



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

PAMELLA FERNANDES FIGUEIREDO

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM MATERIAL ÁLCALI-ATIVADO COM USO DE
CINZA DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR COMO PRECURSOR**

Belo Horizonte

2023



PAMELLA FERNANDES FIGUEIREDO

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM MATERIAL ÁLCALI-ATIVADO COM USO DE
CINZA DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR COMO PRECURSOR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra

F475r Figueiredo, Pâmella Fernandes.
Reação álcali-agregado em material álcali-ativado com uso de cinza de bagaço de cana de açúcar como precursor / Pâmella Fernandes Figueiredo. – 2023.
84 f. : il.
Orientador: Augusto Cesar da Silva Bezerra.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2023.
Bibliografia.

1. Materiais alcalinos. 2. Reações alcali-agregado. 3. Bagaço de cana - Reúso. 4. Sustentabilidade. I. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. II. Título.

CDD: 620.11896



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 71 / 2023 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.061867/2023-15

Belo Horizonte-MG, 15 de dezembro de 2023.

Aos vinte e dois dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e três, às 14h00min, via videoconferência, instalou-se a banca examinadora de dissertação de mestrado da aluna **Pâmella Fernandes Figueiredo**. A banca examinadora foi composta pelos professores **Dr. Luciano Fernandes de Magalhães**, UGMG, examinador externo, **Domingos Sávio de Resende**, CEFET-MG, examinador externo, **Paulo Renato Perdigão de Paiva**, CEFET-MG, examinador interno e **Augusto Cesar da Silva Bezerra**, CEFET-MG, orientador. O Prof. Augusto Cesar da Silva Bezerra, Presidente da sessão pública da defesa de dissertação deu início a abertura dos trabalhos, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou à candidata que iniciasse a apresentação da dissertação, intitulada *Reação álcali-agregado em material álcali-ativado com uso de cinza de bagaço de cana de açúcar como precursor*. Concluída a exposição, o Presidente, passou a palavra aos examinadores para arguirem a candidata; após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento tendo sido **aprovada** a candidata conforme as normas vigentes no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, no prazo de 60 dias, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora conforme a Instrução Normativa POSMAT 02/23. Nada mais havendo a tratar, o Presidente declarou encerrada a sessão. Para constar, foi lavrada a presente ata que será assinada pela Presidente e demais membros da Banca Examinadora.

(Assinado digitalmente em 27/12/2023 09:52)
AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: 2506476

(Assinado digitalmente em 22/12/2023 17:10)
DOMINGOS SAVIO DE RESENDE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTETAX (11.50.18)
Matrícula: 4194738

(Assinado digitalmente em 22/12/2023 17:21)
PAULO RENATO PERDIGÃO DE PAIVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 2112363

(Assinado digitalmente em 22/12/2023 17:18)
LUCIANO FERNANDES DE MAGALHÃES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.056-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **71**, ano: **2023**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **15/12/2023** e o código de verificação: **708f1a52d8**

AGRADECIMENTOS

À Deus!

Ao meu orientador Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra, por ceder imagens e dados pertinentes a pesquisa, pelo convite para participar do projeto P&D ANEEL – CEMIG GT 616 e oportunidade de conhecer o tema

À ANEEL e à CEMIG pelo apoio financeiro, em especial a equipe do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D ANEEL – CEMIG GT 616 – Desenvolvimento de materiais álcali-ativados com uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, o qual proporcionou a compra e manutenção de equipamentos utilizados nesse estudo.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, pela disponibilização de infraestrutura e ensaios de laboratório, pelos professores que fizeram parte dessa trajetória e contribuíram com meu aprendizado.

Aos colegas de laboratório, em especial a Leila Nóbrega e Sâmara França, por toda troca e auxílio, e ao Richard Rodrigues, que colaborou com a execução de etapas importantes do trabalho.

Ao Matheus, pelo incentivo, e companheirismo, aos amigos que se fizeram presente, e me proveram a energia e alegria, à família, que cedeu força e apoio, essenciais no caminho.

RESUMO

A reação álcali-agregado (RAA) é uma patologia relacionada ao concreto que ocorre em consequência da existência de três fatores: a presença de óxidos alcalinos, geralmente sódio ou potássio provenientes do cimento, minerais reativos encontrados em alguns tipos de agregados, e umidade. Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são considerados bons inibidores para RAA, e são contribuintes nos estudos de novos materiais que auxiliam a diminuição do consumo do clínquer, principal constituinte do cimento, que em sua produção consome grandes quantidades de energia e emite gases de efeito estufa (GEE). Conseqüentemente, a utilização de MCS auxilia no avanço rumo a sustentabilidade, ajudando a indústria na implementação de soluções que corroboram com as metas de desenvolvimento sustentável da ONU. Os materiais álcali-ativados (MAA) são constituídos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos sólidos. As matérias-primas podem variar de origem e composição, dando espaço a resíduos e subprodutos que existem em grande escala e baixo consumo. Diante disso, o trabalho investigou o efeito da adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) na durabilidade de argamassas álcali-ativadas em relação à reação álcali agregado e ao ataque ácido. Além disso, ensaios de resistência à compressão, flexão e microscopia eletrônica de varredura foram realizados para analisar o desempenho das argamassas álcali-ativadas produzidas. Como resultado, verificou-se que em relação à reação álcali-silica, as argamassas álcali-ativadas com adição de CBCA apresentam expansões de 0,199% com 15% de CBCA, 0,064% com 30% de CBCA e 0,309% com 45% de CBCA, todas com melhor desempenho que a argamassa de cimento Portland, 0,635%. Em relação ao ataque ácido, as argamassas álcali-ativadas com adição de CBCA apresentam uma perda de massa ligeiramente inferior às demais argamassas analisadas. Além disso, verificou-se uma relação inversamente proporcional entre a absorção de água e a resistência à compressão. A CBCA30 se destaca em termos de menor expansibilidade e resistência mecânica adequada para aplicação estrutural, com resultados de 51Mpa para resistência à compressão e 9Mpa para resistência à flexão.

Palavras-chaves: Material álcali-ativado; Reação álcali-agregado; Cinza do bagaço de cana-de-açúcar; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The Alkali-Aggregate Reaction (AAR) is a pathology related to concrete that occurs due to the existence of three factors: the presence of alkaline oxides, usually sodium or potassium, from cement, reactive minerals found in some types of aggregates, and moisture. Supplementary cementitious materials (SCM) are considered good inhibitors for RAA and are consumers in studies of new materials that help reduce the consumption of clinker, the main constituent of cement, which in its production consumes large amounts of energy and emits greenhouse gases. greenhouse (GHG). Consequently, the use of SCM helps advance towards sustainability, helping the industry to implement solutions that corroborate the UN's sustainable development goals. Alkali-activated materials (AAM) are made from the alkaline activation of solid aluminosilicates. Raw materials can vary in origin and composition, giving way to waste and by-products that exist on a large scale and with low consumption. Therefore, the work investigated the effect of adding sugarcane bagasse ash (SCBA) on the durability of alkali-activated mortars in relation to the occurrence of aggregated alkali and acid attack. Furthermore, resistance to updating, bending and scanning electron microscopy tests were carried out to analyze the performance of the alkali-activated mortars produced. As a result, it was obtained that in relation to the alkali-silica evidence, alkali-activated mortars with addition of SCBA present expansions of 0.199% with 15% SCBA, 0.064% with 30% SCBA and 0.309% with 45% of SCBA, all with better performance than Portland cement mortar, 0.635%. In relation to acid attack, alkali-activated mortars with the addition of SCBA show a much lower mass loss than other proven mortars. Furthermore, an inversely proportional relationship is obtained between water assessment and resistance to variation. SCBA 30 stands out in terms of lower expansibility and mechanical resistance suitable for structural application, with results of 51Mpa for tensile strength and 9Mpa for flexural strength.

Keywords: Alkali-activated material; Alkali-aggregate reaction; Ash from sugarcane bagasse; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração da formação da reação álcali-agregado	19
Figura 2 - Fratura no concreto por RAS	20
Figura 3 - a) Peça de piso de concreto de geopolímero à base de cinza volante/escória pré-moldada. Crédito: Wagners b) Edifício GCI da Universidade de Queensland com 3 pisos suspensos feitos de concreto estrutural geopolimérico. Crédito: Hassel Architect;	23
Figura 4 - Descrição conceitual para ativação de aluminossilicato (geopolimerização).	26
Figura 5 - Gráfico pseudo-ternário de composições de MAA e CP e seus produtos de hidratação.....	29
Figura 6 - a) bagaço da cana-de-açúcar; b) cinza do bagaço de cana-de-açúcar. ...	34
Figura 7 - DRX precursores.....	37
Figura 8 - Pó de pedra de basalto utilizado como agregado	38
Figura 9 - Molde visto em planta (mm).....	42
Figura 10 - Tanque térmico e medidor.	43
Figura 11- Curva granulométrica agregado.....	46
Figura 12- DRX agregado	47
Figura 13- MEV basalto ampliações: a)50x b)500x c)1000x d)5000x	48
Figura 14 - Expansão basalto.....	49
Figura 15 -Expansão REF	51
Figura 16 - Expansão CBCA0	52
Figura 17 - Expansão CBCA15	52
Figura 18 - Expansão CBCA30	53
Figura 19 - Expansão CBCA45	54
Figura 20 - Expansão EGAF	54
Figura 21 - Expansão MC	55
Figura 22 - Resistência à flexão	57
Figura 23 - Resistência à compressão.	58
Figura 24 - Absorção de água, índice de vazios e densidade: AAA curada em NaOH.	59
Figura 25 - Absorção de água, índice de vazios e densidade: AAA curada em água	60

Figura 26 - MEV REF - a) NaOH b) água.....	61
Figura 27 - MEV CBCA0: a) NaOH b) água	61
Figura 28- MEV CBCA15: a) NaOH b) água.....	62
Figura 29 - MEV CBCA30: a) NaOH b) água	62
Figura 30- MEV CBCA45: a) NaOH b) água	62
Figura 31 - MEV EGAF a) NaOH b) água	63
Figura 32 - MEV MC: a) NaOH.....	63
Figura 33 - Perda de massa por ataque ácido	64

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Especificações do silicato de sódio.....	39
Tabela 2 - Dosagem das amostras das pastas AA (%)......	40
Tabela 3 - Composição química dos precursores obtida por FRX (%massa) e distribuição granulométrica.....	50
Tabela 4 - Expansão média barras de argamassa curadas em NaOH.	55
Tabela 5 - Expansão média das barras de argamassa curadas em água.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Álcali-ativada

AAA – Argamassas álcali-ativadas

CBCA – Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

CBCA0 – Argamassa álcali-ativada com 0% de CBCA como precursor

CBCA15 – Argamassa álcali-ativada com 15% de CBCA como precursor

CBCA30 – Argamassa álcali-ativada com 30% de CBCA como precursor

CBCA45 – Argamassa álcali-ativada com 30% de CBCA como precursor

C-A-S-H ou CASH – Aluminossilicato de cálcio hidratado

CP – Cimento Portland

CPV – Cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H ou CSH – Silicato de cálcio hidratado

DRX – Difração de raios X

EGAF – Escória granulada de alto-forno

EGAF100 – Argamassa álcali-ativada com 100% de EGAF como precursor

GEE – Gases de efeito estufa

FRX – Espectroscopia de fluorescência de raios X

MAA – Material álcali-ativado

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MC – Metacaulim

MC100 – Argamassa álcali-ativada com 100% de MC como precursor

MPa – Mega Pascal (unidade de pressão referente a 1×10^6 Pascal)

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

N-A-S-(H) OU NASH – Aluminossilicato de sódio hidratado

RAA – Reação álcali-agregado

RAC – Reação álcali-carbonato

RAS – Reação álcali-sílica

SS – Silicato de sódio (Na_2SiO_3)

TGA – Análise termogravimétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Reação álcali-agregado (RAA)	17
2.1.1 Reação álcali-sílica (RAS).....	18
2.2 Materiais Álcali-Ativados (MAA).....	21
2.2.1 Mecanismos de reação	24
2.2.2 Ativadores alcalinos	27
2.2.3 Precursores.....	29
2.2.4 Durabilidade de MAA	32
2.3 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA).....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Materiais	36
3.1.1 Cimento Portland.....	36
3.1.2 Precursores.....	36
3.1.3 Agregado.....	38
3.1.4 Água.....	38
3.1.5 Ativadores alcalinos	38
3.2 Caracterização.....	39
3.2.1 Caracterização do agregado	39
3.2.2 Caracterização dos precursores.....	40
3.3 Métodos	40
3.3.1 Dosagem das argamassas.....	40

3.3.2 Reação álcali-sílica (RAS).....	42
3.3.3 Resistência à flexão	43
3.3.4 Resistência à compressão	44
3.3.5 Absorção de água	44
3.3.6 MEV após RAS	45
3.3.7 Ataque ácido	45
4. RESULTADOS	46
4.1 Caracterizações.....	46
4.1.1 Caracterização do Agregado.....	46
4.1.2 Caracterização dos Precursores	49
4.2 Reação álcali-sílica	51
4.3 Resistência Mecânica	56
4.3.1 Resistência à Flexão	56
4.3.2 Resistência à Compressão	57
4.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	58
4.5 Microscopia eletrônica de varredura	60
4.6 Ataque ácido.....	63
5. DISCUSSÕES.....	64
5.1 Reação álcali-sílica.....	64
5.2 Resistência à flexão e resistência à compressão/ microscopia eletrônica de varredura	65
5.3 Absorção de água, porosidade e densidade aparente/ microscopia eletrônica de varredura	66
5.4 Ataque ácido e microscopia eletrônica de varredura	67
6. CONCLUSÃO	69
7 – CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS DO TRABALHO	71
8 - REFERENCIAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

Para garantir o desenvolvimento social, econômico e tecnológico é necessário a construção de moradias, obras de infraestrutura e industriais, todas diretamente geram dependência do consumo de cimento Portland (CP) utilizado principalmente para a produção de concretos e argamassas. Contudo, o processo de fabricação do cimento Portland utiliza matérias-primas não renováveis, exige a utilização de enormes quantidades de energia, e libera na atmosfera gases poluentes que prejudicam o meio ambiente, incluindo dióxido de carbono (CO₂), vilão do efeito estufa. O clínquer é produzido através do aquecimento do calcário e argilas em elevadas temperaturas, e o processo que envolve a decomposição do carbonato de cálcio presente no calcário durante a produção do clínquer Portland é responsável pela maior parte das emissões desse gás. Segundo a Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA), a produção de CP representa 7% das emissões globais de CO₂, e em 2021 lançou o Roteiro da Indústria do Cimento e Concreto 2050, “Concreto Net Zero 2050”, que consta o compromisso de descarbonização pela indústria de cimento e concreto, com o desafio de reduzir 25% das emissões de CO₂ até 2030, e chegar ao marco Net Zero em 2050 (LE QUÉRÉ *et al.*, 2016; Adeleke, 2021).

Além dos problemas ambientais vinculados a produção do cimento Portland e da elevada tendência de crescimento da sua utilização, outro fator relevante a ser considerado é o acompanhamento de antigas e novas construções, pois a engenharia deve certificar que essas estruturas sejam seguras durante sua vida útil. A durabilidade dos concretos é foco de pesquisas no mundo todo, e pode estar condicionada a inúmeros fatores, tanto internos como externos, físicos ou químicos (CYR; POUHET, 2015; BAKHAREV, Tanya; SANJAYAN; CHENG, 2001).

A reação álcali-agregado (RAA) é uma patologia relacionada a durabilidade de estruturas de concreto que pode causar grandes transtornos, e inutilizar estruturas de grandes dimensões, como fundações de pontes, barragens e até mesmo prédios residenciais. Consiste em uma reação química que pode ser percebida por meio de manchas esbranquiçadas, micro ou macro fissuras no exterior da estrutura, além da presença de um gel expansivo (STANTON, 1942).

A RAA ocorre em consequência da existência de três fatores: a presença de óxidos alcalinos, geralmente sódio ou potássio, provenientes do cimento, minerais reativos encontrados em alguns tipos de agregados e umidade (ROSSI *et al.*, 2022).

Existem três tipos de RAA identificadas em virtude do tipo de agregado: a reação álcali-carbonato (RAC), reação álcali-silicato e reação álcali-sílica (RAS), sendo a última a mais estudada e evidenciada (BLIGHT; ALEXANDER, 2010; GOMES; MOLIN; ANALYSIS, 2018; SARAIVA, 2017; UHE *et al.*, 2002;). A RAS tem como produto um gel expansivo decorrente do ataque da sílica amorfa presente no agregado, por hidróxidos alcalinos (NaOH ou KOH) provenientes dos poros da matriz do concreto. Esse gel tende a se expandir e causar pressão no interior do material gerando efeitos deletérios.

Para induzir a diminuição da produção de clínquer e gerar impactos positivos na luta contra a emissão de gases de efeito estufa (GEE), pesquisadores trabalham na inserção de materiais alternativos através da substituição parcial ou total do CP usado como aglomerante. Essa substituição tem sido amplamente estudada e inclui alguns subprodutos como a escória granulada de alto forno (EGAF), cinzas volantes, cinzas de termoelétrica, rejeitos de mineração, e materiais que geralmente existem em grande quantidade e não possuem elevado valor econômico. Esses materiais são comumente denominados materiais cimentícios suplementares (MCS). Dentre inúmeras pesquisas que utilizam MCS, existem aquelas que evidenciam a tentativa de inibir a RAA (ANGULO-RAMÍREZ; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; MEDEIROS, 2018). Gholampour e Ozbakkaloglu (2017) afirmam que misturas de cinzas volantes e EGAF projetadas de forma adequada podem apresentar propriedades similares ao concreto convencional, tornando-se uma opção promissora à substituição do CP, e um caminho para redução do impacto ambiental causado pelo passivo de subprodutos industriais.

Almejando se aproximar da sustentabilidade na construção civil com uso desses subprodutos como matéria-prima, o material álcali-ativado (MAA) é considerado um promissor substituto para o CP. Esse tipo de material já é desenvolvido e estudado há algumas dezenas de anos, e é obtido a partir de precursores aluminossilicatos sólidos, ativados alcalinamente (NaOH, KOH) (JUENGER *et al.*, 2011; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). O MAA possui propriedades mecânicas e físico-químicas satisfatórias, Lodeiro *et. al* (2007) afirmam que MAA usando cinzas volantes como

precursor é menos suscetível a ocorrência de expansão por reação álcali-sílica do que sistemas tradicionais que utilizam CP.

Diversos subprodutos e resíduos industriais, fontes de aluminossilicatos, podem ser utilizados como precursores nos MAA, dentre estes se encontram as escórias, argilas calcinadas e cinzas volantes. Estas três matérias-primas são mais utilizadas como precursores na ativação alcalina e já foram bastante estudadas como MCS. Os hidróxidos de sódio e potássio são os ativadores alcalinos mais utilizados. Contudo, em sistemas de alto cálcio, os carbonatos ou sulfatos de sódio são considerados mais eficazes (DUXSON; PROVIS, 2008).

Shi, Krivenko e Roy (2006) relatam que cimentos e concretos feitos a partir de MAA foram fabricados comercialmente e usados para vários fins na antiga União Soviética e na China, incluindo aplicação em pavimentos rígidos, blocos de alvenaria, postes de serviço público, estabilização de resíduos perigosos, entre outros. O concreto de escória ativado alcalinamente exibe propriedades desejáveis, como maior resistência ao ataque ácido e de sulfatos, assim como maior estabilidade em altas temperaturas (BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2003; TUYAN; ZHANG; NEHDI, 2020).

Um dos resíduos gerados no Brasil de maior importância em volume é o bagaço da cana-de-açúcar. Segundo a Conab (Companhia Nacional de Abastecimento, 2023) a safra 2022/23 de cana-de-açúcar do Brasil chegou a 610 milhões de toneladas, sendo que somente a região Sudeste produziu 387,76 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Parte do bagaço advindo da produção de açúcar e etanol costuma ser utilizada em fornos para obtenção de calor e vapor d'água. Todavia, a combustão do bagaço produz como resíduo final as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), totalizando mais de 2,5 milhões de toneladas por ano (FAIRBAIRN *et al.*, 2010; SANTOS, 2017).

