023.

LI, Ning *et al.* A mixture proportioning method for the development of performance-based alkali-activated slag-based concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 93, p. 163-174, 2018.

LIU, Junxiang *et al.* Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 381-387, 2017.

LIU, Yiwei *et al.* An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 144, p. 297-309, 2019.

LIU, Yiwei *et al.* Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v. 112, p. 103665, 2020.

LIU, Zhengyu *et al.* The mechanism of hydration reaction of granulated blast furnace slag-steel slag-refining slag-desulfurization gypsum-based clinker-free cementitious materials. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103289, 2021.

LLOYD, R. R. Accelerated ageing of geopolymers. In: **Geopolymers**. Woodhead Publishing, p. 139-166, 2009.

LOLLI, Francesca *et al.* Atomistic simulations of geopolymer models: the impact of disorder on structure and mechanics. **ACS applied materials & interfaces**, v. 10, n. 26, p. 22809-22820, 2018.

LONGHI, Márlon Augusto *et al.* Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 265-272, 2016.

LUHAR, Ismail *et al.* A state-of-the-art review on innovative geopolymer composites designed for water and wastewater treatment. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7456, 2021.

LUNA GALIANO, Yolanda; FERNÁNDEZ PEREIRA, Constantino; IZQUIERDO, M. Contributions to the study of porosity in fly ash-based geopolymers. Relationship between degree of reaction, porosity and compressive strength. **Materiales de construcción**, v. 66, n. 324, p. e98, 2016.

LUUKKONEN, Tero *et al.* One-part alkali-activated materials: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 21-34, 2018.

MAÑOSA, Jofre *et al.* Water treatment sludge as precursor in non-dehydroxylated kaolin-based alkali-activated cements. **Applied Clay Science**, v. 204, p. 106032, 2021.

MASOULE, Mohammad Sadegh Tale *et al.* Lightweight geopolymer concrete: A critical review on the feasibility, mixture design, durability properties and microstructure. **Ceramics International**, v. 48, p. 10347, 2022.

MEHTA, Ankur *et al.* Fly ash and ground granulated blast furnace slag-based alkali-activated concrete: Mechanical, transport and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119548, 2020.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete**: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill Education, 2014.

MEJÍA, Johanna M.; GUTIÉRREZ, Ruby Mejía; MONTES, Carlos. Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 133-139, 2016.

MELLADO, Anna *et al.* Carbon footprint of geopolymeric mortar: study of the contribution of the alkaline activating solution and assessment of an alternative route. **RSC advances**, v. 4, n. 45, p. 23846-23852, 2014.

MENDES, Beatryz Cardoso *et al.* Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 35, p. 102010, 2021.

MESHRAM, R. B.; KUMAR, Sanjay. Comparative life cycle assessment (LCA) of geopolymer cement manufacturing with Portland cement in Indian context. International **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 6, p. 4791-4802, 2022.

MISHRA, Umesh Chandra; SARSAIYA, Surendra; GUPTA, Amita. A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 13, p. 18440-18451, 2022.

MOHAJERANI, Abbas *et al.* Recycling waste materials in geopolymer concrete. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, p. 493-515, 2019.

MORAES, João Cláudio Bassan *et al.* New use of sugar cane straw ash in alkali-activated materials: A silica source for the preparation of the alkaline activator. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 611-621, 2018.

MURALEEDHARAN, Manjusha; NADIR, Yashida. Factors affecting the mechanical properties and microstructure of geopolymers from red mud and granite waste powder: A review. **Ceramics International**, v. 47, n. 10, p. 13257-13279, 2021.

MURRAY, Haydn H. Kaolin applications. **Developments in clay science**, v. 2, p. 85-109, 2006.

NAIDU, Tamlyn Sasha; SHERIDAN, Craig Michael; VAN DYK, Lizelle Doreen. Basic oxygen furnace slag: Review of current and potential uses. **Minerals Engineering**, v. 149, p. 106234, 2020.

NANA, Achile *et al.* Mechanical properties and microstructure of a metakaolin-based inorganic polymer mortar reinforced with quartz sand. **Silicon**, p. 1-12, 2020.

NIE, Qingke *et al.* Strength properties of geopolymers derived from original and desulfurized red mud cured at ambient temperature. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 905-911, 2016.

NIKRAVAN, Morteza; FIRDOUS, Rafia; STEPHAN, Dietmar. Life cycle assessment of alkali-activated materials: a systematic literature review. **Low-carbon Materials and Green Construction**, v. 1, n. 1, p. 1-24, 2023.

NODEHI, Mehrab; TAGHVAEE, Vahid Mohamad. Alkali-activated materials and geopolymer: A review of common precursors and activators addressing circular economy. **Circular Economy and Sustainability**, v. 2, n. 1, p. 165-196, 2022.

NUNES, Vitor A.; BORGES, Paulo HR. Recent advances in the reuse of steel slags and future perspectives as binder and aggregate for alkali-activated materials. **Construction and building materials**, v. 281, p. 122605, 2021.

OU, Zhihua *et al.* Development of drying shrinkage model for alkali-activated slag concrete. **Construction and Building Materials**, v. 323, p. 126556, 2022.

ÖZBAY, Erdoğan; ERDEMİR, Mustafa; DURMUŞ, Halil İbrahim. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 423-434, 2016.

PANGDAENG, Saengsuree *et al.* Apatite formation on calcined kaolin–white Portland cement geopolymer. **Materials Science and Engineering**, v. 51, p. 1-6, 2015.

PASSUELLO, Ana *et al.* Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 680-689, 2017.

PEREIRA, Diegles Simoes *et al.* Comparative analysis between properties and microstructures of geopolymeric concrete and Portland concrete. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 4, p. 606-611, 2018.

PEYS, Arne *et al.* Mix-design parameters and real-life considerations in the pursuit of lower environmental impact inorganic polymers. **Waste and biomass valorization**, v. 9, p. 879-889, 2018.

PHAIR, J. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. **International Journal of Mineral Processing**, v. 66, n. 1-4, p. 121-143, 2002.

POUDYAL, Lochana; ADHIKARI, Kushal. Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 4, p. 100024, 2021.

PROMENTILLA, Michael Angelo B. *et al.* Optimizing ternary-blended geopolymers with multi-response surface analysis. **Waste and biomass valorization**, v. 7, p. 929-939, 2016.

PROVIS, J. L.; VAN DAVENTER, J.S.J. Geopolymers and other alkali-activated materials. In: HEWLETT, Peter; LISKA, Martin (Ed.). **Lea's Chemistry of cement and concrete**. 5. ed. Editora: Elsevier, 2019.

PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jannie SJ (Ed.). **Alkali activated materials: state-of-the-art report**, RILEM TC 224-AAM. Springer Science & Business Media, 2014.

RAKHIMOVA, Nailia R.; RAKHIMOV, Ravil Z. Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials—a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1522-1531, 2019.

RASHAD, Alaa M. A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. **Materials & Design**, v. 53, p. 1005-1025, 2014.

RASHIDIAN-DEZFOULI, H.; RANGARAJU, P. R. Comparison of strength and durability characteristics of a geopolymer produced from fly ash, ground glass fiber and glass powder. **Materiales de Construcción**, v. 67, n. 328, p. e136-e136, 2017.

RATHOD, Nikhil; CHIPPIGIRI, Ravijanya; RALEGAONKAR, Rahul V. Cleaner production of geopolymer materials: A critical review of waste-derived activators. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

REDDY, M. Srinivasula; DINAKAR, P.; RAO, B. Hanumantha. Mix design development of fly ash and ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 712-722, 2018.

REVATHI, Thirunavukarasu *et al.* Adoption of alkali-activated cement-based binders (geopolymers) from industrial by-products for sustainable construction of utility buildings-A field demonstration. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104450, 2022.

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

SILVA, Alisson Clay Rios *et al.* Fatigue behavior of steel fiber reinforced geopolymer concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00829, 2022.

ROCHA, Thais da Silta *et al.* Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na⁺ and K⁺). **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 453-461, 2018.

ROSSI, Laura *et al.* Future perspectives for alkali-activated materials: from existing standards to structural applications. **RILEM Technical Letters**, v. 7, p. 159-177, 2022.

RUAN, Shengqian *et al.* Waterproof geopolymer composites modified by hydrophobic particles and polydimethylsiloxane. **Composites Part B: Engineering**, v. 237, p. 109865, 2022.

SALAS, Daniel Adrés *et al.* Life cycle assessment of geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 170-177, 2018.

SALUDUNG, Apriany *et al.* Effect of silica fume on efflorescence formation and alkali leaching of alkali-activated slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 128210, 2021.

SANTOS, Carine Cardoso *et al.* Interlocking concrete paving blocks produced with foundry sand waste. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, p. 191-195, 2018.

SANTOS, Géssica Zila Batista *et al.* Sustainable geopolymer composite reinforced with sisal fiber: Durability to wetting and drying cycles. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102568, 2021.

SANTOS, Gessica Zila Batista *et al.* Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context. **Journal of environmental management**, v. 249, p. 109328, 2019.

SHI, Xiaoshuang *et al.* Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymer concrete. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7375, 2021.

SHILAR, Fatheali A. *et al.* Molarity activity effect on mechanical and microstructure properties of geopolymer concrete: A review. **Case Studies in Construction Materials**, p. e01014, 2022.

SILVA; Isabela N. S.; MAUÉS, Luiz M. F. Inventory of sand and pebble production for use in hot mix asphalt: A case study in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126271, 2021.

SONG, Weilong *et al.* Efficient use of steel slag in alkali-activated fly ash-steel slag-ground granulated blast furnace slag ternary blends. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 119814, 2020.

SOOMRO, Mahfooz; TAM, Vivian WY; EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. Production of cement and its environmental impact. In: **Recycled Concrete**. Woodhead Publishing, 2023. p. 11-46.

TÄNZER, Ricarda; JIN, Yu; STEPHAN, Dietmar. Alkali activated slag binder: effect of cations from silicate activators. **Materials and Structures**, v. 50, p. 1-9, 2017.

TCHAKOUTÉ, Hervé K. *et al.* Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 276-289, 2016.

TCHAKOUTÉ, Hervé K. *et al.* Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 276-289, 2016.

TEH, Soo Huey *et al.* Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia. **Journal of Cleaner Production**, v. 152, p. 312-320, 2017.

THONEMANN, Nils; SCHULTE, Anna; MAGA, Daniel. How to conduct prospective life cycle assessment for emerging technologies? A systematic review and methodological guidance. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1192, 2020.

TONETTI, Adriano Luiz *et al.* Environmentally friendly interlocking concrete paver blocks produced with treated wastewater. **Water Supply**, v. 19, n. 7, p. 2028-2035, 2019.

TONG, Zhibo *et al.* Characterization and valorization of Kanbara reactor desulfurization waste slag of hot metal pretreatment. **Waste and biomass valorization**, v. 7, p. 1-8, 2016.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: Alkali activated cements or geopolymers. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 32, p. 5-12, 2017a.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 342-354, 2017b.

VAN DEVENTER, Jannie Stephanus Jakob *et al.* Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, p. 145-155, 2010.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO, Mónica A. Studying different silica sources for preparation of alternative waterglass used in preparation of binary geopolymer binders from metakaolin/boiler slag. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116621, 2019.

WAN, H.; YUAN, L.; ZHANG, Y. Insight Into the Leaching of Sodium Alumino-Silicate Hydrate (N-A-S-H) Gel: A Molecular Dynamics Study. **Frontiers in Materials**, v. 7, p. 1–11, 2020.

WAN, Qian *et al.* Geopolymerization reaction, microstructure and simulation of metakaolin-based geopolymers at extended Si/Al ratios. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 45-52, 2017.

WANG, Aiguo *et al.* The durability of alkali-activated materials in comparison with ordinary Portland cements and concretes: a review. **Engineering**, v. 6, n. 6, p. 695-706, 2020.

WANG, Yan-Shuai; ALREFAEI, Yazan; DAI, Jian-Guo. Silico-aluminophosphate and alkali-aluminosilicate geopolymers: A comparative review. **Frontiers in Materials**, v. 6, p. 106, 2019.

WARDHONO, Arie *et al.* Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 272-279, 2017.

WEIL, M.; DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A. Life-cycle analysis of geopolymers. In: **Geopolymers**. Woodhead Publishing, p. 194-210, 2009.

WU, Yanguang *et al.* Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 930-949, 2019.

XIE, Jianhe *et al.* Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. **Composites Part B: Engineering**, v. 164, p. 179-190, 2019.

XIE, Tianyu *et al.* Mix design and mechanical properties of geopolymer and alkali activated concrete: Review of the state-of-the-art and the development of a new unified approach. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119380, 2020.

YANG, Keun-Hyeok *et al.* Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 410-419, 2012.

YOMTHONG, Krissanapat *et al.* Effect of NaOH concentration and curing regimes on compressive strength of fly ash-based geopolymer. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 2647-2654, 2021.

ZHANG, Peng *et al.* Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders-A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120896, 2020.

ZHANG, Zuhua *et al.* Geopolymer from kaolin in China: An overview. **Applied Clay Science**, v. 119, p. 31-41, 2016.

ZHUANG, Xiao Yu *et al.* Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. **Journal of cleaner production**, v. 125, p. 253-267, 2016.

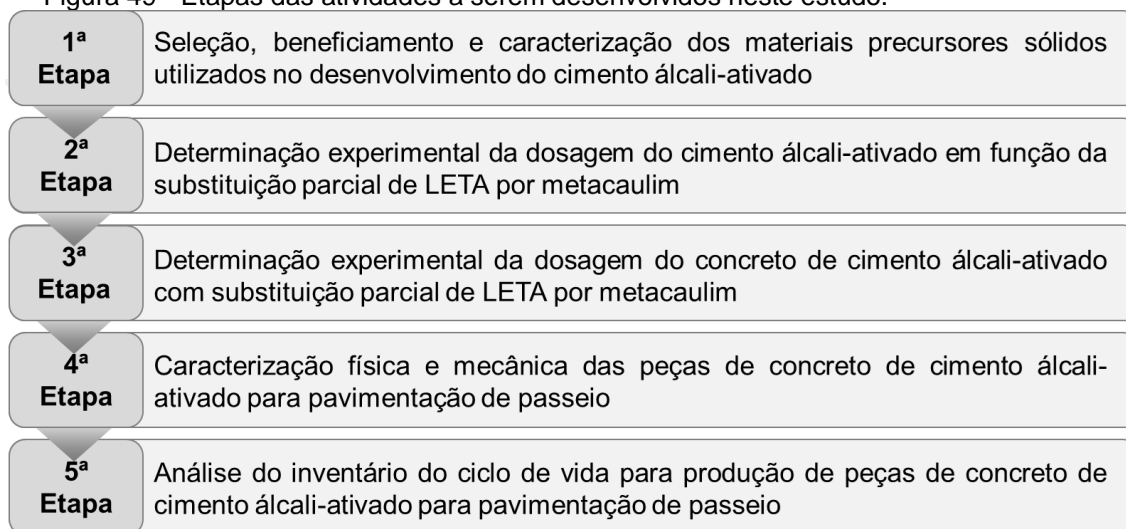
ZUHUA, Zhang *et al.* Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. **Applied clay science**, v. 43, n. 2, p. 218-223, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A: PROGRAMA DOS ENSAIOS CARACTERIZAÇÃO

A seguir são descritos métodos, procedimentos e equipamentos que foram utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Com perspectiva de atingir os objetivos propostos, o seguinte estudo é organizado em cinco etapas, conforme ilustra o fluxograma da Figura 49.

Figura 49 - Etapas das atividades a serem desenvolvidos neste estudo.



Fonte: Autor, 2023.

A primeira etapa do estudo consistiu em avaliar se os materiais selecionados, tanto o lodo de Estação de Tratamento de Água quanto o metacaulim, possuem potencial para desenvolvimento de cimentos álcali-ativados. Isso se deu principalmente em função da análise da composição química, comportamento térmico e da difratometria de Raios X.

Na segunda etapa foi realizada a dosagem experimental do cimento álcali-ativado por meio de uma análise estatística em função da caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos. Para tanto, a dosagem utiliza ativador alcalino comercial e foi baseada em dois fatores: concentração molar do ativador alcalino e substituição parcial do lodo calcinado de Estação de Tratamento de Água por metacaulim, cuja variável resposta foi a resistência à compressão. Posteriormente, utilizou-se a dosagem que apresentou melhor resistência à compressão para desenvolver um cimento álcali-ativado com ativador alcalino alternativo.

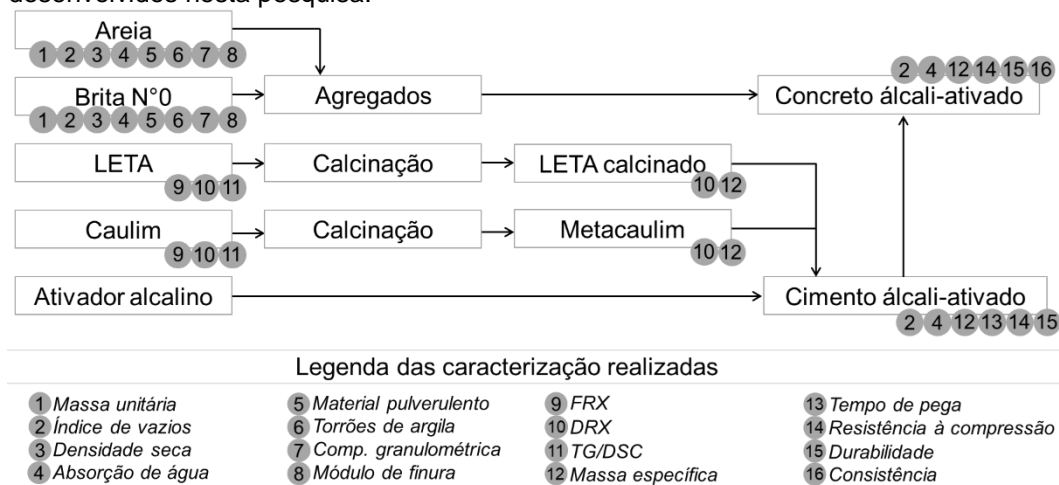
A terceira etapa ocorreu a determinação experimental da dosagem do concreto com o intuito de determinar a proporção de agregados na composição do concreto de

CAA. Com esse propósito, foram avaliadas a adição de agregados em função da massa de lodo calcinado de Estação de Tratamento de Água e metacaulim que compõem a dosagem do cimento álcali-ativado. Inicialmente, foi utilizado cimento álcali-ativado obtido a partir do ativador alcalino comercial e, posteriormente, foi utilizado o cimento álcali-ativado obtido a partir do ativador alcalino alternativo.

Na quarta etapa foi feita a caracterização física e mecânica das peças de concreto de cimento álcali-ativado para pavimentação de passeio, conforme orienta a norma NBR 9781 (ABNT, 2013). Já na última etapa, foi feita a análise do inventário do ciclo de vida, tal que foi definido o objetivo e escopo do estudo e em seguida a avaliação do impacto em termos de emissão de $\text{CO}_2\text{-eq}$ para produção das peças de concreto.

Foram realizadas uma série de ensaios para caracterizar tanto os materiais quanto dos produtos desenvolvidos experimentalmente neste estudo, como os cimentos álcali-ativado e os concretos de cimento álcali-ativado, conforme ilustra o fluxograma da Figura 50.