A CBCA possui a sílica (SiO_2) como um dos seus principais constituintes, representando um potencial para aplicação como MCS. Segundo Rezende *et al.* (2017), ao considerar fatores de redução de emissões, com substituição de 20% de CBCA no concreto de CP é possível reduzir de 19,60% de emissões de CO_2 .

No intuito de fornecer dados, e disseminar a utilização de MAA, o presente trabalho investigou o efeito da CBCA na durabilidade de argamassas álcali-ativadas quanto à

RAS, e seu o comportamento físico, químico e mecânico após induzido ao efeito da patologia.

1.1 Justificativa

Em 2015 a ONU estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que compõem uma agenda mundial para criação e implementação de políticas públicas e servem como um guia para a humanidade. Como exemplos, temos o ODS 9, que se concentra em “Industria, Inovação e Infraestrutura” e o ODS 13 que se refere à Ação Contra Mudança Global do Clima” (OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Pacto Global, 2023. Disponível em <pactoglobal.org.br>. Acesso em 10, de novembro de 2023).

A ODS 9 destaca a necessidade de inovação e tecnologia limpa, enquanto a ODS 13 enfatiza a importância de tecnologias que ajudam a reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Ambas estão interconectadas para necessidade do enfrentamento das mudanças climáticas causadas por emissões de GEE, e desenvolvimento de uma infraestrutura sustentável. Isso inclui a construção de infraestrutura de transporte, energia, água e comunicações que sejam eficientes em termos de recursos e não prejudiquem ao meio ambiente (OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Pacto Global, 2023. Disponível em <pactoglobal.org.br>. Acesso em 10, de novembro de 2023).

A construção civil é o setor da economia que mais demanda recursos não renováveis e gera quantidades significativas de resíduos, tem como desafio a economia circular. Diante disso, pesquisas que buscam implementar a sustentabilidade neste setor são urgentes, e o estudo do uso de CBCA como precursor em materiais álcali-ativados e potencial inibidor de reação álcali-agregado, pode contribuir para soluções inovadoras, que corroboram com as metas globais (FRANÇA *et al.*, 2023).

A investigação da durabilidade das estruturas é fundamental para que possamos preservar e garantir a segurança das construções, e os MAA são uma excelente opção para reparo de patologias, concomitantemente à diminuição da produção do clínquer, através da substituição do uso de cimento Portland, e uso matérias-primas que são passivos ambientais (SOUSA *et al.*, 2022; FRANÇA *et al.*, 2022, 2023).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a durabilidade de argamassas álcali-ativadas (AAA) produzidas com diferentes teores de CBCA, através da investigação de reatividade álcali-agregado, avaliação química, física e mecânica do material induzido a RAS.

1.2.2 Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos do trabalho estão:

- Avaliar a susceptibilidade à reação álcali-sílica (RAS) de argamassas álcali-ativadas, com diferentes teores de CBCA e argamassas de CP.
- Avaliar a resistência mecânica das AAA após teste de RAS, por meio de ensaios de resistência à compressão e flexão.
- Avaliar a microestrutura das argamassas, após RAS, com imagens de microscopia eletrônica de varredura, ensaio de absorção de água, densidade aparente e ataque ácido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reação álcali-agregado (RAA)

A RAA é uma reação química que ocorre lentamente no interior de estruturas de concreto quando na presença de água, os óxidos alcalinos presentes principalmente no cimento, como o de sódio (Na) ou potássio (K), interagem quimicamente com minerais reativos encontrados em alguns agregados. Esta reação gera um gel sílico alcalino expansivo, que tensiona o concreto e pode gerar ruptura da estrutura (HASPARYK, 2005; SARAIVA, 2017;). Os mecanismos de expansão dependem das especificações do cimento e podem levar o concreto a perda de resistência mecânica e módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2005). Esta reação é considerada uma patologia do concreto com alto grau de deterioração e difícil recuperação, sobretudo em grandes estruturas como barragens e outras obras hidráulicas. Por se tratar de uma reação lenta a melhor forma de se evitar a RAA é a prevenção (NOGUEIRA, 2010).

Geofrey e Alexander (2010) mencionam que na década de 1940, a RAA foi identificada formalmente na literatura de engenharia, entretanto já havia sido observada nos EUA na década de 1920. Os estudos relacionados ao tema ganharam maior foco na década de 1970 quando houve maior conscientização da comunidade científica, e maiores investimentos nas pesquisas. O primeiro encontro internacional a respeito do assunto aconteceu em 1974 na Dinamarca, e a partir de então diversas conferências foram realizadas pelo mundo, proporcionando relevantes, incluindo estudos de casos, medidas preventivas e corretivas (POOLE, 1992).

No Brasil já existem alguns estudos que buscam entender melhor como prevenir a ocorrência de patologias advindas da RAA. Dutra *et al.* (2017) afirmou que a RAA deixou de ser relacionada exclusivamente com obras hidráulicas desde 2004 quando a reação foi identificada em fundações de edifícios na cidade de Recife-PE. Em um estudo de caso Hasparyk (2005) avaliou o comportamento da reação álcali-agregado a partir de amostras do concreto da Usina Hidroelétrica de Furnas (UHE Furnas) através da análise das características do gel exsudado e da investigação da mineralogia do agregado utilizado nesse concreto. Pereira *et al.* (2018b), por sua vez, caracterizou petrograficamente quatro agregados naturais utilizados no Rio Grande do Sul e avaliou a reatividade álcali-agregado. Além disso, a definição de parâmetros

para o uso de agregados em concretos, visando a prevenção de reações expansivas deletérias é regulamentada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15577, 2018).

Há três tipos de RAA identificados na literatura que variam de acordo com o tipo e mineralogia do agregado, sendo estas: reação álcali-carbonato (RAC), reação álcali-sílica (RAS), e reação álcali-silicato (RASS), que se assemelha a RAS, contudo ocorre de forma mais lenta (BLIGHT; ALEXANDER, 2010; GILLOTT, 1975; HASPARYK, 2005; SARAIVA, 2017) .

A RAC se difere da RAS e RASS, por ocorrer entre alguns calcários dolomíticos e os álcalis presentes nos poros do concreto gerando a chamada desdolomitização, que se refere a formação de brucita ($Mg(OH)_2$), além da regeneração de hidróxidos alcalinos. Neste tipo de reação não há formação de gel, mas a ocorrência de fissuração e enfraquecimento da zona de transição (HASPARYK, 2005; MIZUMOTO, 2009). Segundo Gillott (1975) as primeiras descrições claras a respeito da RAC aconteceram na década de 1960. No Brasil, o estudo desse tipo de RAA é pouco difundido, sendo que a NBR 15577 (ABNT 2018) se aplica apenas a análise da RAS, objeto de estudo deste trabalho.

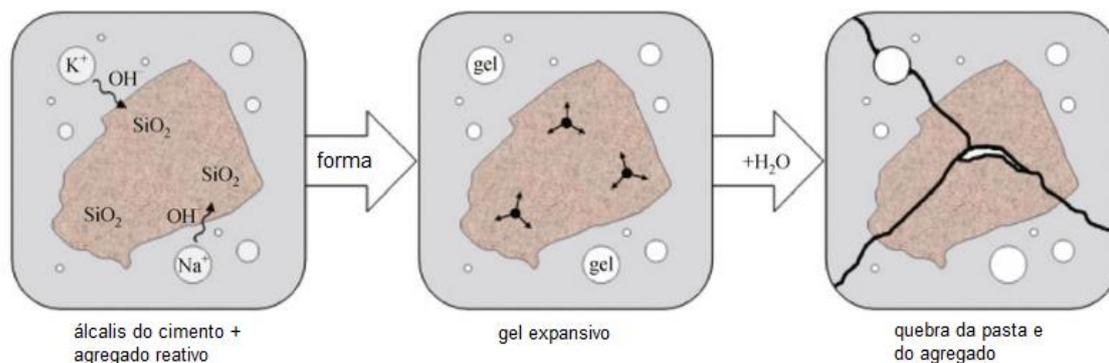
2.1.1 Reação álcali-sílica (RAS)

A RAS é a manifestação mais comum e estudada dentre os tipos de RAA, está associada ao gel expansivo formado entre os hidróxidos alcalinos dos poros constituintes do concreto e certos tipos de sílica presentes em alguns agregados. Hasparyk (2005) menciona a opala (ou sílica amorfa), calcedônia, cristobalita, tridimita, os vidros naturais e artificiais e o quartzo como as formas minerais mais recorrentes dentre os agregados reativos.

A RAS é reconhecida por três condições necessárias para sua ocorrência: presença de agregado reativo, alto nível de alcalinidade e umidade relativa nos poros do concreto e, uma vez iniciada, a reação é suscetível às três condições (OWSIAK; ZAPAŁA-SŁAWETA; CZAPIK, 2015; PAN *et al.*, 2012; PONCE; BATIC, 2006). A quantidade de gel formado na reação depende da fração e do tipo de sílica reativa, além da concentração de hidróxido alcalino presente na solução dos poros do

concreto (FARNY; KOSMATKA, 1997). O processo descrito é exemplificado na Figura 1.

Figura 1 - Ilustração da formação da reação álcali-agregado



Fonte: Traduzido de J.W. PAN *et al.* (2012)

Esse gel, à medida que aumenta seu contato com água tende a se expandir, e de acordo com o volume gel pode haver demasiada pressão no interior do material, excedendo o limite de resistência à tração propiciando a degradação do concreto ou da argamassa (GILLOTT, 1995; MADUREIRA; RODRIGUES, 2015). Glesser (1992) relatou que o primeiro estágio da reação é determinado como tipo ácido-base, no qual o grupo silanol (Si-OH), presente na superfície da sílica, é atacado pelos íons hidroxilas (OH^-), liberando água. Os cátions presentes no meio se associam à estrutura do grupo, desbalancando negativamente pelo SiO^- , formando o gel sílico alcalino.

A RAS foi identificada nos concretos de usinas nucleares do Canadá e Estados Unidos demonstrando implicações potencialmente graves sobre a integridade estrutural e capacidade de serviço nas plantas da usina. A fim de estabelecer critérios de avaliação e mitigar consequências foi conduzido um estudo integrado pela Universidade de Toronto e a Comissão Canadense de Segurança Nuclear centrado em aspectos materiais, estruturais, análise e avaliação numérica relacionados a RAS. O estudo mostrou que a expansão causada pela RAS quando em estado de tensão multiaxial pode provocar reduções não uniformes nas propriedades mecânicas do concreto e a degradação da aderência nas armaduras (FERCHE *et al.*, 2017, 2019; GAUTAM, 2016).

No Brasil, as barragens de usinas hidroelétricas estão expostas a riscos estruturais e de operação devido à RAS, resultados de pesquisas realizadas na usina de Furnas indicam que os concretos procedentes da galeria de drenagem sofrem com a reação, apresentando potencial para continuarem se expandindo (HASPARYK *et al.*, 2002). Para além disso o Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB (1999) relatou que em alguns países cerca de 25% das estruturas de barragens estavam afetadas pela RAA. A figura 2 mostra o lascamento superficial do concreto pela expansão do gel na usina hidrelétrica de Jaguará (SARAIVA, 2017).

Figura 2 - Fratura no concreto por RAS



Fonte: (SARAIVA, 2017)

Ainda não existem relatos de como conter totalmente essas reações deletérias e, portanto, a prevenção é a melhor maneira de combater os danos causados pela RAS. Em busca de esforços para solucionar e investigar problemas, alguns ensaios são citados na literatura nos últimos anos. Esses ensaios dividem-se em: avaliação dos agregados, unicamente; métodos de avaliação de argamassas e concretos; e finalmente métodos que avaliam diferentes combinações de cimento/agregado (VALDUGA, 2007).

Dentre os ensaios de normas mais comuns encontrados na literatura estão as normativas americanas ASTM C 1260, método acelerado em barras de argamassas, e ASTM C -1293, método dos prismas de concreto. A NBR 15577 (ABNT, 2018) é uma normativa brasileira que atua como guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para o uso de agregados em argamassa e concreto, esta é dividida em oito partes. A norma descreve os ensaios e cálculos de expansão e

inibição, define os agregados em três classificações: agregado potencialmente inócuo, agregado potencialmente reativo, e agregado reativo/deletério.

Vários pesquisadores buscam maneiras de inibir ou mitigar as reações expansivas, como a utilização de adições pozolânicas, que tem como exemplo escórias de alto forno e cinzas volantes, dentre os mais variados e conhecidos MCS que podem ser adicionados/substituídos ao cimento. Estas adições podem impedir a RAS ao reagirem com o hidróxido de cálcio do cimento aumentando o pH da solução dos poros. A sílica presente nessas adições reage com os álcalis do CP antes dos agregados e de forma não prejudicial (MORAES, 2016; SILVA *et al.*, 2010; YANG; LI; RAO, 2017). Ao substituir CP parcialmente por pó de calcário e cinzas volantes Wang (2019) demonstrou que as taxas de expansão, já aos 14 dias, são nitidamente menores que as taxas de expansão sem adição.

2.2 Materiais Álcali-Ativados (MAA)

No mundo todo vemos o cimento Portland como base dos elementos essenciais aos meios urbanos e modernos, uma vez que o estímulo ao desenvolvimento econômico e a constante busca de melhoria do ambiente construído induz um aumento significativo de seu consumo e produção a cada ano. No entanto, é inquestionável que a indústria de cimento precisa passar por transições, mesmo que o mercado, e parte da comunidade científica ainda não reconheçam totalmente. A atual tecnologia do CP segue vertentes imutáveis já há um longo período, demanda grandes quantidades de energia e materiais não renováveis, além do volume intolerável de emissões de CO₂, o que torna incompatível com a tendência de um desenvolvimento sustentável (PALOMO *et al.*, 2014; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). De acordo com estudo do *Green Building Council* (2017) para cumprir as pretensões climáticas globais do Acordo de Paris é necessária uma redução de 30% (comparação com valores de 2015) da intensidade energética por metro quadrado (m²) no setor de construção.

Embora o senso comum ainda seja dominado pelo uso do CP, ligantes alternativos estão sendo desenvolvidos para produzir concretos que tendem a amenizar o impacto ambiental gerado nas construções e na produção do clínquer através da utilização de

maiores proporções de materiais residuais, além da perspectiva de obter produtos com igual ou melhor desempenho (JUENGER *et al.*, 2011).

O material álcali-ativado (MAA) vem recebendo grande atenção, é um notável candidato quando o assunto é a renovação e melhoria da tecnologia cimentícia. Pode ser produzido a partir de um vasto conjunto de matérias-primas, entre aluminossilicatos sólidos (cinzas volantes, escória de alto-forno, metaculim, etc), denominados precursores, e uma solução ativadora alcalina, geralmente hidróxidos, carbonatos e silicatos (ŠKVÁRA, 2007).

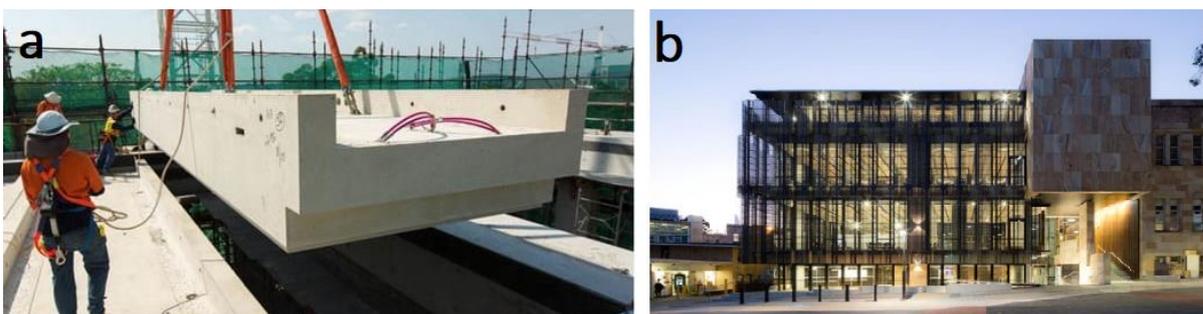
A literatura que abrange esta nova opção de aglomerante teve seu início marcado nas décadas de 40 e 50 a partir da publicação inicial do estudo laboratorial de Purdon (1940) que chegou em resistências mecânicas próximas ao CP através do uso de escórias e NaOH. Glukhovsky (1950) investigou a viabilidade de preparar materiais cimentícios mediante a reação entre fontes de aluminossilicatos (naturais ou subprodutos industriais) e sistemas alcalinos. As publicações seguiram modestas até a década de 80 quando o pesquisador francês Davidovits trabalhou ativação de escórias, porém com sistemas livres de cálcio, utilizando argilas calcinadas. A estrutura de rede do produto, ou gel, dessa reação pode se assemelhar aos polímeros orgânicos, tetraedros de SiO_4 e AlO_4 se ligam alternadamente compartilhando todos os oxigênios, fato que atribui ao material os termos “polímero inorgânico” ou “geopolímero” usando por alguns autores (DAVIDOVITS, 1994; JUENGER *et al.*, 2011).

Na antiga União Soviética foram desenvolvidas especificações e normas abordando matérias-primas e produção de cimento de escória ativada por álcali, fornecendo valioso conhecimento para aplicação e desenvolvimento desses ligantes. No Brasil, assim como no mundo todo, o interesse por geopolímeros tem atraído a atenção da comunidade científica. Muitas pesquisas e publicações sobre o assunto nos últimos anos estão disponíveis nas principais bases de dados (GERALDO, 2016; LUUKKONEN *et al.*, 2019; MEI *et al.*, 2021; PINHEIRO *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2022).

Apesar das dúvidas que ainda existem e escassez de normas e legislação, o material geopolimérico já é empregado no uso de construções civis, como mostra a Figura 3

do primeiro prédio público na Universidade de Queensland em Brisbane na Austrália. Diversos países estão buscando desenvolver o material em escala industrial utilizando matérias-primas que variam de região para região (ADESANYA *et al.*, 2021; PROVIS, 2018).

Figura 3 - a) Peça de piso de concreto de geopolímero à base de cinza volante/escória pré-moldada. Crédito: Wagners b) Edifício GCI da Universidade de Queensland com 3 pisos suspensos feitos de concreto estrutural geopolimérico. Crédito: Hassel Architect;



Fonte: <https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>

O uso de compostos de metais alcalinos no cimento Portland comum foi desprezado muito tempo atrás por serem altamente solúveis. Contudo, no transcorrer dos anos, estudos de cimentos antigos de excelente durabilidade, pertencentes ao acervo histórico mundial, demonstram que esse argumento de solubilidade dos metais alcalinos não é totalmente preciso (PALOMO *et al.*, 2014). Demortier (2020) em um trabalho que investiga a distribuição de sódio e cloro em amostras das pirâmides egípcias confirma a teoria de Davidovits, que sugere que as pirâmides foram moldadas in situ usando agregado de calcário granular, cal (possivelmente gerada pela combustão doméstica de madeira), uma mistura de carbonato de sódio hidratado ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) com cloreto de sódio (NaCl) e sulfato de sódio (Na_2SO_4), e água para produzir um ligante a base de silicato de alumínio alcalino (DAVIDOVITS, 1988; DEMORTIER, 2020).

A química da ativação alcalina e os produtos de reação ainda geram alguns debates na comunidade científica, pois mesmo que sejam feitos inteiramente de resíduos, a qualidade, a quantidade e a origem das matérias primas, bem como a composição química e mineralógica são determinantes para as diferentes aplicações e funcionalidades. Apesar disso, os avanços na literatura são notáveis, evidenciando

bons resultados nos testes de durabilidade e grande potencial de adquirir resistência mecânica em temperatura ambiente, possibilitando uso em estruturas de grande porte e escala (JUENGER *et al.*, 2011; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012).

A competição do mercado cimentício é controlada pelas diferentes propriedades de desempenho do material endurecido e fresco, aliado as práticas tradicionais da indústria de construção. Os profissionais devem ser capacitados para formular misturas de concretos e argamassas dosadas para obter desempenho físico e mecânico desejados com menor custo econômico possível, porém é necessário que esses produtos estejam alinhados ao futuro e as tendências internacionais de desenvolvimento tecnológico e ambiental, mudando perspectivas e prioridades que podem ajudar as nações em desenvolvimento se adequarem aos ideais de sustentabilidade (PROVIS, 2014a).

2.2.1 Mecanismos de reação

Ativação alcalina é um termo genérico que se aplica à reação de um aluminossilicato sólido (precursor) sob condições alcalinas (fornecidas pelo ativador alcalino) para produção de ligantes. Devido à natureza das diversas composições possíveis de precursores e ativadores para produção de MAA, o produto da reação de ativação alcalina pode ser classificado em função da quantidade de cálcio (Ca) no sistema gerando padrões de ativação diferentes. Palomo (2014) classificou esses aglomerantes em 3 categorias de ativação: cimentos com alto cálcio, baixo cálcio e híbridos (mistos) (I. GARCIA-LODEIRO, A. PALOMO, 2015).

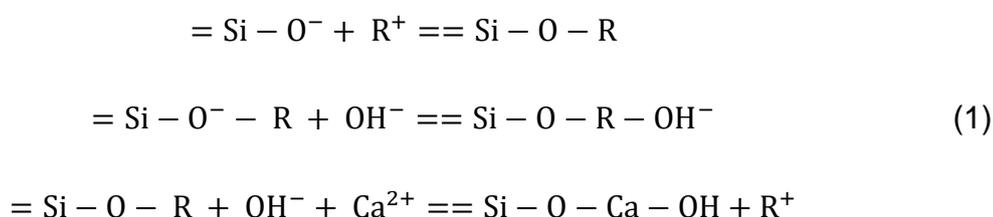
Os aglomerantes produzidos com precursores contendo significativo teor de Ca (escória de alto forno, por exemplo) formam um gel aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H), similar ao produto de reação do CP (C-S-H). Já as matérias-primas de baixo teor de Ca (cinzas volantes e metacaulim) geram polímeros alcalinos inorgânicos tridimensionais, semelhante a zeólitas, um gel aluminossilicato de sódio hidratado (N-A-S-H) (geopolimerização). Os sistemas híbridos possuem um produto de hidratação mais complexo e pode coexistir fases dos géis C-A-S-H e N-A-S-H (CAIJUN SHI, 2006; DAVIDOVITS, 2017; PALOMO *et al.*, 2014).

A maioria das publicações relacionadas aos mecanismos de reação da ativação alcalina diverge na descrição do processo em função do precursor, do produto

formado, e muitas vezes pela nomenclatura envolvida, sendo assim essencial identificar os sistemas de acordo com o gel predominante (PROVIS, 2014b). Alguma literatura cita tanto a coexistência dos dois tipos de géis, (C-(N)-A-S-H), quanto a possibilidade de modificar N-A-S-H em C-A-S-H (BERNAL *et al.*, 2011; RUIZ-SANTAQUITERIA; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2016; YIP; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005; SILVA *et al.*, 2022).

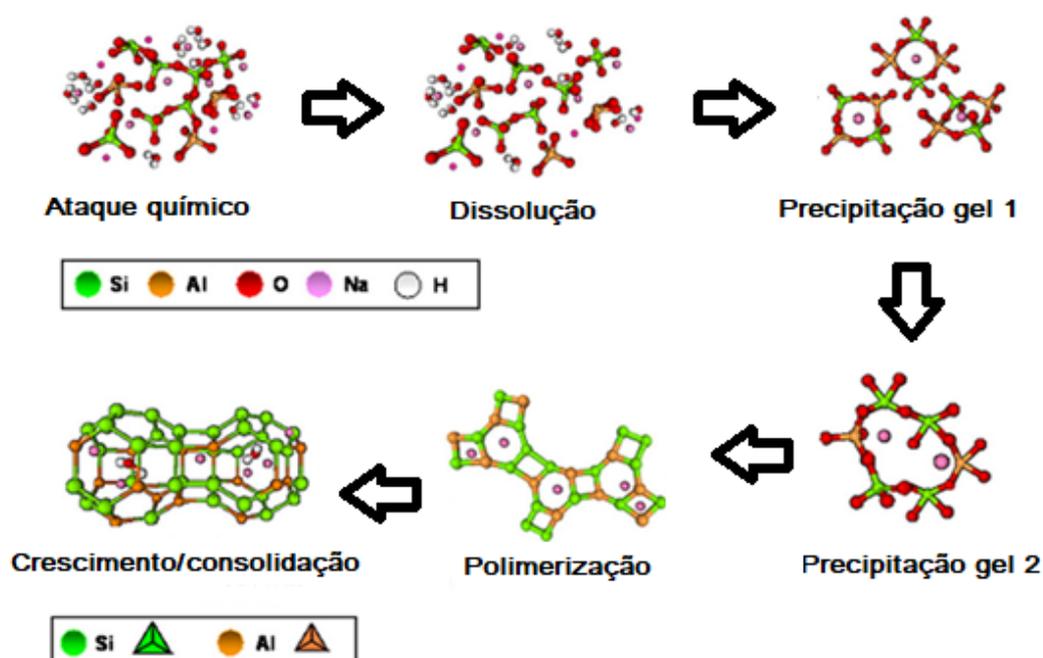
Shi *et al.* (2011) explica que Glukhovsky já nos anos 50-60 descreveu um modelo que rege a reação de MAA de escórias como sendo reações conjuntas de destruição-condensação. Primeiramente com a dissolução dos aluminossilicatos sólidos no meio alcalino ocorre quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si, então esses grupos são transformados em uma fase colóide e ocorre acúmulo dos produtos destruídos que interage entre eles formando uma coagulação que por fim forma uma estrutura condensada que gera produtos hidratados. O mecanismo citado pode ser dividido basicamente em 3 estágios: I – “destruição-coagulação”, II – “coagulação-condensação e III – “condensação- cristalização” (ALVARENGA, 2010; PACHECO-TORGAL; CASTRO-GOMES; JALALI, 2008; SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011).

Ainda não há um consenso geral sobre os mecanismos que regem as interações entre as espécies envolvidas, no entanto Garcia-Lodeiro *et al.* (2015) expõe que a equação (1) proposta por Glukovsky e Krivenko pode explicar a ativação alcalina de materiais com alto teor de Ca. O cátion alcalino (R⁺) atua como catalisador na fase inicial de hidratação através da troca catiônica com Ca²⁺ e à medida que as reações avançam, os cátions alcalinos são absorvidos pela estrutura (I. GARCIA-LODEIRO, A. PALOMO, 2015).



A diferença nas propriedades dos MAA derivados de diferentes matérias-primas são evidentes, e embora existam diferenças nas propriedades frescas, no comportamento mecânico na durabilidade, as reações características de dissolução e na microestrutura do processo de ativação alcalina, contendo baixo ou alto teor de Ca, a estrutura molecular que tem a mesma ligação de silício e alumínio e o mesmo ligante de fase gel são observados em ambos sistemas, e por esse motivo Duxson (2007) afirma que literatura deve se reconciliar dentro do modelo conceitual de reação geopolimérica apresentado na Figura 4 (DUXSON *et al.*, 2007; F. PACHECO-TORGAL; C. LEONELLI; CHINDAPRASIRT, 2015; FRANÇA *et al.*, 2022).

Figura 4 - Descrição conceitual para ativação de aluminossilicato (geopolimerização).



Fonte: Adaptado de SHI; JIMÉNEZ; PALOMO (2011)

Quando aluminossilicato entra em contato com a solução alcalina, ocorre dissolução formando principalmente monômeros de sílica e alumina, que interagem sucessivamente até atingir a saturação, precipitando um gel N-A-S-H intermediário metaestável, inicialmente rico em Al, gel 1. A formação desse gel 1 pode ser devido ao alto teor de Al^{3+} no meio alcalino no início da reação, o alumínio reativo se dissolve mais rápido que o silício pois as ligações Al-O são mais fracas que as ligações Si-O. No decorrer da reação os grupos de Si-O da fonte precursora se dissolvem proporcionando aumento da concentração de silício no meio de reação e no gel N-A-

S-H, gel 2. A partir dessa reorganização estrutural pode ser determinado a composição final do material, além de sua microestrutura e distribuição de poros, que por fim serão predominantes do desenvolvimento das propriedades físicas do aglomerante (DUXSON *et al.*, 2007; F. PACHECO-TORGAL; C. LEONELLI; CHINDAPRASIRT, 2015; SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011).

Os cátions Si^{4+} e Al^{3+} são coordenados tetraedricamente e unidos por ligações de oxigênio. A carga negativa no grupo AlO_4^- é neutralizada pela presença dos cátions alcalinos (Na^+ e K^+). No entanto, a estrutura do gel pode diferenciar significativamente dependendo do grau de reação, da temperatura de cura e, particularmente, da presença de sílica solúvel no ativador (PALOMO *et al.*, 2014).

2.2.2 Ativadores alcalinos

Os ativadores fornecem o meio alcalino necessário para a dissolução dos precursores sólidos induzindo os fenômenos de formação do ligante. Os mais utilizados na composição dos MAA são hidróxidos e silicatos de metais alcalinos (ou ambos), sendo também encontrado na literatura o uso de carbonatos ou sulfatos nessa função. A natureza e a concentração desses ativadores tem influência direta na estrutura e na propriedade mecânica final do produto, e sua escolha pode ser baseada nas características e qualidade dos precursores (BEZERRA *et al.*, 2013; PROVIS; BERNAL, 2014^a).

Dentre os ativadores possíveis de utilização, o NaOH , Na_2CO_3 , $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$ e Na_2SO_4 são os produtos químicos mais amplamente disponíveis e viáveis economicamente, embora soluções com KOH apresentem maior potencial de reação e melhores resultados de resistência à compressão. O carbonato de sódio e sulfato de sódio podem ser provenientes de recursos naturais ou manufaturados, enquanto o hidróxido de sódio e o silicato de sódio são obtidos apenas através de produção industrial (CAIJUN SHI, 2006; JOHN L. PROVIS AND JANNIE S. J. VAN DEVENTER, 2009).

Em um trabalho que investigou a ativação alcalina de escórias em cura ambiente e térmica (80°C). Altan & Erdogan (2012) observaram o desenvolvimento de resistência de argamassas utilizando hidróxido Na^+ e K^+ e silicato de sódio, verificando que tanto solução de silicato e NaOH é são necessárias para o ganho de resistência em argamassas curadas em temperatura ambiente. O KOH é mais eficaz do que o NaOH

a 80°C, mas não à temperatura ambiente. A concentração da solução de NaOH influencia diretamente na taxa de ganho de resistência final, uma vez que afeta a fração de dissolução da escória (ALTAN; ERDOĞAN, 2012).

No contexto de processamento, além da natureza altamente corrosiva das soluções de hidróxido concentradas, deve-se considerar sua viscosidade e o calor liberado durante a dissolução dos compostos. Bezerra (2013) afirma que um maior teor desse ativador pode apresentar uma maior formação de produtos ocasionando pequena diminuição na porosidade do produto final (BEZERRA *et al.*, 2013; GAO; YU; BROUWERS, 2015; PROVIS; BERNAL, 2014b).

Em valores de pH > 12, o principal controlador do tempo de pega e atribuição de forças mecânicas, é o tipo de ânion presente na solução ativadora. Esse ânion pode reagir com os íons dissolvidos do precursor gerando produtos de hidratação estáveis (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PUERTAS, 2003). Em soluções altamente concentradas, que geralmente formam produtos amorfos, as espécies iônicas não são totalmente hidratadas (DUXSON *et al.*, 2007). Íons de carbonato podem estender o tempo de pega e diminuir a resistência mecânica nas primeiras idades devido ao pH mais baixo da solução e à formação inicial de carbonato de sódio-cálcio (YIP *et al.*, 2008). Os ânions exercem um papel determinante nas características mineralógicas e microestruturais dos materiais sintetizados (F. PACHECO-TORGAL; C. LEONELLI; CHINDAPRASIRT, 2015).

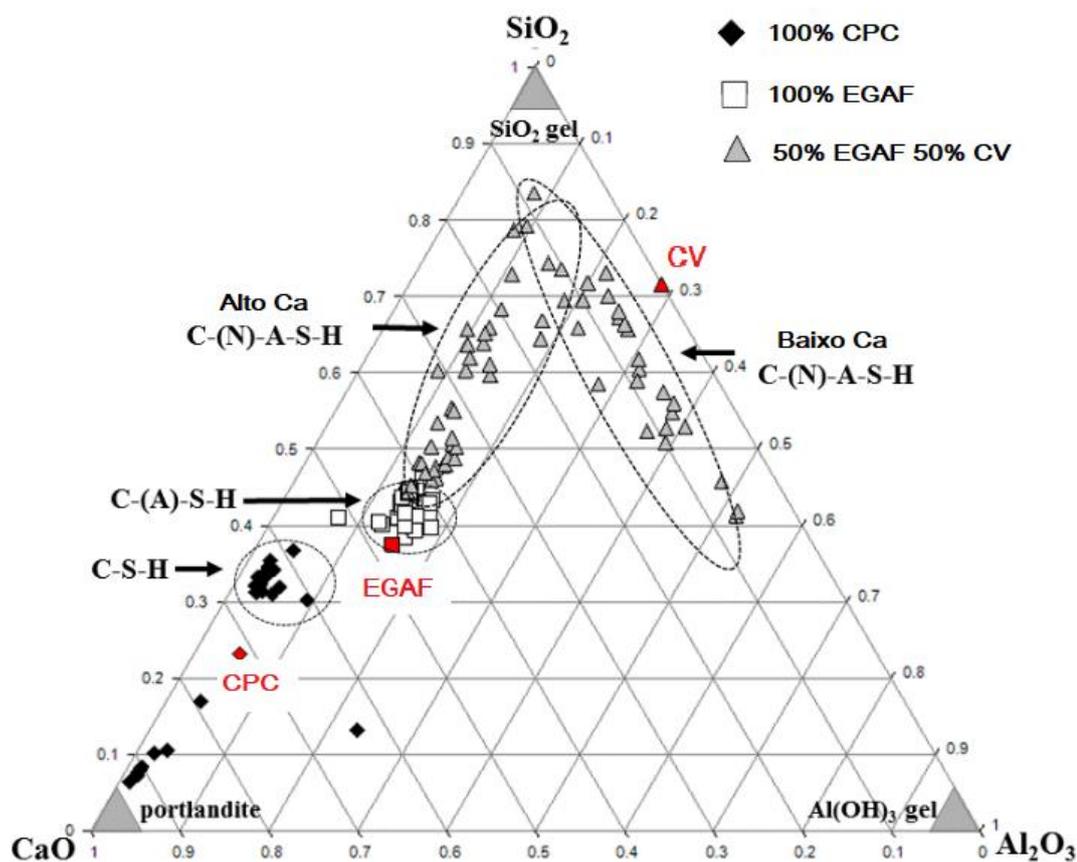
Afim de se obter condições ideais de propriedades mecânicas finais, bem como trabalhabilidade e tempo de pega alguns autores relatam o uso concomitante de ativadores (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PUERTAS, 2003; KHAN; SARKER, 2020; PALOMO; GRUTZECK; BLANCO, 1999). A mistura de silicato de sódio e hidróxido de sódio tem se mostrado eficiente no processo de ativação alcalina e essa mistura pode ser ajustada em função do produto desejado (GAO *et al.*, 2017; KHAN; SARKER, 2020). As propriedades do estado fresco das misturas MAA são dependentes da concentração do ativador alcalino. O tempo de efluxo e absorção de água melhoram ligeiramente com o aumento dos conteúdos de hidróxido de sódio e silicato de sódio (TUYAN; ZHANG; NEHDI, 2020).

2.2.3 Precusores

As características e composição dos precusores conforme a variação química determinam os produtos de reação da álcali-ativação, como tratado na seção 2.2.1, a microestrutura de cada fase formada e a estabilidade do produto final. A maior diferença entre esses aluminossilicatos é a presença do cálcio, dentre as matérias-primas mais abordadas na literatura geralmente as escórias de alto forno (EAF) exemplifica estudos de MAA de alto Ca, e as cinzas volantes (CV) e o metacaulim (MC) estão associados aos geopolímeros (baixo Ca) (DAVIDOVITS, 2011; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; YIP; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005).

A microestrutura e durabilidade de MAA contendo escória granulada de alto forno (EGAF) e CV foram comparadas ao CP por Van Deventer *et al.* (2014) afim de se obter parâmetros-chave para uma padronização. O produto de hidratação desses materiais de acordo com a composição química dos precusores, usando mesmo ativador, está representado no diagrama da Figura 5 (VAN DEVENTER *et al.*, 2014).

Figura 5 - Gráfico pseudo-ternário de composições de MAA e CP e seus produtos de hidratação.



Fonte: Adaptado de Van Deventer *et al.* (2014).

Embora existam diferenças inertes às propriedades de dissolução e composição de fases entre os reagentes (MC, EGAF, CV) e seus produtos, é observado ausência de ordem a longo alcance e a mesma ligação de silício e alumínio no ligante de fase de gel presente em ambos sistemas (DUXSON *et al.*, 2007; JUENGER *et al.*, 2011). Fletcher *et al.* (2005) testou formulações com razões $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ variando de 0,5 a 300 e verificou que todas solidificaram a temperatura ambiente, porém combinações contendo $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ente 2 e 300 analisadas em DRX exibiram características de geopolímeros amorfo, enquanto as composições com altos teores de alumina não identificou-se tais aspectos e apresentaram menor resistência (FLETCHER *et al.*, 2005; OZER; SOYER-UZUN, 2015).

As escórias derivam da indústria siderúrgica e sua composição varia de acordo com os diferentes processos metalúrgicos, minérios envolvidos e operação de forno. A EGAF é mais utilizada por comumente possuir natureza amorfa, que favorece a reatividade, em contrapartida, se for proveniente de um resfriamento lento tende a ser cristalina e pouco reativa. A composição química pode geralmente ser descrita pelo sistema quaternário $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, incluindo ocasionalmente manganês, enxofre e titânio, dependendo do minério de ferro utilizado (CAIJUN SHI, 2006; PALOMO *et al.*, 2014; PROVIS; BERNAL, 2014b). A atividade aglomerante das escórias pode ser mantida por módulos químicos de basicidade e coeficiente de qualidade, nesse contexto algumas publicações investigam métodos de estimar a atividade hidráulica das escórias correlacionadas a obtenção de melhores resistências mecânicas (F. PACHECO-TORGAL; C. LEONELLI; CHINDAPRASIRT, 2015; WANG; SCRIVENER; PRATT, 1994).

Wang (2005) destaca que outro fator determinante na atribuição da reatividade hidráulica das EGAF é o tamanho das partículas. A reatividade cresce com o aumento da finura e superfície de contato. Partículas maiores que $20\mu\text{m}$ reagem lentamente, e partículas menores que $5\mu\text{m}$ desempenham um importante papel na hidratação da escória. No ganho de resistência mecânica é considerado crucial que as partículas possuam frações até $20\mu\text{m}$. Para uma substituição efetiva do clínquer de forma sustentável o autor explica que o processamento da EGAF deve ser na ordem $5\mu\text{m}$, entretanto as tecnologias utilizadas não conseguem atingir esse objetivo por justificativas econômicas (DUXSON; PROVIS, 2008; WANG; TRETTIN; RUDERT, 2005).

As cinzas volantes são um subproduto industrial gerado em usinas de energia a vapor, consiste em restos de argila, areia e matéria orgânica presentes no carvão que saem pela fornalha durante a combustão, podem ser formadas de cinzas grossas (conhecidas como cinza de fundo) e partículas muito finas transportadas pela fumaça e retida em filtros, conhecidas como cinzas volantes. Esses compostos são resfriados rapidamente pelo ar produzindo partículas pequenas de característica vítrea e esférica. Consistem principalmente de fase vítrea e algumas (minoria) fases cristalinas. A composição das CV é bastante variável com influência tanto das impurezas do carvão quanto do processo de incineração. Quando esse material possui baixo teor de Ca são designadas como cinza volante tipo F, e são amplamente utilizadas na síntese de geopolímeros (JOHN L. PROVIS AND JANNIE S. J. VAN DEVENTER, 2009; PALOMO *et al.*, 2014).