Figura 50 - Ensaios de caracterização dos materiais, cimentos álcali-ativados e concretos desenvolvidos nesta pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que os ensaios de caracterizações foram realizados em dois momentos: dos materiais sólidos utilizados como precursores e dos cimentos álcali-ativados e das argamassas. A caracterização do LETA e do caulim foram realizadas antes e depois da calcinação, enquanto as caracterizações dos cimentos álcali-ativados e dos concretos foram realizadas nos estados fresco e endurecido. Para tanto, nas subseções a seguir são descritos os ensaios de caracterização.

Os ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, bem como dos cimentos álcali-ativados e das peças de concreto de cimento álcali-ativado, foram realizados no Laboratório de Laboratório de Resistência e Caracterização de Materiais do Instituto Federal de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama. Entretanto, os ensaios de caracterização tecnológica do LETA e do caulim foram realizados em laboratórios específicos, conforme descreve-se a seguir.

Massa unitária

As massas unitárias dos agregados foram determinadas conforme os critérios estabelecidos na norma NBR 16972 (ABNT, 2021). Para tanto, os ensaios desenvolvidos com o material no estado solto de acordo com o método C da norma, tal calculou-se a massa unitária do agregado (ρ_{ap}) pela Equação 1.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (1)$$

Sendo que m_{ar} é a massa do recipiente com o agregado expresso em gramas, m_r é a massa do recipiente vazio expresso em gramas, e V é o volume do recipiente expresso em cm^3 .

Índice de vazios

Os índices de vazios dos agregados foram determinados conforme os critérios estabelecidos na norma NBR 16972 (ABNT, 2021). Para isso, índice de vazios nos agregados (E_V) foi calculado em função da densidade do agregado seco (d_1), a densidade da água (ρ_w) e da densidade média do agregado (ρ_{ap}) pela Equação 2.

$$E_V = \frac{100[(d_1 \cdot \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 \cdot \rho_w} \quad (2)$$

Ressalta-se que a densidade da água foi definida em função da temperatura ambiente e da altitude local e a densidade média do agregado foi calculada conforme os procedimentos estabelecidos nas normas NBR 16916 (ABNT, 2021) para agregado miúdo e NBR 16916 (ABNT, 2021) para agregado graúdo.

Já determinação dos índices de vazios dos cimentos álcali-ativados, bem como dos concretos, foi realizada conforme orienta a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). A

norma prescreve os procedimentos para determinação do índice de vazios por imersão e fervura de amostras endurecidas com 28 dias de idade. Tendo em vista a limitação da quantidade de material disponível, utilizou-se corpos de provas reduzidos, tal que para os cimentos álcali-ativados foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 25 mm de diâmetro e 50 mm de altura, enquanto para os concretos utilizou-se corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Densidade na condição seca

A determinação das densidades seca dos agregados miúdo e graúdo foi realizada de acordo com os procedimentos descritos nas normas NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 16917 (ABNT, 2021), respectivamente. Para tanto, considerou-se o conceito definido nas normas sobre densidade seca do agregado como sendo o “quociente entre a massa do agregado na condição seca e o volume de seus grãos, incluindo o volume dos poros permeáveis e impermeáveis, e excluindo os vazios entre os grãos”.

Neste sentido, as amostras foram submersas em água durante 24 horas e em seguida seco com corrente de ar suave até a umidade de saturação determinada experimentalmente. Posteriormente, a amostra é depositada no molde tronco-cônico padrão para avaliação se o agregado conserva a forma do molde. Uma vez definido isso, procede-se o cálculo da densidade seca do agregado na condição seca (ρ_s) por meio da Equação 3.

$$\rho_s = \frac{m_A}{V - V_a} \quad (3)$$

Sendo que m_A é a massa da amostra retirada do tronco-cônico seca em estufa a 105 ± 5 °C, V é o volume do frasco calibrado e V_a é o volume de água adicionada ao frasco calibrado durante o procedimento definido por norma.

Absorção de água

A absorção de água dos agregados miúdo e graúdo foi determinada de acordo com os procedimentos descritos nas normas NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 16917 (ABNT, 2021), respectivamente. Para tanto, calcula-se a absorção de água do

agregado (Abs) em função da massa da amostra seca em estufa a 105 ± 5 °C (m_A) e da massa da amostra na condição saturada superfície seca (m_B) pela Equação 4.

$$Abs = \frac{m_B - m_A}{m_A} \cdot 100\% \quad (4)$$

A determinação da absorção de água dos cimentos álcali-ativados foi realizada conforme orienta a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). A norma estabelece os procedimentos para determinação da absorção de água por imersão de amostras endurecidas aos 28 dias cura. Para tanto, utilizou-se corpos de prova cilíndricos com 50 mm de altura por 25 mm de diâmetro. A absorção de água (A) foi calculada em função da massa seca (m_s) em estufa e da massa saturada (m_{sat}) por ebulição da água, conforme Equação 5.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (5)$$

Além disso, foram realizados o ensaio de absorção das peças inteiras de concreto aos 28 dias de cura, conforme prescreve a norma NBR 9781 (ABNT, 2013). Para isso, a peça foi primeiramente imersa em água por 24 horas e determinada sua massa saturada (m_2). Em seguida, a peça foi seca em estufa com temperatura de 110 ± 5 °C por 24 horas e determinou-se sua massa seca (m_1). A partir desses dados, calculou-se a absorção de água das peças em porcentagem, conforme Equação 6.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (6)$$

Os ensaios de absorção de água foram realizados em triplicatas, ou seja, foram feitos três ensaios de absorção de água para cada dosagem estabelecida neste estudo.

Material pulverulento

A quantidade de material pulverulento presente nos agregados foi determinada a partir do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem, conforme orienta a norma NBR 16973 (ABNT, 2021). Para isso, calculou-se a quantidade de material que passa pela peneira com abertura de malha de 75 µm, por lavagem, pela Equação 7.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100\% \quad (7)$$

Sendo que m é a quantidade de material pulverulento, m_i é a massa inicial da amostra seca e m_f é a massa da amostra seca após a lavagem.

Torrões de argila

A determinação da quantidade de torrões de argila, bem como de materiais friáveis, presente no agregado miúdo foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na norma NBR 7218 (ABNT, 2010). Para isso, foi considerado inicialmente as amostras de cada intervalo granulométrico conforme definido em norma e dado na Tabela 27.

Tabela 27 - Peneiras para a remoção das partículas de argila e materiais friáveis.

Intervalos granulométricos ensaiados (mm)	Abertura das peneiras
$\geq 1,18$ e $< 4,75$	600 μm
$\geq 4,75$ e $< 9,5$	2,36 mm
$\geq 9,5$ e $< 19,0$	4,75 mm
≥ 19 e $< 37,5$	4,75 mm
$\geq 37,5$	4,75 mm

Fonte: ABNT, 2010.

Após remover a amostra das peneiras correspondentes, determinar a massa após peneiramento via úmida (m_i), secá-la em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C e determinar a massa do material retido (m_f), calculou-se o teor de argila em torrões e materiais friáveis (m_t) de cada intervalo granulométrico em porcentagem por meio da Equação 8.

$$m_t = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100\% \quad (8)$$

Por fim, calculou-se o teor de argila em torrões e materiais friáveis presentes na amostra total, pelo somatório dos teores parciais encontrados.

Composição granulométrica

A determinação da composição granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 17054 (ABNT, 2022). Para isso, realizou-se amostragem representativa de um lote de agregado miúdo e gráudo para

ensaio de acordo com a NBR 16915 (ABNT, 2021), tal que foram usados 450 g de agregado miúdo e 1000 g de agregado graúdo durante o ensaio.

Os resultados foram tabulados em planilha e elaborou-se os gráficos com as curvas granulométricas dos agregados em gráfico semilogarítmico, com eixo das abscissas representado pelas aberturas das peneiras e o eixo das ordenadas representando as massas percentual retida acumulada. Além disso, para efeito de comparação e análise, plotou-se nas curvas granulométricas dos agregados os limites da composição granulométrica definidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022). Análise dos resultados e plotagem dos gráficos foram realizados no programa Microsoft Office Excel.

Módulo de finura

A determinação do módulo de finura dos agregados miúdo e graúdo foi determinado conforme a definição da NBR 7211 (ABNT, 2022) “soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100”. Para tanto, utilizou-se a Equação 9.

$$MF = \frac{\sum m_{Retida\ acumulada\ (\%)}}{100} \quad (9)$$

Sendo que $m_{Retida\ acumulada\ (\%)}$ corresponde à porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, e MF , ao módulo de finura do agregado. Os valores obtidos foram comparados com os limites da distribuição granulométrica dos agregados com o objetivo de definir em que zona se enquadra cada agregado.

Fluorescência de Raios X – FRX

A composição química em quantidades de óxidos foi determinada por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) por energia dispersiva em um espectrômetro da marca PANalytical e modelo EPSILON 3^x, que pertence ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LAMAC, da Universidade Federal do Amazonas no *Campus* de Manaus.

Difração de Raios X – DRX

A amostra preparada por quarteamento e em seguida preparou-se a pastilha por compressão simples da amostra em pó. Foi realizado para caracterização mineralógica, identificação dos argilominerais e verificação da efetividade da calcinação. As medidas foram realizadas em temperatura ambiente, em um difratômetro de Raios X PANalytical modelo X modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), com goniômetro PW3050/60 (θ/θ), tubos de Raios X cerâmico e anodos de Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$), que pertence ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará no Campus de Marabá. Para tanto o equipamento operou com potência de 40kV, corrente de 40mA e 2θ variando entre 5 e 65°.

Os resultados das análises foram tratados no programa X'Pert HighScore Plus da Panalytical, que identificou os picos e auxiliou na identificação das principais fases minerais presentes nos materiais por meio de comparação com as fichas PDF disponíveis em bancos de dados. No programa Origin da OriginLab Corporation foram elaboradas as figuras do difratogramas.

Análises térmicas – TG/DTA

Foram realizadas a Análise Termogravimétrica (TG) e a Análise Térmica Diferencial (DTA) em um equipamento marca TA Instruments, modelo SDT Q600, do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LAMAC, da Universidade Federal do Amazonas no Campus de Manaus. Para tanto, foi adotado o seguinte procedimento: uma amostra de aproximadamente 10 miligramas de material, obtida por quarteamento, foi depositada em um cadinho de alumina sem tampa com capacidade de 90 microlitros, o qual foi aquecido a uma taxa de 10 °C por minuto até a temperatura final de 1100 °C, com fluxo de gás purga N 5.0 de 30 mililitros por minuto.

Os resultados das análises foram tratados no programa Universal Analysis da TA Instrument, que auxiliou na identificação dos principais eventos de transformação térmica. No programa Origin da OriginLab Corporation foram elaboradas as figuras das curvas de TG/DTA.

Massa específica

As massas específicas dos LETA calcinado e do metacaulim foram determinadas de acordo com os procedimentos descritos na norma a NBR 16605

(ABNT, 2017). Para isso, utilizou-se o frasco volumétrico de Le Chatelier e água destilada, visto que se trata de um líquido não reativo quimicamente com os materiais, e calculou-se a massa específica do material (ρ) em função da massa ensaiada (m) e do volume deslocado (V) pela Equação 10.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (10)$$

As massas específicas reais tanto do cimento álcali-ativado quanto dos concretos foram realizadas no estado endurecido conforme prescreve a NBR 9778 (ABNT, 2005). Para os cimentos utilizou-se corpos de prova cilíndricos com 50 mm de altura por 25 mm de diâmetro, enquanto para os concretos utilizou-se corpos de prova cilíndricos com 100 mm de altura por 50 mm de diâmetro, moldados conforme orienta a norma NBR 5731 (ABNT, 2015).

Após os 28 dias de cura em condições de laboratório, o ensaio procedeu-se em estabelecer a massa da amostra seca em estufa (m_s), a massa da amostra saturada imersa em água após fervura (m_i) e seguida calculou-se a massa específica real, conforme Equação 11.

$$p_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (11)$$

As amostras foram secas em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por um período de 72 h e, em seguida, foram submetidas a saturação durante 72 h para então ser levada à ebulição por 5 horas, conforme define a NBR 9778 (ABNT, 2005).

Tempo de pega

A determinação do tempo de início e fim de pega do cimento álcali-ativado foi de terminada baseando-se na norma NBR 16607 (ABNT, 2018), no qual foi utilizado o aparelho de Vicat. Para isso, determinou-se os tempos de início de pega e fim de pega a cada intervalo de cinco, sendo considerado as penetrações da agulha de 6 ± 2 mm para início de pega e de 0,5 mm para fim de pega.

Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova de cimento álcali-ativa foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na norma NBR 7215 (ABNT, 2019), no qual foram utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro

de 25 mm e altura de 50 mm aos 28 dias de cura. Para romper os corpos de prova foi utilizado uma prensa hidráulica manual da Contenco, que possui indicador digital, capacidade de 20 toneladas e sensibilidade de 1 kgf, conforme mostra a Figura 51.

Figura 51 - Máquina universal de ensaios utilizada para romper as peças de concreto de cimento álcali-ativado desenvolvidas neste estudo.



Fonte: Autor, 2023.

Já a resistência à compressão dos corpos de prova de prismáticos das peças de concreto de cimento álcali-ativa foi determinada de acordo com os procedimentos prescritos na NBR 9781 (ABNT, 2013). Dessa maneira, as peças foram saturadas em água por 24 horas, em seguida tiveram as superfícies de carregamento retificadas, para em seguida serem submetidas aos ensaios de compressão aos 28 dias de cura. Para tanto, foi utilizada uma máquina universal de ensaios modelo DL30000 da EMIC Brasil (Figura 52), que possui capacidade nominal de 300 kN e sensibilidade de 5 kgf. Essa máquina foi programada para operar com velocidade de carregamento equivalente 0,30 MPa/s e registrar a carga de ruptura.

Figura 52 - Máquina universal de ensaios utilizada para romper as peças de concreto de cimento álcali-ativado desenvolvidas neste estudo.



Fonte: Autor, 2023.

A resistência à compressão dos corpos de provas, tanto de cimento álcali-ativado quanto das peças de concreto, foi realizada em triplicatas, ou seja, para cada dosagem estabelecida no planejamento experimental foram ensaiadas três amostras.

Consistência

A determinação da consistência dos concretos foi realizada pelo método do abatimento do tronco de cone, conforme prescreve a norma NBR 16889 (ABNT, 2020). O ensaio consistiu, em resumo, em medir o abatimento do concreto fresco após moldado e adensado de forma padronizada, no qual foi determinado a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova após a retirada molde padrão.

Durabilidade

A avaliação da durabilidade, tanto dos cimentos álcali-ativados quanto das peças de concreto de cimento álcali-ativado, foi feita por meio do processo de envelhecimento acelerado com uso de ciclos de saturação e secagem, conforme modelo adaptado de Lloyd (2009), Horpibulsuk *et al.*, (2016) e Santos *et al.* (2021). Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Resistência e Caracterização de Materiais do IFRO, Campus Porto Velho Calama.

Após os 28 dias de cura, as amostras foram mantidas a ciclos de intemperismo simulados, envolvendo ciclos de saturação e secagem, com o propósito de avaliar a resistência do material às condições ambientais adversas ao longo do tempo. Para isso, cada ciclo consistiu em manter as amostras submersas em água a 20 ± 3 °C por 24 horas e depois a secagem em estufa a 65 ± 5 °C por 24 horas, conforme mostra a Figura 53. Antes de iniciar um novo ciclo esperou-se que a amostra retirada da estufa entrasse em equilíbrio térmico com meio ambiente (23 ± 5 °C), para evitar o choque térmico.

Figura 53 - Ciclo de saturação e secagem utilizado para avaliação da durabilidade dos materiais desenvolvidos neste estudo.



Fonte: Autor, 2023.

Tanto as amostras de cimentos de álcali-ativados, quanto as de concreto, foram submetidas a 10, 20 e 30 ciclos. Como critério de análise adotou-se a resistência à compressão, tal que se comparou os resultados obtidos ao final dos ciclos definidos com os valores de resistência à compressão das amostras aos 28 dias de cura. Para cada conjunto de ciclo foram utilizados três corpos de prova.

APÊNDICE B: RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DA SEÇÃO 4

A seguir, encontram-se as tabelas contendo os resumos e resultados dos testes estatísticos realizados para fundamentar a discussão sobre a resistência à compressão dos cimentos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino convencional (CC) e alternativo (CA).

Tabela 28 - Resumo dos dados de resistência à compressão dos CAAs produzidos a partir do ativador alcalino convencional.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CCM8	3	67,2	22,40	0,53
CCM10	3	82,66	27,55	1,23
CCM12	3	90,16	30,05	0,02

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 29 - Resultado da ANOVA dos CAAs produzidos a partir do ativador alcalino convencional.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	91,38	2	45,69	77,10	$5,25 \cdot 10^{-5}$	5,14
Dentro dos grupos	3,55	6	0,59			
Total	94,93	8				

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 30 - Resumo dos dados de resistência à compressão dos CAAs produzidos a partir do ativador alcalino alternativo.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CAM8	3	67,89	22,63	3,26
CAM10	3	83,53	27,84	2,87
CAM12	3	89,73	29,91	1,35

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 31 - Resultado da ANOVA dos CAAs produzidos a partir do ativador alcalino alternativo.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	84,45	2	42,22	16,95	$3,40 \cdot 10^{-3}$	5,14
Dentro dos grupos	14,95	6	2,49			
Total	99,40	8				

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 32 - Resultado do teste F unicaudal para resistência à compressão dos CAAs produzidos com ativadores alcalinos diferentes a 8 molar de NaOH.

	CC	CA
Média	22,4	22,63
Variância	0,5332	3,2599
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		0,1636
P(F<=f) unicaudal		0,1406
F crítico unicaudal		0,0526

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 33 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos CAAs produzidos com ativadores alcalinos diferentes a 10 molar de NaOH.

	CC	CA
Média	27,55	27,84
Variância	1,23	2,87
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		0,4276
P(F<=f) unicaudal		0,2995
F crítico unicaudal		0,0526

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 34 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos CAAs produzidos com ativadores alcalinos diferentes a 12 molar de NaOH.

	CC	CA
Média	27,55	27,84
Variância	1,23	2,87
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		0,4276
P(F<=f) unicaudal		0,2995
F crítico unicaudal		0,0526

Fonte: Autor, 2023.

APÊNDICE C: RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DA SEÇÃO 5

A seguir, encontram-se as tabelas contendo os resumos e resultados dos testes estatísticos realizados para fundamentar a discussão sobre a resistência à compressão das peças de concreto álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino convencional (MCC) e alternativo (MCA).