Fernández-Jiménez e Palomo (2003) caracterizaram cinzas volantes analisando seu potencial de reatividade para MAA e determinaram as principais características para se obter um material com ótimas propriedades de ligação:

- material não queimado <5%,
- teor de Fe_2O_3 <10%,
- baixo teor de CaO,
- sílica reativa entre 40-50%,
- entre 80-90% das partículas com tamanho inferior a $40\mu\text{m}$,
- alto teor de fase vítrea.

O metacaulim é proveniente da calcinação de argilas contendo caulim, composto principalmente por SiO_2 e Al_2O_3 . O tamanho das partículas pode variar de 0,5 a $20\mu\text{m}$, considerado uma pozolana altamente reativa (CAIJUN SHI, 2006). Ao ativar o MC com diferentes soluções alcalinas Duxson (2008) observou apenas uma pequena mudança nas taxas de incorporação de alumínio indicando alta disponibilidade desse elemento (DUXSON; PROVIS, 2008). A adição de uma quantidade moderada de fonte de Ca em um sistema de MC pode melhorar as propriedades mecânicas da matriz resultante. (YIP; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005)

Como as cinzas volantes e a escória de alto-forno são subprodutos, a disponibilidade diverge regionalmente em quantidade e demanda. Para evitar a dificuldade de acesso a grandes volumes desses materiais, tem-se buscado precursores alternativos que

possam ser alternados na produção de MAA. É possível ampliar a gama de precursores através do uso de cinzas de resíduos agrícolas, resíduos de mineração, resíduos cerâmicos, resíduos de demolição, lodos de tratamento de água etc. As cinzas de casca de arroz por exemplo, apresenta um ótimo desempenho, é considerada como uma pozolana rica sílica com alta reatividade (GERALDO, 2016; MOHD SALAHUDDIN; NORKHAIRUNNISA; MUSTAPHA, 2015; PEREIRA, 2019; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, 2018).

2.2.4 Durabilidade de MAA

Apesar do crescimento nas pesquisas relacionadas aos MAA e dos esforços da comunidade científica quando o assunto é durabilidade ainda restam muitas dúvidas e divergências, não existem modelos de reação e mitigação da RAS em MAA (WANG; NOGUCHI, 2020). Devido as diversas composições possíveis para esse aglomerantes e a falta de padronização das normas e testes específicos as análises baseiam-se em métodos já existentes para CP. A resistência em condições ambientais agressivas é um fator importante a ser verificado antes de sua adoção no mercado como alternativa ao clínquer (ARBI *et al.*, 2016; AWOYERA; ADESINA, 2020; CAIJUN SHI, 2006)

Bernal e Provis (2014) afirmam que a durabilidade dos materiais ativados alcalinamente depende da nano e microestrutura dos produtos de reação formados nesses sistemas, em função dos precursores, natureza e concentração dos ativadores e também da idade do material. Os autores explicam que as diferenças na estrutura de formação dos géis é um dos principais fatores de controle de transporte nos MAA, entretanto diferenças na química de solução dos poros e nos produtos de reação, com diferentes precursores, modificam os mecanismos químicos que podem levar à deterioração desses ligantes quando expostos a ambientes agressivos (BERNAL; PROVIS, 2014; JUENGER *et al.*, 2011).

Publicações sobre difusão de cloreto mostram claramente que MAA são capazes de prevenir a entrada de elementos prejudiciais que provocam a corrosão do aço (BERNAL; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; PROVIS, 2012; BERNAL; PROVIS, 2014; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012; ROY; JIANG; SILSBEE, 2000). Na maioria dos casos investigados, a resistência ao sulfato dos aglomerantes álcali-ativados é melhor do que os sistemas de CP (ZHANG *et al.*, 2017). No entanto essa resistência ao sulfato pode depender do ambiente de exposição, o sulfato de magnésio é mais

agressivo sujeitando à degradação pela descalcificação induzida pelo Mg (ISMAIL *et al.*, 2013).

Em uma investigação das propriedades de engenharia e durabilidade de concretos com base em misturas de EGAF e MC as medições de absorção de água e volume de poro acessível mostram densificação e refinamento dos poros durante a evolução da estrutura do gel com o passar do tempo, embora isso seja menos notável em alto teor de MC (BERNAL; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; PROVIS, 2012). O material apresenta também boa resistência ao fogo e ao congelamento (DAVIDOVITS, 2002; F. PACHECO-TORGAL; C. LEONELLI; CHINDAPRASIRT, 2015).

Mesmo que contenham altos níveis de elementos alcalinos, os MAA demonstram não estar associados à ocorrência da reação álcali-sílica, fato que pode estar relacionado a associação desses elementos alcalinos aos produtos de reação. Contudo, essa explicação exclui o papel crucial do cálcio no desenvolvimento de reação álcali-agregado, o que significa que esse problema deve ser levado em consideração quando forem utilizados precursores à base cálcio (GARCÍA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2007; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012).

2.3 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)

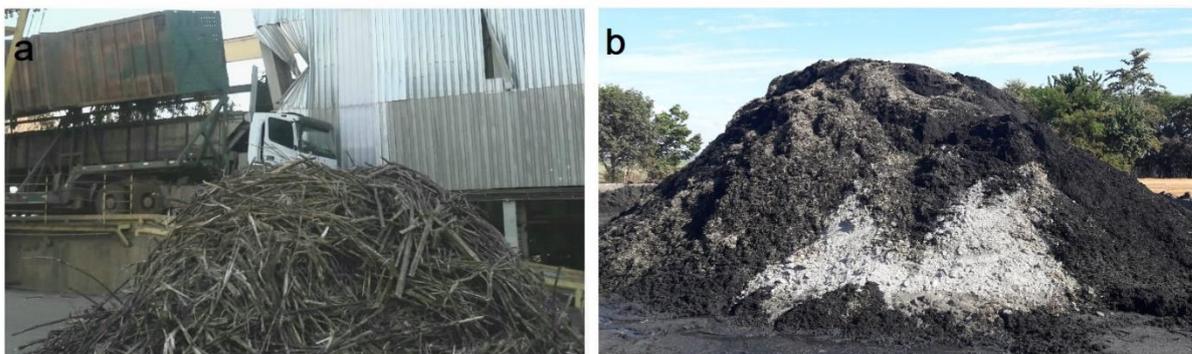
A estimativa da safra brasileira 2020/2021 é que sejam colhidas 665,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, apenas a região sudeste será responsável por 436,4 milhões de toneladas (CONAB, 2020). Essa enorme safra está ligada principalmente ao mercado (interno e externo) da produção de açúcar e etanol. Para produção desses produtos é utilizado o caldo da cana, obtido através da moagem da planta. Após a extração do caldo é gerado um bagaço constituído de fibra (46%), água (50%) e sólidos dissolvidos (4%). A produção de bagaço varia de 240 a 280 kg/t de cana moída. Atualmente esse bagaço é utilizado como biomassa nas próprias usinas para geração de energia elétrica (NOVACANA, 2013).

O setor sucroalcooleiro vem expandindo e fazendo uso do máximo potencial dos produtos e processos. O bagaço (e a palha) da cana possuem alto valor calorífico servem como combustível na geração de bioeletricidade. A caldeira gera vapor que é utilizado para produção de energia térmica aplicada no aquecimento de necessário na produção de açúcar e etanol, além da transformação em energia mecânica que

movimenta máquinas, equipamentos, e turbinas que geram energia elétrica usada na própria usina e vendida para o sistema elétrico. Apesar de avanço no uso dessa biomassa no autoabastecimento de energia existem muitas diferenças tecnológicas entre as unidades produtivas, variando em eficiência e capacidade (TROMBETA; FILHO, 2017; UNICA, 2019).

Após a queima da biomassa de cana-de-açúcar a fuligem gerada no processo é recolhida através de técnicas de lavagem e decantação e, juntamente com a cinza de caldeira, constituem-se em resíduos finais do processo industrial, no qual não há possibilidade de redução. Para cada tonelada de bagaço incinerado no processo de cogeração, são gerados, aproximadamente, 25kg de cinza residual que tem características influenciadas pelas condições e qualidade de queima. A CBCA representa um problema em termos de armazenagem e destinação final, o descarte inadequado pode causar poluição do ar, solo e água, além de ocupar grandes espaços nos pátios das usinas. O bagaço de cana-de-cana de açúcar e a cinza gerada na caldeira podem ser vistas na Figura 6 (CASTRO; MARTINS; BASSETO, 2012; KAWA, 2021; SARAIVA, 2017).

Figura 6 - a) bagaço da cana-de-açúcar; b) cinza do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Acervo pessoal Prof. Dr. Augusto Bezerra

Desde que os procedimentos de queima e moagem sejam adequados é predominante a presença de sílica na composição da CBCA, indicando alta atividade pozolânica. Devido essa propriedade, vários estudos são desenvolvidos visando uma utilização eficaz para esse resíduo. A utilização dessa cinza como substituição parcial no CP apresenta grande potencial e já é amplamente citada na literatura (BEZERRA *et al.*, 2017; CORDEIRO; FILHO; DE ALMEIDA, 2011; LYRA *et al.*, 2021; PEREIRA *et al.*, 2018a). Um estudo aprofundado da CBCA mostra que métodos apropriados para

aplicar forma, tamanho e área superficial das partículas ajuda diretamente na atividade pozolânica, a sílica reativa se combina facilmente com cálcio e água para formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (JAGADESH *et al.*, 2015).

De acordo com Ganesan (2007) o CP pode ser substituído com até 20% de CBCA sem qualquer efeito adverso das características desejáveis ao concreto e ainda exibe vantagens como ganho elevado de resistência nas primeiras idades, redução na permeabilidade à água e boa resistência à permeação e difusão de cloreto (FAIRBAIRN *et al.*, 2010; GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007). Quando analisada no âmbito ambiental e econômico, a substituição parcial de CBCA no cimento para construção de 600 casas de habitação social pode apresentar uma redução na emissão de CO₂ de até 410,9t, além de uma economia de aproximadamente R\$129.484,87 (REZENDE *et al.*, 2017).

A CBCA como pozolana e MCS vem sendo estudado já a algum tempo. O uso desse material é possível devido a quantidade significativa de sílica reativa na sua constituição. Alguns resultados indicam que, em geral, concretos a base de CBCA podem apresentar melhoras na durabilidade, nas propriedades mecânicas e no comportamento reológico (trabalhabilidade) (BARBOSA; CORDEIRO, 2021; CASTALDELLI *et al.*, 2013; FAIRBAIRN *et al.*, 2010; FILHO; MARTINS, 2017; TORRES AGREDO *et al.*, 2014).

Ligantes AA com base em misturas de escória e CBCA foram preparados e avaliados quanto sua microestrutura, propriedades físico-químicas e desenvolvimento de resistência mecânica por Castadelli (2013). Como resultado, o estudo mostrou um importante grau de reação da CBCA na formação das matrizes de gel, uma considerável contribuição na resistência a compressão e diminuição da porosidade, demonstrando a viabilidade do uso de misturas de EGAF e CBCA para produção de MAA. França (2023) concluiu que a CBCA é um precursor viável para a produção de MAA, e pode contribuir para sustentabilidade e inovação em materiais de construção.

Saraiva (2017) avaliou a inibição da ocorrência de RAA substituindo em 10, 20 e 30% de CP por CBCA e observou que os compósitos de basalto com cinza moída atenderam os limites de expansão de norma nas substituições de 20 e 30% (SARAIVA, 2017). Recentemente, novos resultados de avaliação de expansão por

barras de argamassa também demonstraram uma diminuição de 20 e 40% na expansão de RAS para amostras de cimento incorporando 10 e 40% de CBCA, respectivamente. A melhora no comportamento dos espécimes avaliados pode estar relacionada ao processo de absorção e diluição dos álcalis, diminuindo a razão CaO/SiO (ABBAS *et al.*, 2020).

A partir do exposto acima, o uso da CBCA demonstra ser viável tanto para uso como matéria-prima parcial para MAA, como inibidor de RAA, fatos que por si só garantem empregabilidade do material proporcionando diminuição do dano ambiental causado nos aterros. Portanto, o presente trabalho investigará a ocorrência, inibição, ou mitigação da RAS em MAA contendo diferentes proporções de CBCA como precursor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

É importante salientar que este trabalho investiga a ocorrência e mitigação da reação álcali-agregado em materiais álcali-ativados com uso de CBCA em sistema ternário de precursores, contudo em virtude da ausência de normas técnicas específicas para esses aglomerantes será baseado e discutido em comparações e normativas referidas ao CP. Além da literatura abrangente será levado em consideração os resultados de Sousa (2021) que tem como título “Material álcali-ativado em sistema ternário com o uso de bagaço de cana-de-açúcar” e avaliou as propriedades físicas, químicas e térmicas de pastas AA.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

Cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V) foi utilizado como referência na confecção das argamassas. Segundo a NBR 5733 (ABNT,1991). a composição deste material possui teores entre 95 e 100% de clínquer e sulfato de cálcio, com a adição de até 5% de material carbonático.

3.1.2 Precursores

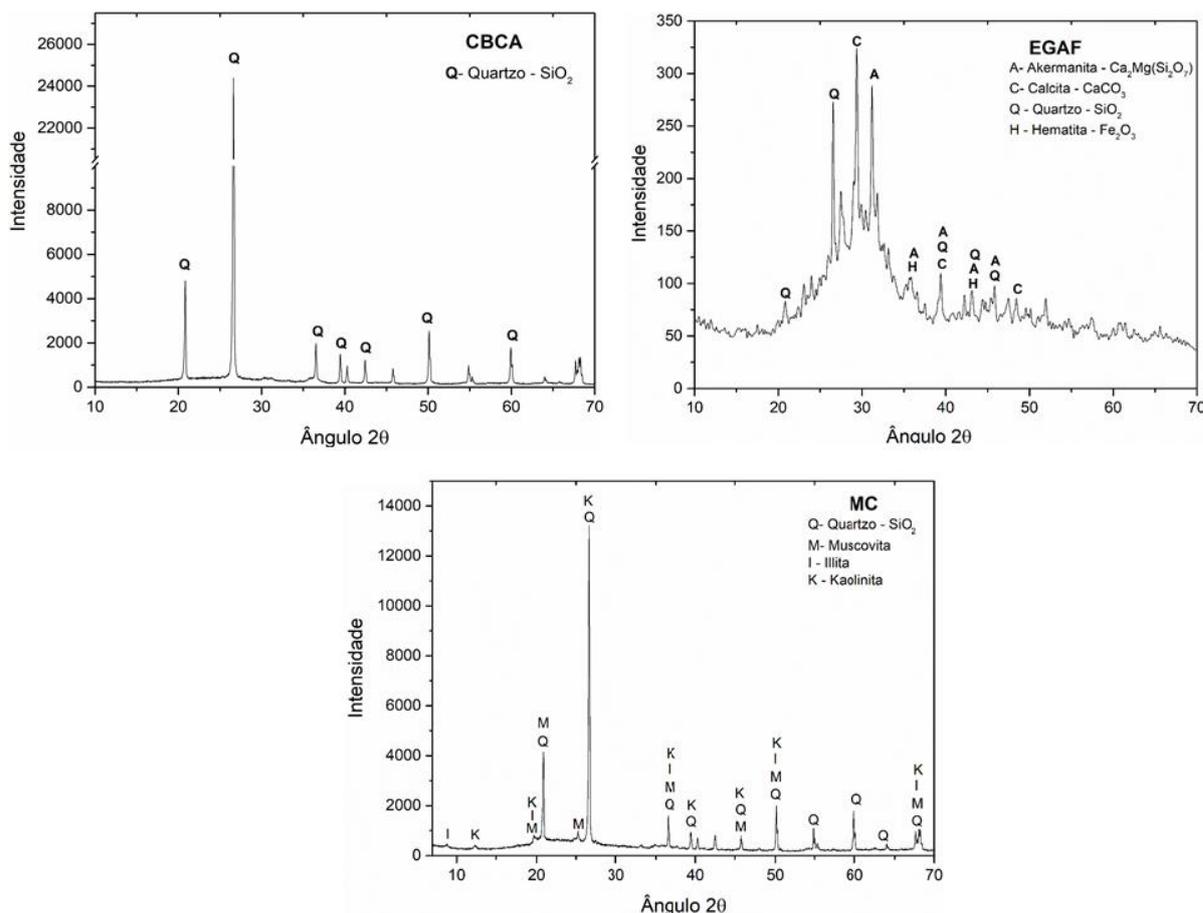
Os precursores sólidos utilizados são:

- Escória granulada de auto forno (EGAF) - Fornecida pela concreteira Supermix, Belo Horizonte - MG;
- Metacaulim (MC) - Fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil, Jundiaí - SP;

- Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) – Fornecida pela empresa Bevap Bioenergia, João Pinheiro – MG.

Os precursores foram caracterizados por Sousa (2021) e a Figura 7 mostra os resultados de DRX obtidos para a CBCA, EGAF e MC.

Figura 7 - DRX precursores



Fonte: (SOUSA, 2021)

Em relação à cristalinidade dos precursores, percebe-se que a EGAF apresenta baixa cristalinidade devido a presença de um halo amorfo, enquanto o MC e a CBCA apresentam picos significativos. A cristalinidade é um fator crucial para a reatividade destes precursores, sendo menos reativos aqueles que apresentam maior teor de fases cristalinas. A EGAF apresenta picos relacionados à presença de calcita (COD 969009668), akermanita (COD 969006942), hematita (COD 9002161) e quartzo (COD 969013322). O metacaulim apresenta como principais fases mineralógicas illita (COD 969013719), kaolinita (COD 969009235) e muscovita (COD 969006330). Já a CBCA apresenta como principal fase cristalina o quartzo (COD 969013322) que pode estar

associado a sílica advinda da colheita da cinza na lavoura (Cordeiro and Kurtis, 2017; Soares *et al.*, 2014).

3.1.3 Agregado

Para a produção das argamassas desta pesquisa foi utilizado como agregado um pó de pedra (partículas até 4,8mm) de basalto (Figura 8) fornecido pela Pedreira Beira Rio localizada em Uberaba – MG.

Figura 8 - Pó de pedra de basalto utilizado como agregado



Fonte: Próprio Autor

3.1.4 Água

Foi utilizado água destilada, obtida com um destilador Marte MB-1005, na produção das argamassas e nas soluções de hidróxido de sódio. Em um dos tanques de cura térmica é utilizado água da rede distribuição municipal de Belo Horizonte.

3.1.5 Ativadores alcalinos

Como ativador alcalino utiliza-se Hidróxido de Sódio P.A., comercializado em micropérolas pela Química Sulfal Ltda com escala de pureza de 99% e peso molar 40g. Este reagente foi dissolvido em água destilada na concentração de 8M.

Para adequar as propriedades dos MAA, além do NaOH, é utilizado silicato de sódio (SS) para ativação alcalina. O Silicato é fornecido pela Diatom LTDA, e sua composição é descrita na Tabela 2.

Tabela 1 - Especificações do silicato de sódio.

Silicato de sódio alcalino	
Na₂O (%)	14,86
SiO₂ (%)	32,07
H₂O (%)	52,16
SiO₂/Na₂O	2,22
Densidade (g/cm³)	1,57
Viscosidade à 25 °	1000

Fonte: Diatom.

3.2 Caracterização

3.2.1 Caracterização do agregado

Para realizar ensaios de verificação de expansibilidade é necessário que o agregado utilizado seja considerado reativo e para tanto deve ser caracterizado e classificado quanto a RAA como potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

A ABNT NBR 15577-3 trata da análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis, não estabelece técnicas de análise petrográfica, entretanto sugere o reconhecimento das propriedades características de rochas e minerais afim de determinar os constituintes da amostra de agregado.

A primeira etapa da pesquisa consistiu na lavagem do agregado para retirada de materiais finos remanescente da armazenagem e transporte, em seguida submetido a secagem em estufa FANEM, modelo 515 a $100 \pm 5^\circ$ C por 24h. Para a classificação do agregado foram realizados os seguintes ensaios:

- Granulometria em sistema de peneiras,
- Massa específica,
- Análise da composição mineralógica por difração de raios X (DRX),
- Composição química por fluorescência de raios X (FRX),
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A identificação dos picos do difratograma foi efetuada com uso do software Match 3! da empresa Crystal Impact, com a utilização do banco de dados cristalográfico aberto (COD).

3.2.2 Caracterização dos precursores

A composição química das matérias-primas foi determinada por FRX pelo espectrômetro de fluorescência da marca Philips/Panalytical utilizando pastilhas prensadas.

3.3 Métodos

3.3.1 Dosagem das argamassas

A proporção dos materiais utilizados para produção das argamassas analisadas neste estudo está apresentada na Tabela 3. CBCA, MC e EGAF foram utilizados como precursores para as argamassas. As argamassas CBCA0, CBCA15, CBCA30 e CBCA45 referem-se ao teor de incorporação de CBCA em cada material. As argamassas EGAF100 e MC100 apresentam como precursores exclusivos, a EGAF e o MC respectivamente. Além disso, uma argamassa de referência composta por cimento Portland foi utilizada para comparação dos resultados e foi moldada de acordo com as recomendações da norma NBR 15557-4 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018).

Tabela 2 - Dosagem das amostras das pastas AA (%).

Argamassa	Precursor				Ativador			Agregado
	CP-V (g)	EGAF (g)	MC (g)	CBCA (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	NaOH (g)	Água (g)	Basalto (g)
REF	440	-	-	-	-	-	206.8	990
CBCA0	-	242	198	-	88	211.2	-	990
CBCA15	-	220	154	66	88	211.2	-	990
CBCA30	-	198	110	132	88	211.2	-	990
CBCA45	-	154	88	198	88	220	-	990
EGAF100	-	440	-	-	88	211.2	-	990
MC100	-	-	440	-	88	211.2	-	990

Fonte: Próprio autor

As argamassas álcali-ativadas apresentam a relação solução ativadora/precursor igual a 0,68, com exceção da argamassa CBCA45 que demandou mais solução ativadora para apresentar a mesma trabalhabilidade das argamassas anteriores. A argamassa CBCA45 apresenta a relação solução ativadora/precursor igual a 0,70.

Além disso, a solução de hidróxido de sódio possui de 8mol/L para concentração de 6,67mol/L devido a necessidade de adição de água para trabalhabilidade da mistura, e a relação solução hidróxido de sódio/silicato de sódio foi fixada em 2,4 para todas as argamassas, com exceção da SCBA45 em que esta relação é igual a 2,5

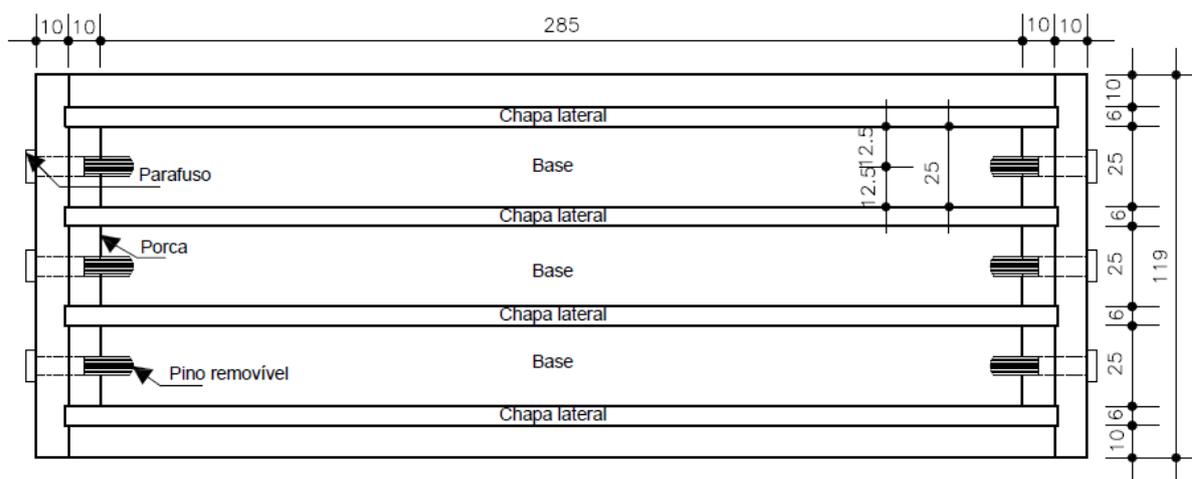
A relação precursores:agregado foi fixada em 1:2,25 conforme estabelece a norma ASTM C1260-21 e NBR 15557-4 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018; ASTM, 2021).

Os precursores foram misturados e homogeneizados com o agregado durante 15 segundos por meio de um misturador mecânico de giro planetário. Posteriormente, os ativadores previamente misturados foram adicionados aos precursores e agregado e a homogeneização do material ocorreu por 3 minutos em velocidade baixa (124 rpm).

A argamassa produzida foi vertida em moldes de 25mmx25mmx285mm, representado na Figura 13, protegida com uma placa de vidro e submetida a cura térmica à 40°C para a consolidação das reações de geopolimerização no período de 24 horas. Após as 24 horas de cura inicial, os corpos de prova prismáticos foram desmoldados e imersos em tanque termorregulador à 80°C contendo água para mais 24 horas de cura.

Posteriormente, 3 dos 6 corpos de prova produzidos para cada formulação foram retirados do tanque de água e imersos em tanque termorregulador, Figura 14, à 80°C contendo uma solução de hidróxido de sódio com concentração de 1 mol/L. Os outros 3 corpos de prova permaneceram no tanque de água à 80°C para as medições de expansibilidade do ensaio de reação álcali-sílica conforme prevê a norma NBR 15557-4 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018).

Figura 9 - Molde visto em planta (mm).



Fonte: Próprio autor.

3.3.2 Reação álcali-sílica (RAS)

A avaliação da expansão álcali-sílica foi realizada nas barras de argamassas pelo método acelerado retratado na NBR 15577-4 (ABNT, 2018), muito similar a ASTM C1260. Esta norma estabelece que as barras estejam totalmente imersas em água ou solução de NaOH 1M, assegurando que o líquido esteja em contato com toda a superfície. As chapas dos moldes devem ser capazes de fixar adequadamente um pino nas extremidades das barras de forma tal que seus eixos principais coincidam com o eixo principal da barra. Após o desmolde, as barras previamente identificadas, são imergidas em tanques termorreguladores com água a 80°C, essa imersão deve ocorrer com cuidado para que não encostem no tanque e entre si, posicionadas verticalmente e não apoiadas pelos pinos.

A leitura das medidas é realizada com um relógio comparador de comprimento digital capaz de medir variações totais de até 12mm. As medições são realizadas utilizando uma barra-padrão de aço com extremidades polidas, essa barra serve de parâmetro para verificação do comparador de comprimento. Os tanques de banho termorregulador e o relógio de leitura podem ser vistos na Figura 10.

Figura 10 - Tanque térmico e medidor.



Fonte: Próprio autor.

Para realização da leitura das medidas das barras de argamassa a barra-padrão foi medida e fixada como padrão (0,000) assim, as medidas subsequentes são variações em relação a barra-padrão. As barras de argamassa foram retiradas do tanque e medidas no comparador uma de cada vez, esse processo para cada barra foi realizado em um período total de 15s a partir da remoção da barra do tanque.

A primeira leitura foi realizada 24h após imersão em água, cura inicial. Em seguida 3 barras de cada formulação foram movidas para o tanque contendo solução alcalina e medidas, nas idades de 16 e 30 dias, conforme a norma, contados a partir da moldagem com leituras intermediárias em cada período. A variação de comprimento de cada barra por idade é representada pela diferença entre seu comprimento na idade específica e comprimento inicial, expressa em porcentagem do comprimento total.

3.3.3 Resistência à flexão

Após a idade de 30 dias as barras de argamassas foram retiradas do banho termorregulador para caracterização, e submetidas a ensaio de resistência à flexão de acordo com a norma NBR 12142 (Associação Brasileira de Normas Técnicas

(ABNT), 2010), adaptada aos corpos prismáticos de 25mmx25mmx285mm. O ensaio foi realizado por meio do Equipamento Universal de Ensaio da marca EMIC e os softwares TESC e Vmaq. A velocidade de carregamento 50N/s foi utilizada de acordo com as recomendações da norma.

3.3.4 Resistência à compressão

Após o rompimento das barras na flexão, as partes restantes foram serradas em cubos de aresta com 25mm e submetidos ao ensaio de resistência a compressão.

A resistência à compressão dos corpos de prova após o ensaio de reação álcali-sílica foi determinada por meio do Equipamento Universal de Ensaio da marca EMIC e os softwares TESC e Vmaq. A velocidade de carregamento equivalente a (0,25+0,05) MPa/s foi utilizada de acordo com as recomendações da norma NBR 7215 (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2019), que foi adaptada para corpos de prova cúbicos de 25x25x25mm.

3.3.5 Absorção de água

Com os cubos de cada formulação foi realizado o ensaio de absorção de água, baseado na NBR 9778 (ABNT, 2009), eliminando a etapa de fervura e temperatura de secagem reduzida de 100°C para 50°C ± 5°C, essa mudança teve intuito de manter a integridade das amostras e evitar que novas reações químicas fossem induzidas termicamente. Nesse ensaio a massa (g) dos cubos é anotada em três momentos: após secagem (m_{seca}), após saturação dos poros em água (m_{sat}), e com o material saturado e imerso em água (m_{im}). Os valores obtidos são substituídos nas equações mostradas de (1) a (3), em que a é a absorção (em %), Iv é a porosidade, ou o índice de vazios (%) e d é a massa específica real, densidade (g/cm³).

$$a = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100\% \quad (1)$$

$$Iv = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{sat} - m_{im}} \times 100\% \quad (2)$$

$$d = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{im}} \quad (3)$$

3.3.6 MEV após RAS

A análise da morfologia das argamassas após ataque ácido foi realizada por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) de baixo vácuo da marca Hitachi, modelo TM 3000, com detectores de elétrons retroespalhados e tensão aceleração de elétrons de 15kV foram utilizados.

3.3.7 Ataque ácido

O ensaio de resistência ao ataque ácido foi realizado de maneira semelhante ao procedimento apresentado por (Magalhães *et al.*, 2020). Após o encerramento do ensaio de reação álcali-sílica, os corpos de prova foram limpos, secos e submetidos ao processo de aferição de massa para posterior imersão em solução ácida. O volume da solução ácida corresponde a quatro vezes o volume total dos corpos-de-prova. A concentração utilizada para as soluções foi de 5% de ácido sulfúrico (v/v). Após os 7 dias de imersão, os corpos de prova foram lavados, secos e pesados novamente para determinação da perda de massa.

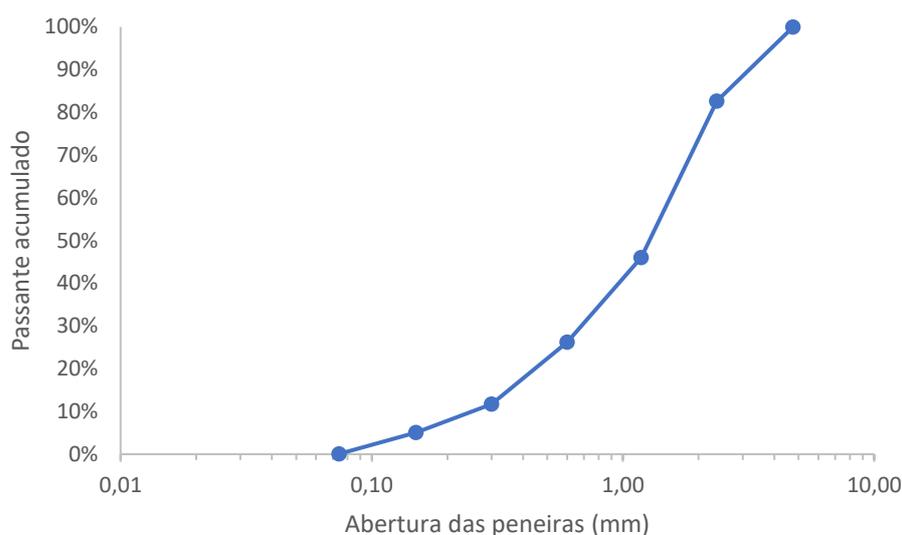
4. RESULTADOS

4.1 Caracterizações

4.1.1 Caracterização do Agregado

Foram pesadas 2 amostras de 300g do pó de pedra utilizado como agregado, cada amostra foi passada em uma sequência de peneiras com aberturas variando de 0,15 a 4,75mm. A Figura 11 mostra a curva granulométrica obtida a partir da média do resultado dos dois peneiramentos. A curva demonstra que o pó de pedra é apropriado em termos de granulometria para agregado miúdo utilizado em argamassas, sendo 90% das partículas menores que 2,36mm 50% menores que 1,18mm, e 10% menores que 0,3mm.

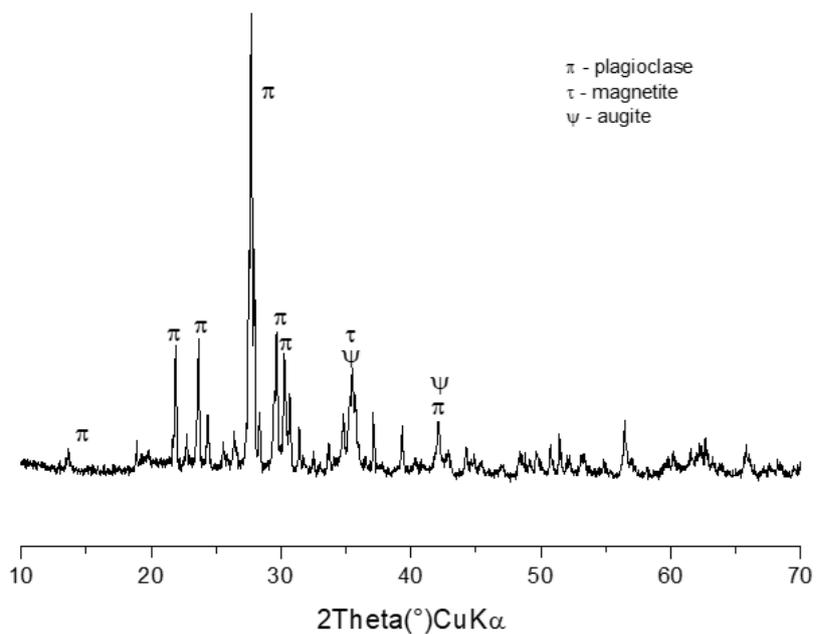
Figura 11- Curva granulométrica agregado



Fonte: Próprio Autor

Além disso, para determinação da reatividade do agregado foram realizados ensaios de DRX e FRX, e MEV. A Figura 12 apresenta a composição mineralógica do basalto. Como pode ser visto, as principais fases mineralógicas do agregado são: plagioclásio (COD 9001030), augita (COD 9001615) e magnetita (COD 9000926).

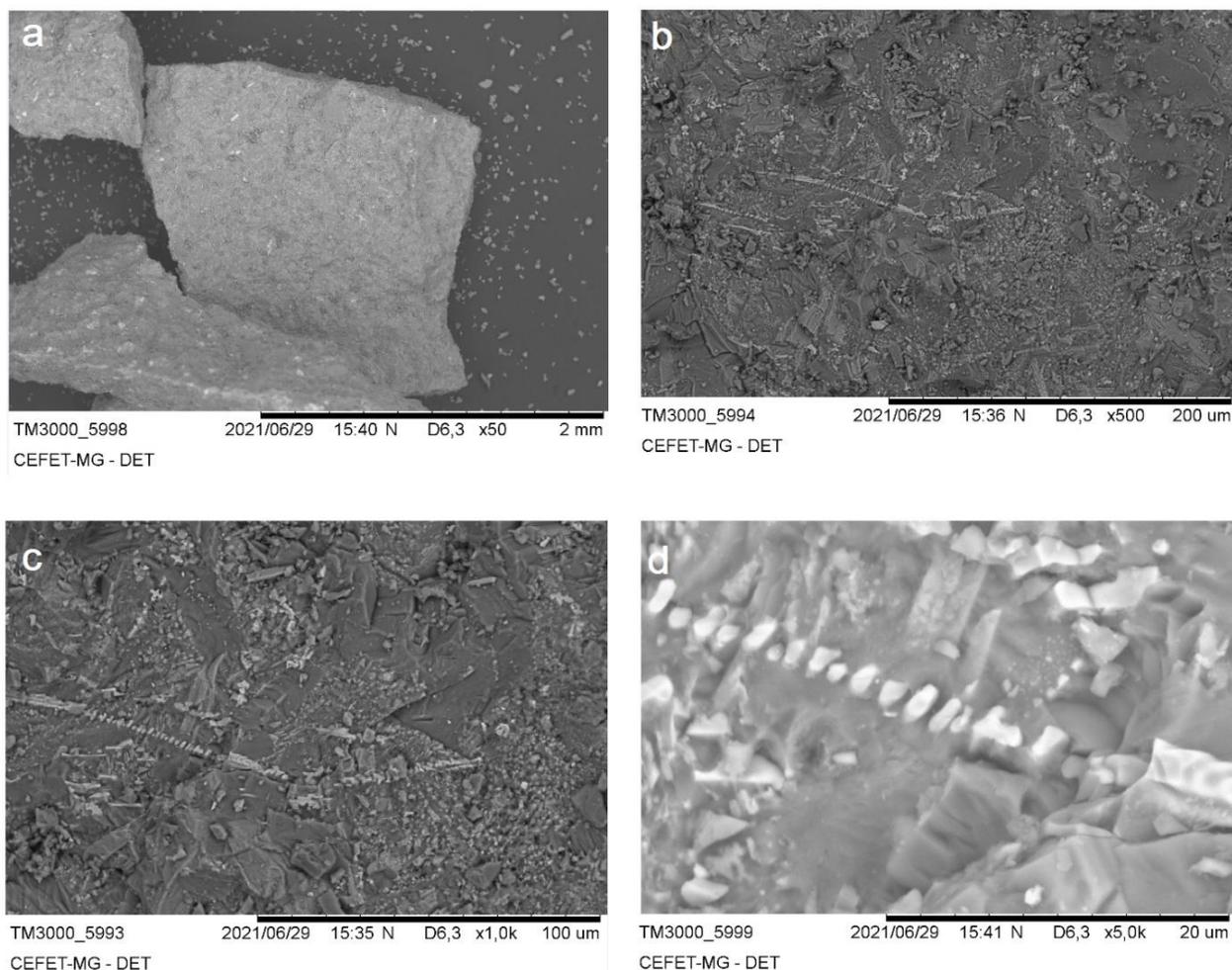
Figura 12- DRX agregado



Fonte: Próprio Autor

A Figura 13 exibe imagens realizadas por microscopia eletrônica de varredura do basalto sem preparação de superfície nas amplitudes de aumento de 50, 500, 1000, e 5000x. O equipamento utilizado utiliza detector de elétrons retroespalhados, imagens demonstram que o material possui granulação fina e compacta com pontos de minerais mais densos.