Tabela 35 - Resumo dos dados de resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino convencional em função da proporção entre agregados.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
MC1C	3	130,7	43,57	9,4358
MC2C	3	170,47	56,82	13,4640
MC3C	3	136,63	45,54	6,9202

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 36 - Resultado da ANOVA da resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino convencional em função da proporção entre agregados.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	306,88	2	153,44	15,44	0,004308	5,14
Dentro dos grupos	59,64	6	9,94			
Total	366,52	8				

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 37 - Resumo dos dados de resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino alternativo em função da proporção entre agregados.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
MC1A	3	133,54	44,51	8,1930
MC2A	3	183,92	61,31	14,9792
MC3A	3	141,31	47,10	4,8190

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 38 - Resultado da ANOVA da resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino alternativo em função da proporção entre agregados.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	490,46	2	245,23	26,28	0,001075	5,14
Dentro dos grupos	55,98	6	9,33			
Total	546,44	8				

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 39 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino alternativo MC1C e MC2C.

	MC1C	MC2C
Média	45,67	56,82
Variância	9,43	13,46
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		0,7008
P(F<=f) unicaldal		0,4120
F crítico unicaldal		0,0526

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 40 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino alternativo MC1C e MC3C.

	MC1C	MC3C
Média	45,67	45,54
Variância	9,43	6,92
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		1,3635
P(F<=f) unicaldal		0,4231
F crítico unicaldal		19,000

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 41 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino alternativo MC2C e MC3C.

	MC2C	MC3C
Média	56,82	45,54
Variância	13,46	6,92
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		1,9456
P(F<=f) unicaldal		0,3395
F crítico unicaldal		19,000

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 42 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino alternativo MC1A e MC2A.

	MC1A	MC2A
Média	44,51	61,31
Variância	8,19	14,98
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		0,5470
P(F<=f) unicaldal		0,3536
F crítico unicaldal		0,0526

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 43 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino alternativo MC1A e MC3A.

	MC1A	MC3A
Média	44,51	47,10
Variância	8,19	4,82
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		1,7001
P(F<=f) unicaudal		0,3704
F crítico unicaudal		19,000

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 44 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados obtidos a partir de ativador alcalino alternativo MC2A e MC3A.

	MC2A	MC3A
Média	61,31	47,10
Variância	14,98	4,82
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		3,1083
P(F<=f) unicaudal		0,2434
F crítico unicaudal		19,000

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 45 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados MC1C e MC1A.

	MC1C	MC1A
Média	43,57	44,51
Variância	9,44	8,19
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		1,1517
P(F<=f) unicaudal		0,4647
F crítico unicaudal		19,000

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 46 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados MC2C e MC2A.

	MC2C	MC2A
Média	56,82	61,31
Variância	13,46	14,98
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		0,8988
P(F<=f) unicaudal		0,4734
F crítico unicaudal		0,0526

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 47 - Resultado do teste F unicaldal para resistência à compressão dos concretos álcali-ativados MC3C e MC3A.

	MC3C	MC3A
Média	45,54	47,10
Variância	6,92	4,82
Observações	3	3
Grau de liberdade	2	2
F calculado		1,4360
P(F<=f) unicaudal		0,4105
F crítico unicaudal		19,000

Fonte: Autor, 2023.

APÊNDICE D: MEMÓRIA DE CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO

A seguir, encontram-se as tabelas contendo as memórias de cálculo da emissão de CO₂-eq dos diversos materiais e processos envolvidos para produção das peças de concreto álcali-ativado em função do ativador alcalino convencional e alternativo, bem como dos materiais e processos envolvidos para produção das peças de concreto de cimento Portland.

Tabela 48 - Composição em massa da dosagem de concreto álcali-ativado MC2C, que foi obtido a partir de ativador alcalino convencional.

Materiais	1Peça	5300 Peças
LETA calcinado (g)	390	2.067,0
Metacaulim (g)	260	1.378,0
Silicato de sódio (g)	598	3.169,40
Hidróxido de sódio (g)	56,16	297,65
Água (g)	140,4	744,12
Areia (g)	1170	6.201,00
Brita (g)	780	4.134,00

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 49 - Composição em massa da dosagem de concreto álcali-ativado MC2A, que foi obtido a partir de ativador alcalino alternativo.

Materiais	1Peça	5300 Peças
LETA calcinado (g)	390	2.067,00
Metacaulim (g)	260	1.378,00
Sílica ativa (g)	131,95	699,34
Hidróxido de sódio (g)	141,05	747,57
Água (g)	352,95	1.870,64
Areia (g)	1170	6.201,00
Brita (g)	780	4.134,00

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 50 - Composição em massa da dosagem de concreto convencional obtido a partir de cimento Portland.

Materiais	1 Peça	5300 Peças
Cimento Portland CP IV (g)	650	3.445,00
Água (g)	325	1.722,50
Areia (g)	1170	6.201,00
Brita (g)	780	4.134,00

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 51 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e transporte de LETA calcinado.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão de transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário (kg de CO ₂ -eq/t.km)		0,142
Fator de emissão para produção e distribuição de energia elétrica (kg de CO ₂ -eq/kWh)		0,0065
Transporte do resíduo		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de LETA in natura coletado, considerando que a perda de massa na calcinação é de 50% (kg)	0,7800	4.134,00
Distância de transporte do local de coleta na ETA/CAERD até o local de processamento no IFRO (km)		9,10
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0010	5,34
Secagem do resíduo em estufa		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Secagem do LETA em estufa com capacidade de 100 kg por lote a 105 °C, sendo que cada lote por 24 horas na estufa (h)	0,1872	992,1600
Consumo de energia elétrica, considerando a potência da estufa de 1200 W (kWh)	0,2246	1190,5920
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0015	7,7388
Calcinação do LETA		
Atividades desenvolvidas	1 Peça	5300 Peças
Tempo de funcionamento da mufla com capacidade de 500 g (h)	4,0000	
Consumo de energia elétrica, considerando a potência da mufla de 1800 W (kWh)	11,2320	59.529,60
Emissão CO ₂ -eq (kg)	0,0730	389,9424
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0755	400,0232

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 52 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e transporte de metacaulim.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão de transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário (kg de CO ₂ -eq/t.km)		0,142
Fator de emissão para produção de 1 kg de caulim (kg de CO ₂ -eq/kWh)		0,087
Fator de emissão para produção e distribuição de energia elétrica (kg de CO ₂ -eq/kWh)		0,0065
Produção de caulim no Pará		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de caulim in natura coletado, considerando que a perda de massa na calcinação é de 14% (kg)	0,3023	1.602,33
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0263	139,00
Transporte do caulim		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Distância de transporte do Pará até o IFRO (km)		2.491,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,1096	566,78
Calcinação do caulim		
Atividades desenvolvidas	1 Peça	5300 Peças
Tempo de funcionamento da mufla com capacidade de 500 g (h)		4,0000
Consumo de energia elétrica, considerando a potência da mufla de 1800 W (kWh)	4,3534	23.073,49
Emissão CO ₂ -eq (kg)	0,02830	149,9777
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,16154	856,1587