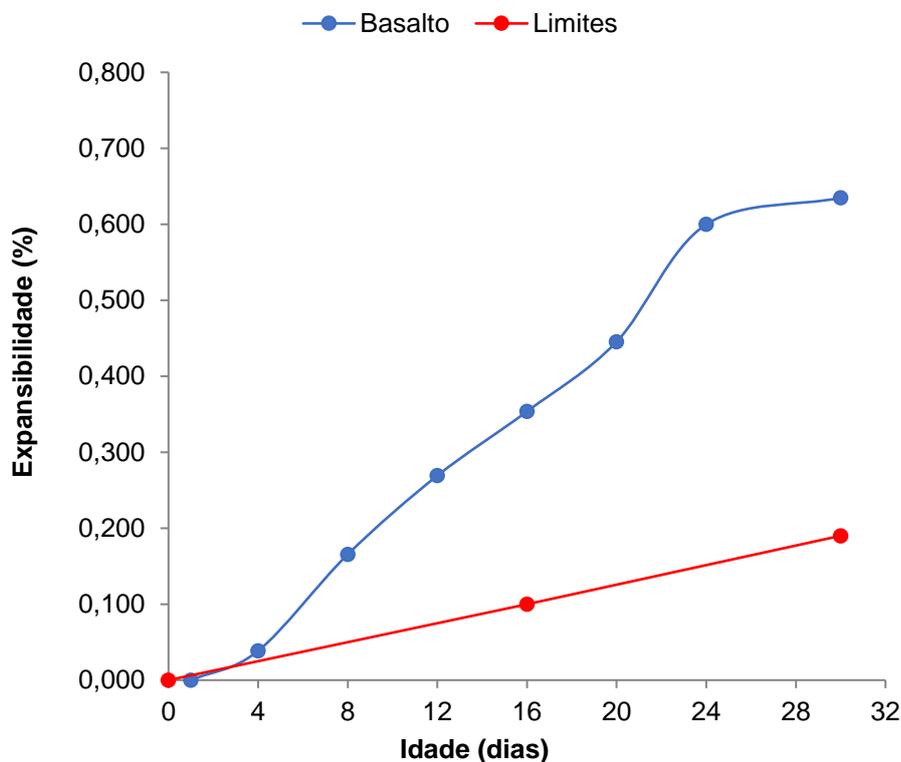
Figura 13- MEV basalto ampliações: a)50x b)500x c)1000x d)5000x



Fonte: Próprio autor.

Por fim, a reatividade do basalto foi avaliada de acordo com a norma NBR 15577-4 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018) e o resultado está apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Expansão basalto



Fonte: Próprio autor.

Como por ser visto na Figura 14, o basalto atinge expansão de 0,635%, valor que excede o limite normativo crítico aos 30 dias de cura (0,19%) e pode ser considerado um agregado reativo.

4.1.2 Caracterização dos Precursores

A fim de homogeneizar as partículas, a CBCA foi moída em moinho planetário por 12 min, tempo definido através de testes anteriores. A composição química dos precursores foi obtida por FRX, demonstrando alta presença de SiO_2 e o Al_2O_3 . A Tabela 1 apresenta a composição química do CP e dos precursores, bem como sua distribuição granulométrica.

Tabela 3 - Composição química dos precursores obtida por FRX (%massa) e distribuição granulométrica.

	CP	EGAF	MC	CBCA
SiO ₂	12.28	35.28	60	65.82
Al ₂ O ₃	2.49	5.41	32.50	13.65
Fe ₂ O ₃	3.72	24.30	1.80	4.53
CaO	63.70	45.85	0.1	2.31
MgO	-	3.00	0.2	1.32
TiO ₂	0.29	-	0.9	0.9
K ₂ O	1.22	-	1.6	1,96
P ₂ O ₅	-	-	-	0.97
Na ₂ O	-	-	0.1	-
SO ₃	3.77	-	-	-
Perda ao fogo	0.56	-	2.6	11.5
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	-	11.08	3.14	8.20
Distribuição granulométrica				
D _M (µm)	18.88	22.14	23.78	27.56
D ₁₀ (µm)	3.04	2.23	3.05	4.11
D ₅₀ (µm)	15.94	16.10	20.06	20.23
D ₉₀ (µm)	39.21	51.50	49.96	64.38

Fonte: Próprio Autor

Em relação aos precursores, percebe-se que o principal óxido componente da CBCA e do MC é o óxido de silício, enquanto o óxido de cálcio é o principal componente da EGAF. O alto teor de silício na CBCA e MC pode ser associado a reações de geopolimerização mais lentas (Duxson *et al.*, 2005), enquanto que o alto teor de cálcio na escória pode ser associado a alta reatividade deste precursor e ganho de resistência mecânica mais rápido (Hung and Chang, 2013; Laskar and Talukdar, 2017). O basalto apresenta o óxido de silício como principal componente, seguido do óxido de ferro e óxido de alumínio.

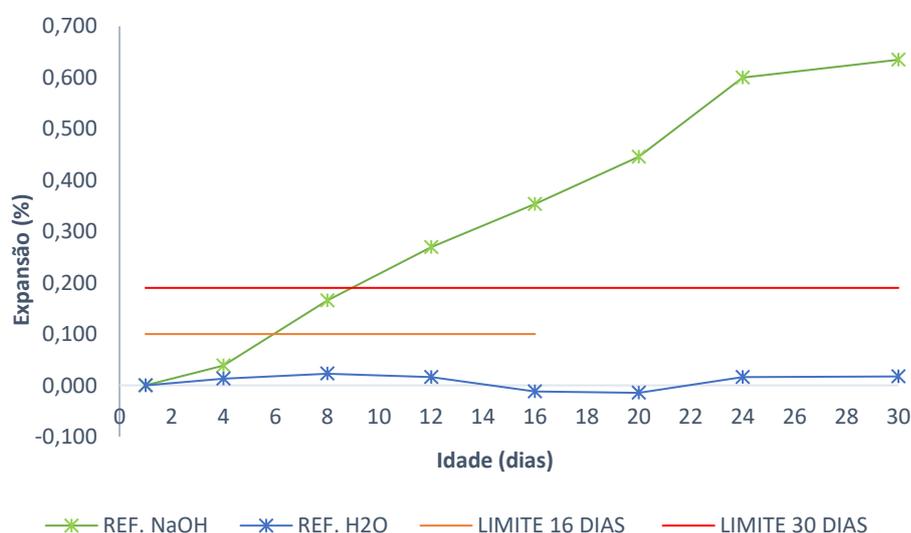
O tamanho médio de partículas dos precursores (EGAF, CBCA e MC) se encontram entre 22,14 e 27,56 µm, e pode ser associado a alta reatividade destes materiais, uma vez que o tamanho de partícula reduzido pode ser associado a alta área superficial e consequentemente a alta reatividade (FRANÇA *et al.*, 2022; Nath and Kumar, 2020).

4.2 Reação álcali-silica

Os resultados de expansão das barras de argamassas estão apresentados nos gráficos das Figuras 15 a 21. As linhas laranja e vermelha representam os limites definidos pela norma de determinação de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, NBR 15777-4 (ABNT, 2018), de 0,10% e 0,19%, aos 16 e 30 dias respectivamente. A linha verde representa os resultados da medição das barras de argamassas curadas em tanque com NaOH, e a linha azul curadas em tanque com água.

A Figura 15 exibe os resultados de expansões das barras de argamassas REF, que curadas em NaOH, apresentaram expansões de 0,354% e 0,635%, ultrapassando os limites normativos, com 16 e 30 dias respectivamente. Aos 6 dias as barras do tanque de NaOH chegaram ao limite de expansão de 0,10%, e de acordo com a tendência da linha, aos 9 dias atingiram 0,19%. Já a argamassa curada em água, expandiu -0,012% aos 16 dias, e 0,018% aos 30 dias, ficando abaixo dos limites.

Figura 15 -Expansão REF

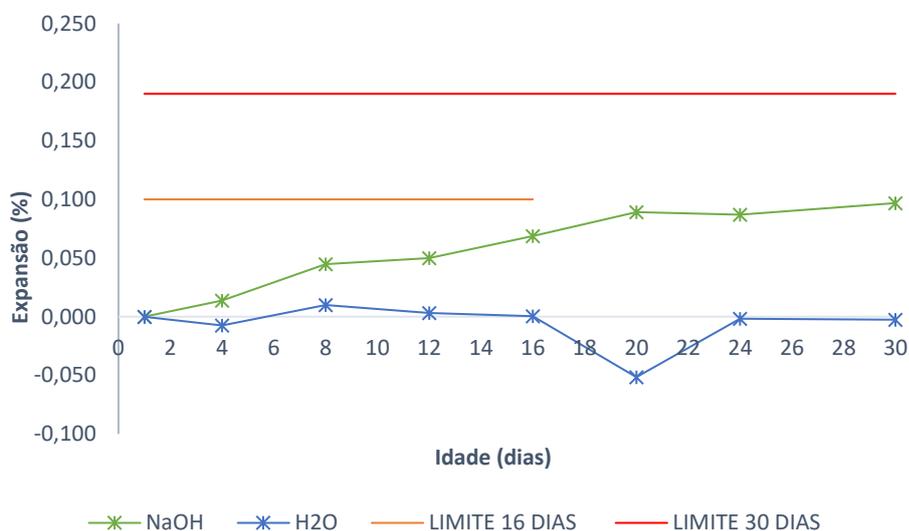


Fonte: Próprio autor.

A Figura 16 exibe os resultados de expansões das barras de argamassas CBCA0, que curadas em tanque com NaOH, apresentaram expansões de 0,069% e 0,097%, com 16 e 30 dias respectivamente. Já a argamassa curada em tanque com água, não

apresentou expansão aos 16 dias, e -0,003% aos 30 dias. As argamassas de ambos os tanques não ultrapassaram os limites normativos.

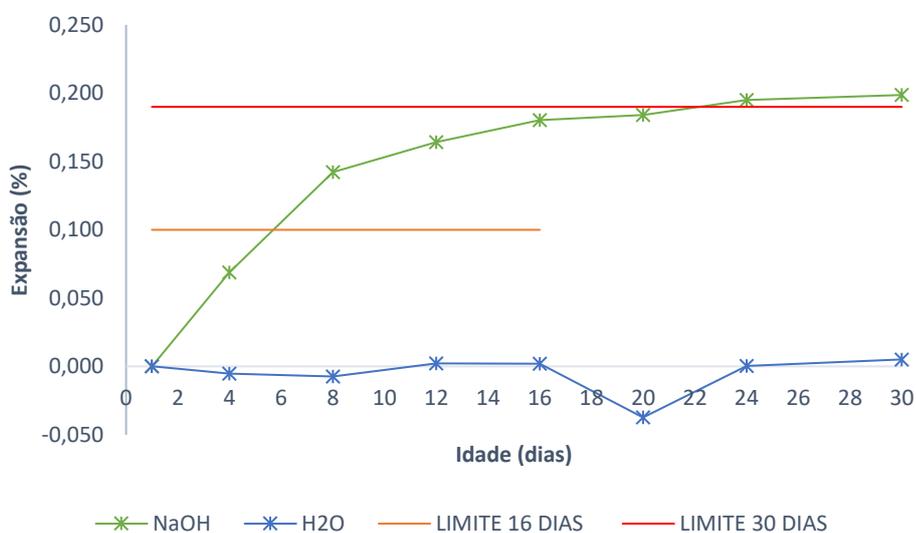
Figura 16 - Expansão CBCA0



Fonte: Próprio autor.

A Figura 17 exibe os resultados de expansões das barras de argamassas CBCA15, que curadas em tanque com NaOH, apresentaram expansões de 0,180% e 0,199%, com 16 e 30 dias respectivamente. Pela tendência da linha, o limite de 0,10% foi atingido aos 5 dias, e 0,19% aos 21 dias. Já a argamassa curada em tanque com água, obteve expansão de 0,002% aos 16 dias, e 0,005% aos 30 dias.

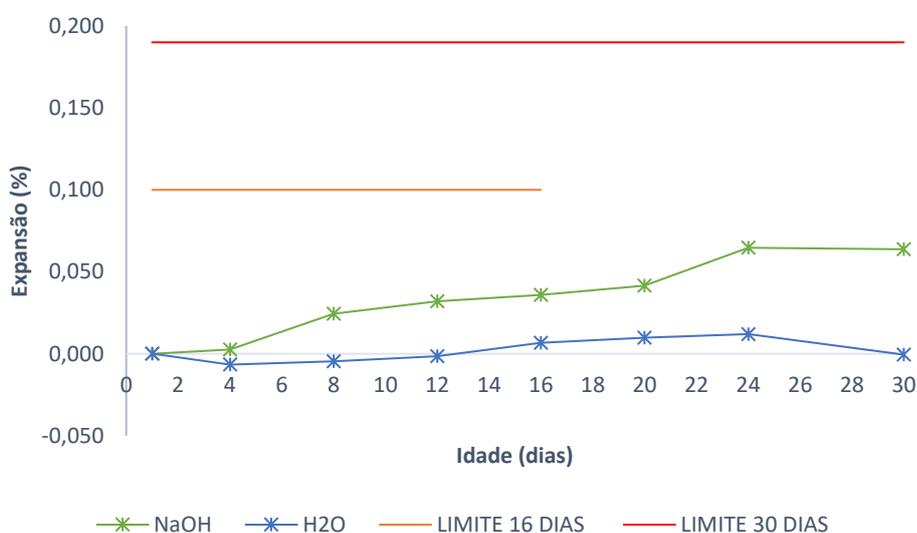
Figura 17 - Expansão CBCA15



Fonte: Próprio autor.

A Figura 18 exibe os resultados de expansões das barras de argamassas CBCA30, que curadas em tanque com NaOH, apresentaram expansões de 0,036% e 0,064%, com 16 e 30 dias respectivamente. Já a argamassa curada em tanque com água, apresentou expansão de 0,003% aos 16 dias, e não apresentou valores de expansão aos 30 dias. As argamassas de ambos os tanques não ultrapassaram os limites normativos.

Figura 18 - Expansão CBCA30

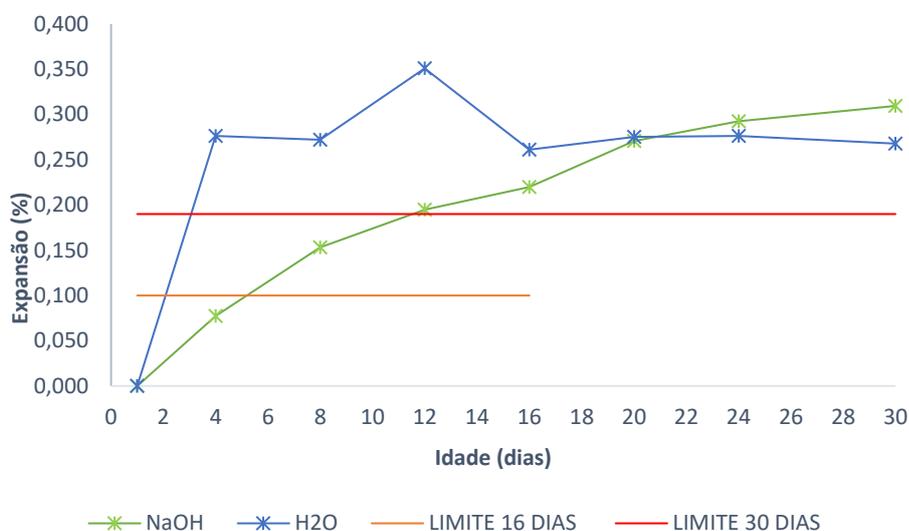


Fonte: Próprio autor.

A Figura 19 exibe os resultados de expansões das barras de argamassas CBCA45, que curadas em NaOH, apresentaram expansões de 0,220% e 0,309%, com 16 e 30 dias respectivamente. Pela tendência da linha, o limite de 0,10% foi atingido aos 5 dias, e 0,19% aos 12 dias.

Já a argamassa curada em água, expandiu 0,261% aos 16 dias, e 0,268% aos 30 dias. Aos 2 dias as chegaram ao limite de expansão de 0,10%, e aos 4 dias já ultrapassaram 0,19%.

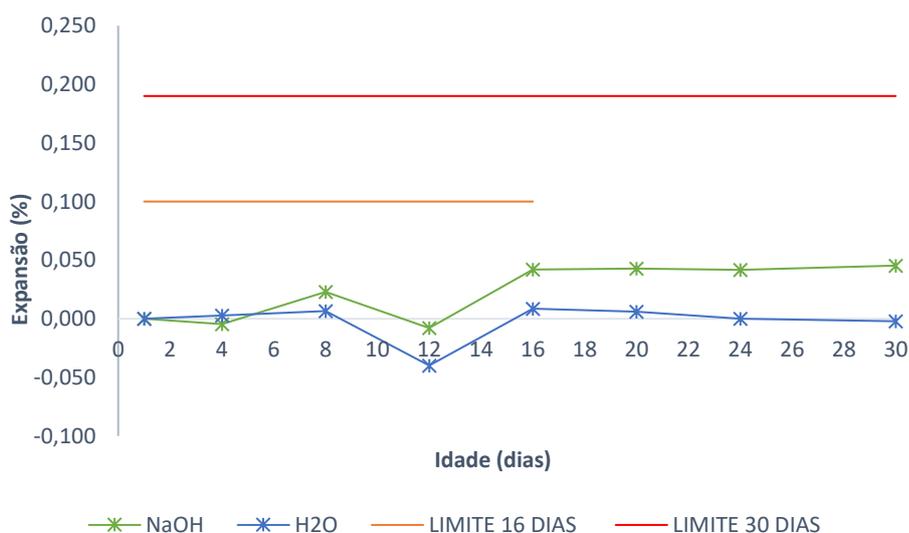
Figura 19 - Expansão CBCA45



Fonte: Próprio autor.

A Figura 20 exibe os resultados de expansões das barras de argamassas EGAF, que curadas em tanque com NaOH, apresentaram expansões de 0,042% e 0,045%, com 16 e 30 dias respectivamente. Já a argamassa curada em tanque com água, apresentou expansão de 0,009% aos 16 dias, e retração de -0,002% aos 30 dias. As argamassas de ambos os tanques não ultrapassaram os limites normativos.

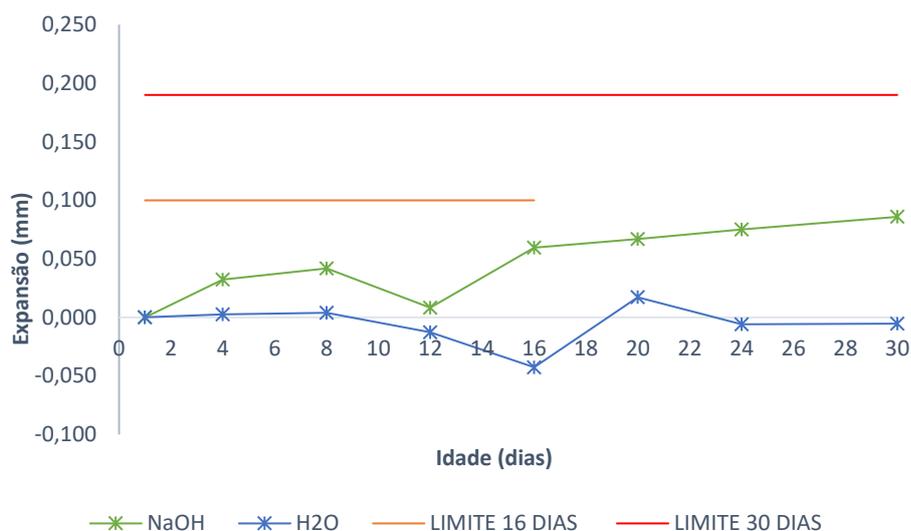
Figura 20 - Expansão EGAF



Fonte: Próprio autor.

A Figura 21 exibe os resultados de expansões das barras de argamassas MC, que curadas em tanque com NaOH, apresentaram expansões de 0,060% e 0,086%, com 16 e 30 dias respectivamente. Já a argamassa curada em tanque com água, apresentou retração de -0,043% aos 16 dias, e -0,005% aos 30 dias. As argamassas de ambos os tanques não ultrapassaram os limites normativos.

Figura 21 - Expansão MC



Fonte: Próprio autor.

As tabelas 4 e 5 apresentam o resumo dos resultados expostos acima:

Tabela 4 - Expansão média barras de argamassa curadas em NaOH.

Idade (dias)	Expansão Média (%)						
	REF	CBCA0	CBCA15	CBCA30	CBCA45	EGAF	MC
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,038	0,014	0,069	0,003	0,077	-0,005	0,032
8	0,166	0,045	0,142	0,024	0,153	0,023	0,042
12	0,269	0,050	0,164	0,032	0,195	-0,008	0,008
16	0,354	0,069	0,180	0,036	0,220	0,042	0,060
20	0,445	0,089	0,184	0,042	0,271	0,043	0,067
24	0,600	0,087	0,195	0,065	0,293	0,042	0,075
30	0,635	0,097	0,199	0,064	0,309	0,045	0,086

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 - Expansão média das barras de argamassa curadas em água.

Idade (dias)	Expansão Média (%)						
	REF	CBCA0	CBCA15	CBCA30	CBCA45	EGAF	MC
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,013	-0,008	-0,005	-0,007	0,276	0,003	0,003
8	0,023	0,010	-0,007	-0,005	0,272	0,007	0,004
12	0,016	0,003	0,002	-0,001	0,351	-0,040	-0,013
16	-0,012	0,000	0,002	0,007	0,261	0,009	-0,043
20	-0,015	-0,052	-0,037	0,010	0,275	0,006	0,017
24	0,016	-0,002	0,000	0,012	0,276	0,000	-0,006
30	0,018	-0,003	0,005	0,000	0,268	-0,002	-0,005

Fonte: Próprio autor.

4.3 Resistência Mecânica

4.3.1 Resistência à Flexão

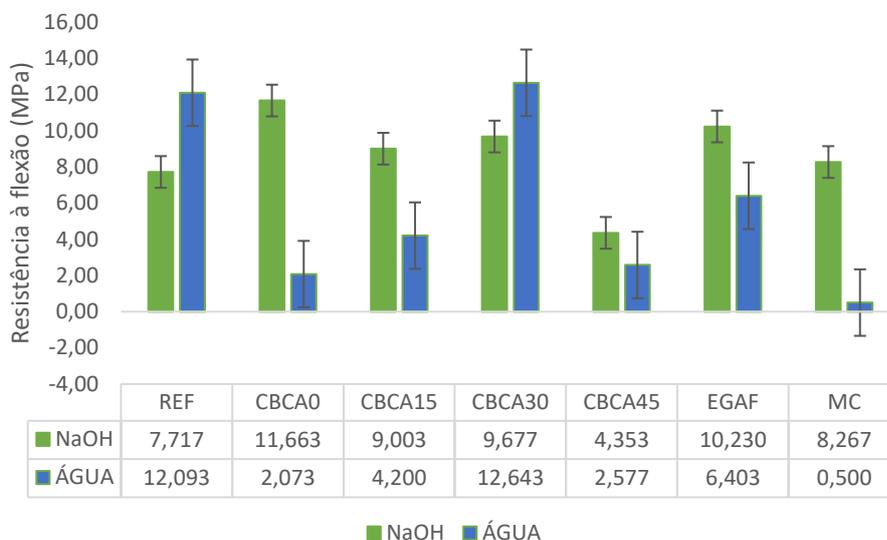
Os resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão das argamassas após a cura acelerada, estão expostos na Figura 22.

A argamassa REF atingiu valores de 7,72MPa curada em tanque com NaOH, e 12,09MPa quando curada em água. Dentre as AAA, quando curadas em água, a formulação CBCA30 obteve o melhor resultado de resistência à flexão, média de 12,64MPa, similar a argamassa REF.

Quando curadas em NaOH, em comparação a REF (7,72MPa), apenas a CBCA45 (4,353MPa) atingiu valores menores de resistência à flexão. A formulação CBCA0 atingiu o maior valor dentre os resultados, 11,66MPa, que corresponde a 151% da argamassa REF.

A argamassa MC não atingiu resultados significativos quando curada em água.

Figura 22 - Resistência à flexão



Fonte: Próprio autor.

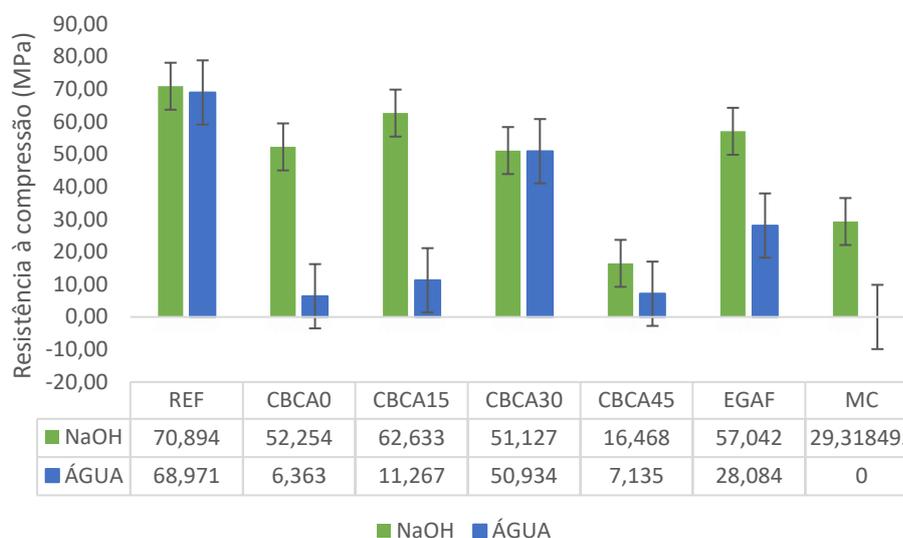
4.3.2 Resistência à Compressão

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão das argamassas após à cura acelerada, estão expostos na Figura 23.

A argamassa REF atingiu valores de 70,89MPa curada em tanque com NaOH, e 68,97MPa quando curada em água, dentre as AAA, nenhuma obteve maior valor de resistência à compressão. Os resultados das AAA são maiores quando curados em NaOH, entre elas o CBCA15, atingiu valores acima de 60MPa, próximo a REF.

A CBCA30 também apresentou comportamento similar a REF, mantendo valores próximos tanto para cura em NaOH, quanto em água, 51,12MPa e 50,93MPa respectivamente. Já a CBCA0 E CBCA15 exibiram grandes diferenças nos resultados de compressão, quando curadas em NaOH atingiram valores 8 e 5 vezes maiores que as AAA curadas em água. A argamassa MC não atingiu resultados significativos quando curada em água.

Figura 23 - Resistência à compressão.



Fonte: Próprio autor.

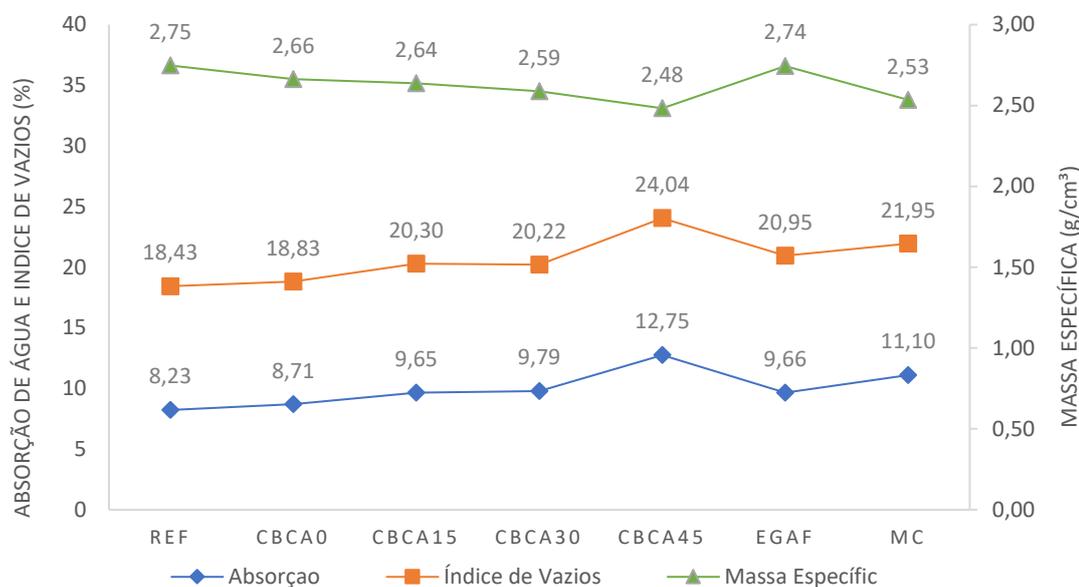
4.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados do ensaio de absorção de água, o índice de vazios e a massa específica estão apresentados nas Figuras 24 e 25.

Na Figura 24 podem ser verificados os números obtidos para as argamassas curadas em NaOH. A absorção de água, representada pela linha azul, apresenta comportamento ascendente, que demonstra que quanto mais CBCA na argamassa, maior sua absorção de água, os valores de α variam de 8,71% a 12,75%. A linha laranja, demonstra que o índice de vazios possui a mesma tendência, variando de 18,83% a 24,04%.

Já a massa específica das AAA, demonstram ser ligeiramente menores que a argamassa REF e inversamente proporcional a absorção de água e índice de vazios, variam de 2,48g/cm³ (CBCA45), menor valor, para 2,75g/cm³ (REF), maior valor, tendo a AAA EGAF massa específica muito próxima a REF.

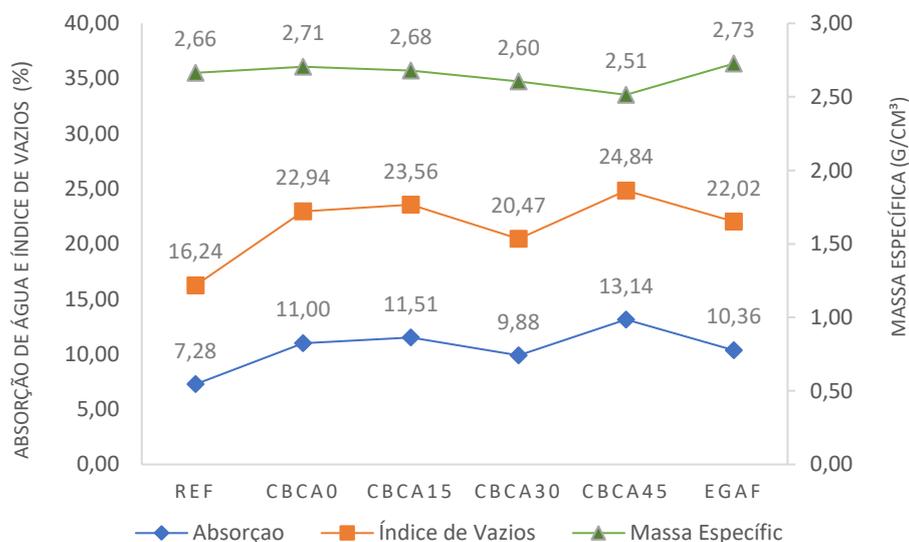
Figura 24 - Absorção de água, índice de vazios e densidade: AAA curada em NaOH.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 25 exibe os valores obtidos para as argamassas curadas em água. A argamassa referência após essa condição de cura apresentou valores de massa específica igual 2,66g/cm³, absorção de água 7,28% e índice de vazios 16,24%. Já as AAA, variaram a massa específica de 2,51 a 2,73g/cm³. A absorção de água e os índices de vazios, ao contrário da cura em NaOH, não apresentaram comportamento linear ao acréscimo de cinza nas argamassas, dentre as amostras contendo CBCA, a CBCA30 obteve menores resultados para absorção de água (9,88%), índice de vazios (20,47%), com massa específica de 2,60g/cm³. A argamassa MC não foi considerada para este ensaio pois não atingiu resultados significativos de resistência mecânica quando curada em água.

Figura 25 - Absorção de água, índice de vazios e densidade: AAA curada em água

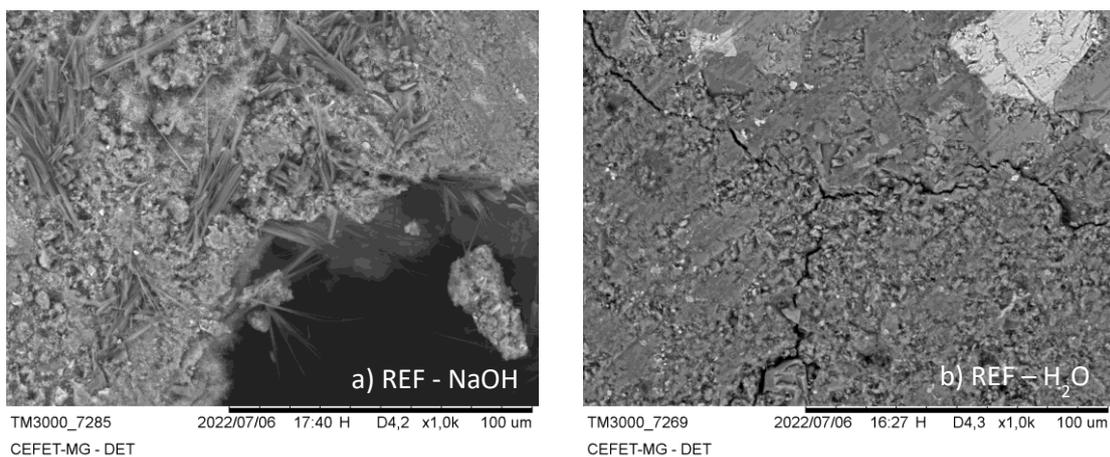


Fonte: Próprio autor.

4.5 Microscopia eletrônica de varredura

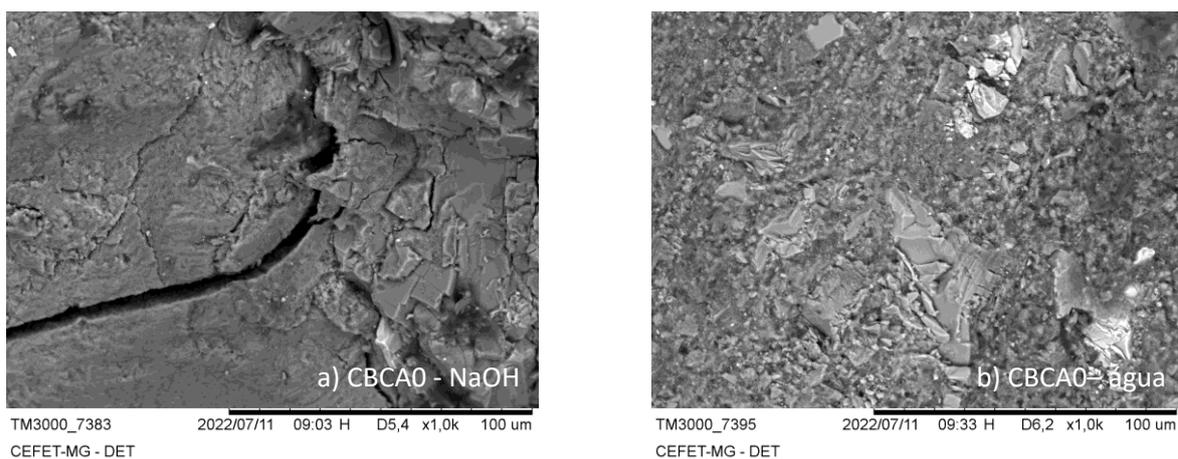
As Figuras 26 a 32 exibem a microestrutura das argamassas após o ensaio de reação álcali-sílica, curadas nos tanques com (a) NaOH e (b) água. Conforme pode ser visto pelas imagens, as argamassas álcali-ativadas apresentam uma microestrutura mais densa quando submetidas ao tanque de NaOH quando comparadas com as argamassas submetidas aos tanques com água, com exceção da argamassa CBCA30, que apresenta estrutura mais densa e compacta quando submetida ao tanque de água. O mesmo pode ser observado na argamassa REF que apresenta várias microestruturas em formato de agulha sobre a matriz quando submetida ao tanque de NaOH e estrutura densa quando submetida ao tanque com água.

Figura 26 - MEV REF - a) NaOH b) água.



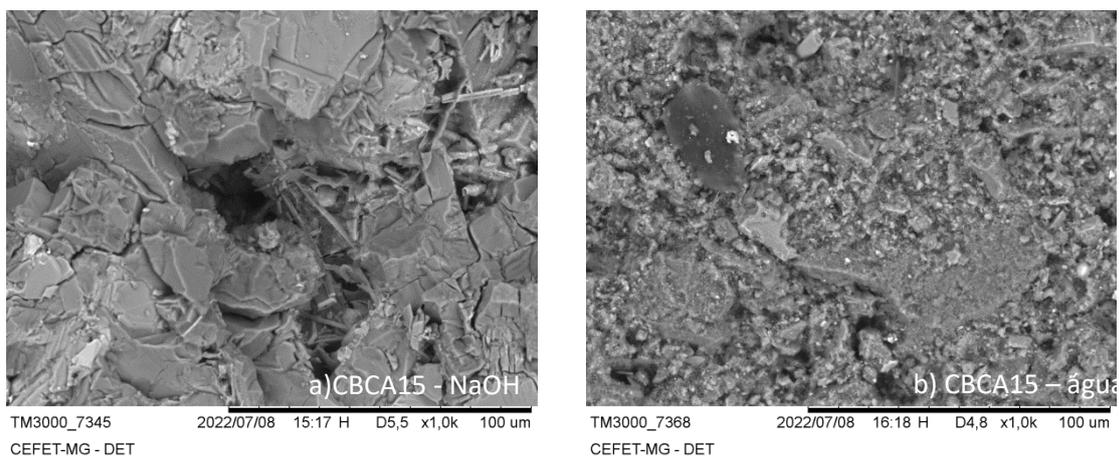
Fonte: Próprio autor.

Figura 27 - MEV CBCA0: a) NaOH b) água



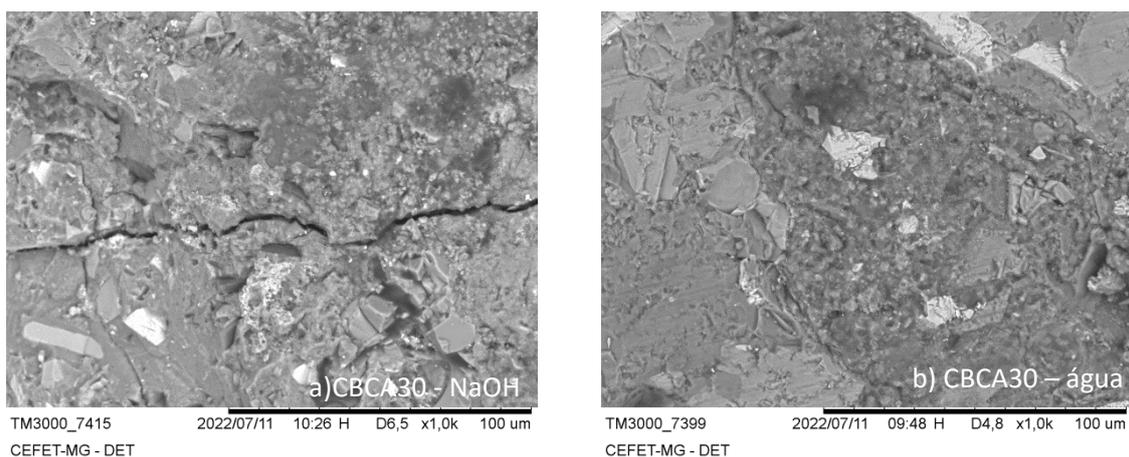
Fonte: Próprio autor.

Figura 28- MEV CBCA15: a) NaOH b) água.



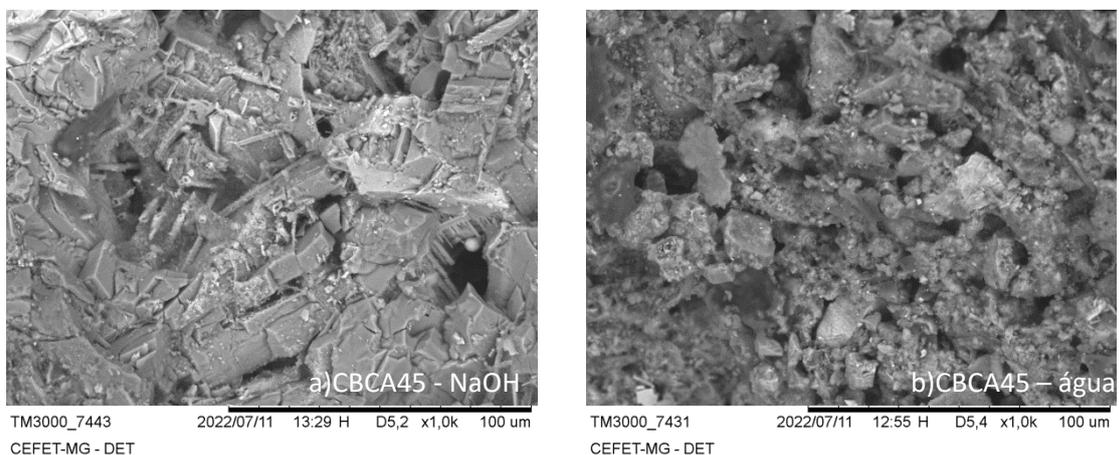
Fonte: Próprio autor.