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 53 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e transporte de hidróxido de sódio.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão de transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário (kg de CO ₂ -eq/t.km)		0,142
Fator de emissão para produção de 1 kg de NaOH (kg de CO ₂ -eq/kg)		2,410
Produção de NaOH na fábrica Kalim em Junqueirópolis/SP		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de NaOH utilizada (kg)	0,0562	297,65
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,1353	717,00
Transporte do NaOH		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Distância de transporte da fábrica em Junqueirópolis/SP até o IFRO (km)		2.541,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0203	107,40
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,15561	824,72963

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 54 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e transporte de silicato de sódio.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão de transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário (kg de CO ₂ -eq/t.km)		0,142
Fator de emissão para produção de 1 kg de Na ₂ SiO ₃ (kg de CO ₂ -eq/kg)		1,35
Produção de Na₂SiO₃ na fábrica Kalim em Junqueirópolis/SP		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de Na ₂ SiO ₃ utilizada (kg)	0,598	3.169,40
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,8073	4.279,00
Transporte do Na₂SiO₃		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Distância de transporte da fábrica em Junqueirópolis/SP até o IFRO (km)		2.541,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,2158	1.143,59
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	1,02307	5.422,2793

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 55 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e transporte de areia.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão de transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário (kg de CO ₂ -eq/t.km)		0,142
Fator de emissão para produção de 1 tonelada de areia (kg de CO ₂ -eq/t)		11,50
Produção de areia na jazida localizada em Candeias do Jamari/RO		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de areia utilizada (kg)	1,17	6.201,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0135	71,31
Transporte da areia		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Distância de transporte jazida localizada em Candeias do Jamari/RO até o IFRO (km)		27,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0045	23,77
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,01794	95,08613

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 56 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e transporte de brita.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão de transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário (kg de CO ₂ -eq/t.km)		0,142
Fator de emissão para produção de 1 tonelada de brita (kg de CO ₂ -eq/t)		18,50
Produção de brita na jazida localizada em Candeias do Jamari/RO		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de brita utilizada (kg)	0,780	4.134,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0144	76,48
Transporte da brita		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Distância de transporte jazida localizada em Candeias do Jamari/RO até o IFRO (km)		52,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0058	30,53
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,02019	107,00446

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 57 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e transporte de sílica ativa.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão de transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário (kg de CO ₂ -eq/t.km)		0,142
Transporte da sílica ativa		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de sílica ativa utilizada (kg)	0,132	699,34
Distância de transporte fábrica Tecnosil localizada em XXX/SP até o IFRO (km)		2.922,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0547	290,17
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,02019	107,00446

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 58 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e distribuição de água.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão para produção e distribuição de água (kg de CO ₂ -eq/ m ³)		0,034
Produção e distribuição		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de água utilizada (kg)	0,1404	744,12
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0000	0,0300
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0000	0,0300

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 59 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção e transporte de cimento CP IV.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão de transporte de 1 tonelada mercadoria no modal rodoviário (kg de CO ₂ -eq/t.km)		0,142
Fator de emissão para produção de cimento Portland CP IV (kg de CO ₂ -eq/t)		0,865
Produção de Cimento Votorantim em Nobres/MT		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Quantidade de cimento utilizada (kg)	0,650	3.445,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,5623	2.979,93
Transporte do cimento		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Distância de transporte da fábrica Cimento Votorantim em Nobres/MT até o IFRO (km)		1.322,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,1220	646,71
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,68427	3.626,63418

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 60 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção do ativador alcalino alternativo.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão para produção e distribuição de energia elétrica (kg de CO ₂ -eq/kWh)		0,0065
Produção do ativador alcalino		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Tempo de funcionamento do agitador magnético (h)	0,25	1.325,00
Consumo de energia elétrica considerando a potência do agitador magnético de 200 W (kWh)	0,050	265,00
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0003	1,7225
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0003	1,7225

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 61 - Memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção das peças de concreto.

Fatores de emissão de CO₂-eq		
Fator de emissão para produção e distribuição de energia elétrica (kg de CO ₂ -eq/kWh)		0,0065
Produção das peças de concreto		
Atividade desenvolvida	1 Peça	5300 Peças
Tempo de funcionamento do misturador (h)	0,0833	441,67
Consumo de energia elétrica considerando a potência do misturador de 200 W (kWh)	0,0167	88,3333
Emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0001	0,5742
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	0,0001	0,5742

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 62 – Resumo da memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção das peças de concreto de cimento álcali-ativado a partir de ativador alcalino convencional.

Processos envolvidos na emissão de CO₂-eq	1 Peça	5300 Peças
Produção de LETA calcinado	0,08	440,02
Produção de metacaulim	0,16	856,16
Produção e transporte de NaOH	0,16	824,73
Produção e transporte de Na ₂ SiO ₃	1,02	5422,28
Produção e transporte de areia	0,02	95,09
Produção e transporte da brita	0,02	107,00
Produção e distribuição de água	0,00	0,03
Produção das peças	0,00	0,57
Total de emissão de CO ₂ -eq (kg)	1,4539	7.705,88

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 63 – Resumo da memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção das peças de concreto de cimento álcali-ativado a partir de ativador alcalino alternativo.

Processos envolvidos na emissão de CO₂-eq.	1 Peça	5300 Peças
Produção de LETA calcinado	0,08	400,87
Produção de metacaulim	0,16	856,16
Produção e transporte de NaOH	0,39	2.070,07
Produção e transporte de sílica ativa	0,05	290,179
Produção e transporte de areia	0,02	95,09
Produção e transporte da brita	0,02	107,00
Produção do ativador alcalino alternativo	0,00	1,72
Produção e distribuição de água	0,00	0,06
Produção das peças	0,00	0,57
Total de emissão de CO₂-eq (kg)	0,72	3.820,87

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 64 – Resumo da memória de cálculo da emissão de CO₂ em função da produção das peças de concreto de convencional a partir de cimento Portland CP IV.

Processos envolvidos na emissão de CO₂-eq.	1 Peça	5300 Peças
Produção e transporte de Cimento Portland	0,68	3.626,63
Produção e transporte de areia	0,02	95,09
Produção e transporte da brita	0,02	107,00
Produção e distribuição de água	0,00	0,06
Produção das peças	0,00	0,57
Total de emissão de CO₂-eq (kg)	0,72	3.829,36

Fonte: Autor, 2023.