Figura 29 - MEV CBCA30: a) NaOH b) água



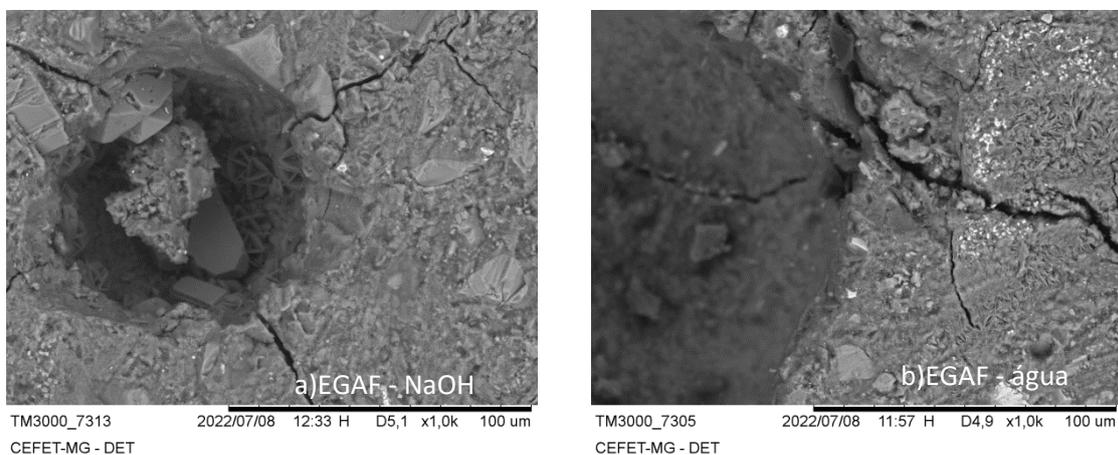
Fonte: Próprio autor.

Figura 30- MEV CBCA45: a) NaOH b) água



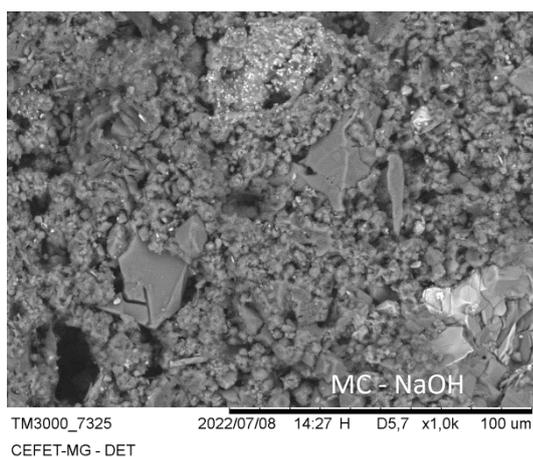
Fonte: Próprio autor.

Figura 31 - MEV EGAF a) NaOH b) água



Fonte: Próprio autor

Figura 32 - MEV MC: a) NaOH



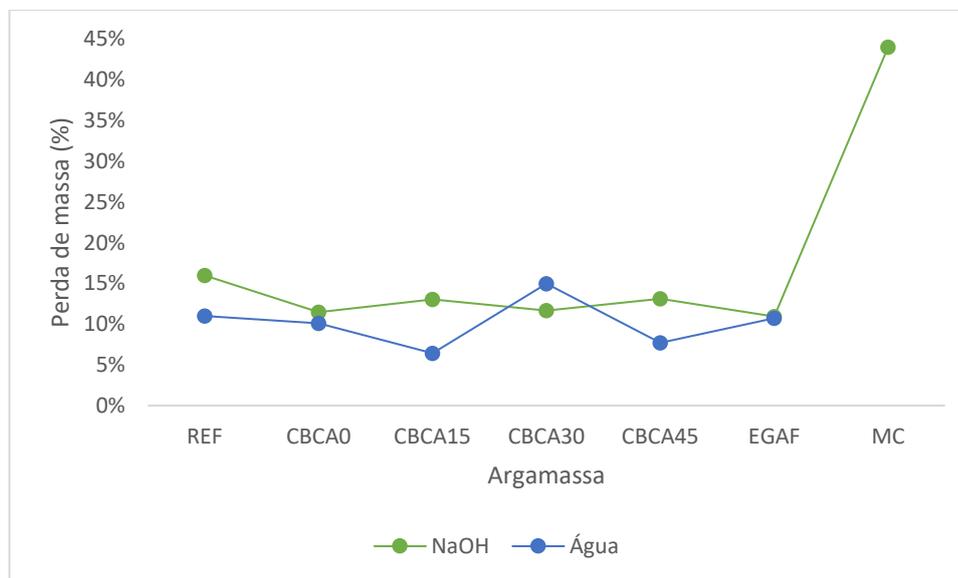
Fonte: Próprio autor

4.6 Ataque ácido

O resultado do ensaio de ataque ácido está apresentado na Figura 33. Conforme pode ser observado na Figura 33, as argamassas apresentam uma redução de massa depois da imersão na solução ácida, a linha verde representa a porcentagem de perda de massa das argamassas curadas em NaOH, e a linha azul as porcentagens de perda de massa das argamassas curadas em água.

As argamassas que foram imersas no tanque de água, apresentam menor mudança de massa quando comparadas com as argamassas imersas no tanque de NaOH, com exceção da argamassa CBCA30.

Figura 33 - Perda de massa por ataque ácido



Fonte: Próprio autor

5. DISCUSSÕES

5.1 Reação álcali-sílica

Conforme pode ser visto nos resultados do ensaio de reação álcali-sílica apresentados nas Figuras 15 a 21, a expansibilidade das argamassas é maior no tanque de NaOH quando comparada com o tanque de água.

Além disso, percebe-se que no tanque de água apenas a argamassa com maior teor de cinza expande (0,35%) além do limite crítico estabelecido pela norma brasileira (0,19%). A argamassa REF não apresenta expansão significativa, nesse caso, devido ao cimento apresenta a menor expansibilidade final entre os traços analisados por apresentar menor teor de álcalis, o que limita as reações de formação do gel expansivo (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PUERTAS, 2002; WANG, Wei; NOGUCHI; MARUYAMA, 2022).

Enquanto isso, no tanque de NaOH que é aquele descrito na metodologia das normas, a argamassa de referência (cimento) é aquela que apresenta maior expansibilidade

(0,63%) seguida pela argamassa com maior teor de CBCA45 (0,31%). Estas argamassas expandem-se acima do limite crítico estabelecido pelas normas. A argamassa CBCA15 apresenta expansibilidade de cerca 0,19% que é o limite crítico para as normas de referência sobre o assunto.

A maior expansibilidade apresentada pelas argamassas álcali-ativadas imersas no tanque de NaOH em comparação ao tanque de água pode ser explicada pela maior presença de álcalis que contribui para a composição dos corpos de prova provocando sua expansão (De Grazia *et al.*, 2021; Dupuis and Pellenq, 2022; Fernández-Jiménez and Puertas, 2002; Wang *et al.*, 2022). Este comportamento já foi reportado na literatura em estudos anteriores (Wang *et al.*, 2022; Wang and Noguchi, 2020). Em relação à argamassa de referência, a maior expansibilidade neste tanque (NaOH) pode ser explicada pelo alto teor de cálcio presente no cimento (Bakharev *et al.*, 2001; Fernández-Jiménez and Puertas, 2002; Shi *et al.*, 2015; Tänzner *et al.*, 2017).

Além disso, a maior expansibilidade da argamassa CBCA45 entre as argamassas álcali-ativadas em ambos os tanques pode ser associada ao maior teor de silício nesta formulação, uma vez que o silício em excesso que provoca instabilidade na pasta, levando ao surgimento de poros e ao aumento da absorção de água do ambiente (Al-Otaibi, 2008; Duxson *et al.*, 2007, 2005; Tänzner *et al.*, 2017).

Entre as argamassas álcali-ativadas com incorporação de CBCA aquela que apresenta melhor desempenho em ambos os tanques é a CBCA30 que apresenta expansibilidade 0% e 0,06% nos tanques de água e NaOH, respectivamente. A argamassa CBCA30 com 30% de adição de CBCA apresenta potencial aplicação para inibição de reação álcali-silica em ambientes agressivos.

5.2 Resistência à flexão e resistência à compressão/ microscopia eletrônica de varredura

Em relação à resistência à flexão a melhor performance das argamassas REF e CBCA30 no tanque de água pode ser relacionada a microestrutura mais densa e compactada apresentada pelas micrografias Figura 26b e Figura 29b. A microestrutura destas argamassas quando submetidas ao tanque de NaOH, Figura 26a e Figura 29a, apresenta muitas fissuras, e no caso da argamassa REF há a

presença de estruturas no formato de agulhas que pode ser associado a etringita tardia (Karthik *et al.*, 2022; Miyamoto *et al.*, 2023).

As demais argamassas álcali-ativadas apresentam um bom desempenho quando submetidas ao tanque de NaOH e apresentam estrutura mais coesa (Figura 27a, Figura 28a, Figura 30a e Figura 31a) quando comparada com a microestrutura das argamassas quando submetidas ao tanque de H₂O (Figura 27b, Figura 28b, Figura 30b e Figura 31b).

Além disso, é importante salientar que com o aumento da adição de cinza na argamassa a resistência à flexão do material diminui, com exceção da argamassa CBCA30. Isto pode ser associado com o excesso de silício ocasionado pelo aumento da adição da cinza que pode provocar um atraso nas reações de geopolimerização e conseqüentemente ocasionar um ganho de resistência mais lento no material (Gao *et al.*, 2014; Jin *et al.*, 2021).

Em relação à resistência à compressão, a mesma tendência de resultados de resistência à tração pode ser observada na resistência à compressão do material. As argamassas REF e CBCA30 apresentam melhor desempenho quando submetidas ao tanque de H₂O quando comparadas com aquelas submetidas ao tanque de NaOH. Este resultado pode ser explicado pela microestrutura apresentada pelas argamassas.

Além disso, é importante ressaltar que a expansibilidade apresentada pelas argamassas não está relacionada diretamente com suas propriedades mecânicas, uma vez que a argamassa que apresenta maior expansibilidade no tanque de NaOH (REF) também é aquela que apresenta maior resistência a compressão.

5.3 Absorção de água, porosidade e densidade aparente/ microscopia eletrônica de varredura

A relação inversamente proporcional entre resistência à compressão e absorção de água pode ser vista no comportamento das argamassas submetidas ao ensaio de reação álcali-silica (FRANÇA *et al.*, 2023a). Este fato por ser exemplificado neste estudo, principalmente, pela argamassa CBCA45 que apresenta o maior valor de absorção de água em ambos os tanques e ao mesmo tempo o menor valor de resistência à compressão nas duas situações analisadas.

A mesma relação inversamente proporcional entre índice de vazios e massa específica pode ser observada, uma vez que os maiores valores de índice de vazios estão relacionados com as menores massas. Além disso, a porosidade das argamassas imersas no tanque de água é superior àquela apresentada pelas argamassas imersas no tanque de NaOH, com exceção das argamassas REF e CBCA30. Isto pode ser explicado pela microestrutura apresentada por essas pastas, uma vez que as argamassas imersas em água apresentam matriz menos compacta quando comparada com as argamassas imersas em NaOH.

O comportamento inferior das argamassas álcali-ativas em relação ao tanque de água quando comparado com tanque de NaOH pode ser atribuído a lixiviação dos íons que participam da composição da cadeia geopolimérica para a solução, o que torna a matriz mais porosa (Sun and Vollpracht, 2020). No tanque de NaOH, os íons Na⁺ que estão presentes na solução alcalina, contribuem para as reações de geopolimerização e formam uma matriz densa e compacta (De Grazia *et al.*, 2021; Dupuis and Pellenq, 2022; Fernández-Jiménez and Puertas, 2002; Wang *et al.*, 2022). Esta estrutura densa e compacta pode contribuir a maior expansibilidade destas argamassas álcali-ativadas no tanque de NaOH, enquanto a lixiviação e maior porosidade encontrada nas argamassas imersas no tanque de água pode contribuir para menor expansibilidade apresentada por essas argamassas.

5.4 Ataque ácido e microscopia eletrônica de varredura

A redução de massa é mais acentuada nas argamassas imersas no tanque de NaOH durante o ensaio de reação álcali-sílica porque a microestrutura das argamassas nesta condição apresenta aspecto mais denso e compacto conforme pode ser visto nas micrografias (Figura 27a, Figura 28a, Figura 30a e Figura 31a). Portanto, a despolimerização e desaluminação que ocorre devido ao ataque do ácido nas cadeias geopoliméricas nestas argamassas acontecem de maneira mais facilitada (Aiken *et al.*, 2018).

Nas argamassas imersas no tanque de água durante o ensaio de reação álcali-sílica, a microestrutura apresenta uma matriz menos coesa e possivelmente cadeias geopoliméricas com menos ligações cruzadas. Portanto, o ataque ácido nestas matrizes não causa danos tão significativos quanto naquelas imersas em NaOH. Além disso, as argamassas com adição de CBCA apresentam uma perda de massa

ligeiramente inferior as demais argamassas, com exceção da CBCA30 imersa no tanque de água no ensaio de reação álcali-sílica.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho estuda a durabilidade de argamassas álcali-ativadas de EGAF e MC com adição de CBCA, através do ensaio de RAS, e ataque ácido. Além disso, as AAA, foram testadas quanto a resistência mecânica, e verificada suas microestruturas após a cura em tanques com NaOH e água, comparando com argamassas produzidas com cimento Portland e agregado reativo. Após a análise dos resultados, e com base na revisão de literatura, as principais conclusões do trabalho são:

- A adição da cinza de bagaço de cana-de-açúcar apresenta um efeito benéfico na durabilidade de argamassas álcali-ativadas. As argamassas com adição de cinza apresentam expansibilidade inferior ao limite crítico estabelecido pelas normas brasileira (0.19%) e estadunidense (0.20%) em ambas as situações analisadas, com exceção da argamassa CBCA45 que apresenta maior teor de adição de cinza e maior relação ativador/precursor.
- Entre as argamassas com adição de cinza, a argamassa CBCA30 se destaca em termos de menor expansibilidade em ambas as situações analisadas e, apresenta resistência à compressão adequada para a aplicação estrutural e estrutura compacta.
- As resistências mecânicas não estão associadas a expansão das barras de argamassas após a cura no tanque de NaOH, visto que a argamassa de maior expansibilidade (REF) também apresentou a maior resistência mecânica.
- A adição de cinza, conseqüentemente aumento de silício, provoca atraso nas reações de geopolimerização, causando ganho de resistência mais lento.

Diante disso, entre as formulações analisadas neste estudo a argamassa CBCA30 é aquela que apresenta composição mais diversa, utilizando escória granulada de alto forno, metacaulim e cinza de bagaço de cana-de-açúcar como precursores, o que contribui mais amplamente para a economia circular, uma vez que utiliza resíduos de diversas atividades industriais simultaneamente.

A utilização de material álcali ativado com utilização de CBCA, pode substituir concretos e argamassas de cimento Portland, quando considerados apenas a comparação das propriedades mecânicas, microestruturais, além da menor susceptibilidade a expansão por RAS. Contudo, são necessários mais estudos que forneçam parâmetros normativos apropriados aos MAA, além disso, no Brasil, os

resíduos como CBCA não possuem padronização de suas propriedades, o que dificulta utilização do material em larga escala.

A utilização de MAA contribui com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis da ONU, porém, se faz necessário o envolvimento da comunidade científica e da indústria na padronização das características dos precursores e ativadores, a fim de tornar possível a logística de utilização em grande escala. Outro aspecto importante a ser considerado em pesquisas futuras, é o ponto ótimo de trabalhabilidade dos MAA para que seja possível o manuseio e transporte até a aplicação final na estrutura.

7 – CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS DO TRABALHO

Publicações diretas:

- DEFERIMENTO DE PATENTE: Argamassa álcali-ativada para inibição da expansão álcali-agregado, processo de obtenção e uso desta. **INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL**. FIGUEIREDO, Pâmella Fernandes; SOUSA, Leila Nóbrega; FRANÇA, Sâmara; DE MOURA SOLAR SILVA, Marcos Vinicio; BORGES, Paulo Henrique Ribeiro; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva.
- SUBMISSÃO EM ANDAMENTO: Effect of sugarcane bagasse ash addition on inhibition of alkali-silica reaction and acid attack in alkali-activated mortars. **Sustainable Materials and Technologies**. FIGUEIREDO, Pâmella Fernandes; FRANÇA, Sâmara; DE MOURA SOLAR SILVA, Marcos Vinicio; BORGES, Paulo Henrique Ribeiro; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva. Submetido em 15/11/2023.

Publicações indiretas:

- Reaction mechanisms in geopolymers produced from sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, vol. 377, p. 131124, Mai. 2023. FRANÇA, Sâmara; FERNANDES FIGUEIREDO, Pâmella; NÓBREGA SOUSA, Leila; VINICIO DE MOURA SOLAR SILVA, Marcos; HENRIQUE RIBEIRO BORGES, Paulo; CESAR DA SILVA BEZERRA, Augusto. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.131124. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182300836X>.
- Effect of Non-Calcined Sugarcane Bagasse Ash as an Alternative Precursor on the Properties of Alkali-Activated Pastes. **Molecules**, vol. 27, n. 4, p. 1185, 2022. SOUSA, Leila Nóbrega; FIGUEIREDO, Pâmella Fernandes; FRANÇA, Sâmara; DE MOURA SOLAR SILVA, Marcos Vinicio; BORGES, Paulo Henrique Ribeiro; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva.

8 - REFERENCIAS

ABBAS, S. *et al.* Prospective of sugarcane bagasse ash for controlling the alkali-silica reaction in concrete incorporating reactive aggregates. *Structural Concrete*, v. 21, n. 2, p. 781–793, 2020.

ADESANYA, E. *et al.* Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: A review of side-stream based activators. *Journal of Cleaner Production*, v. 286, p. 125558, 2021.

ALTAN, E.; ERDOĞAN, S. T. Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 2, p. 131–139, 2012.

ALVARENGA, C. B. C. S. SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS À BASE METACAULIM E MICROPARTÍCULAS DE VIDRO SODA-CAL. [s.l.: s.n.].

ANGULO-RAMÍREZ, D. E.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; MEDEIROS, M. Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars: Performance to alkali-aggregate reaction. *Construction and Building Materials*, v. 179, p. 49–56, 2018.

ARBI, K. *et al.* A Review on the Durability of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Systems: Advances, Issues, and Perspectives. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 55, n. 19, p. 5439–5453, 2016.

AWOYERA, P.; ADESINA, A. Correction to: Durability Properties of Alkali Activated Slag Composites: Short Overview. *Silicon*, v. 12, n. 6, p. 1511–1511, 2020.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 10, p. 1607–1611, 2003.

BARBOSA, F. L.; CORDEIRO, G. C. Partial cement replacement by different sugar cane bagasse ashes: Hydration-related properties, compressive strength and autogenous shrinkage. *Construction and Building Materials*, v. 272, p. 8–11, 2021.

BARROS, S.; RUBIO, N. Report Name : Sugar Semi-annual Report Highlights : v. 20, n. March, 2019.

BASALT. Disponível em: <https://www.mindat.org/min-48492.html>. Acesso em 05/07/2021.

BERNAL, S. A. *et al.* Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 1, p. 46–54, 2011.

BERNAL, S. A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; PROVIS, J. L. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials*, v. 33, p. 99–108, 2012.

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

BEZERRA, A. C. DA S. *et al.* Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. *Revista Materia*, v. 22, n. 1, 2017.

BEZERRA, I. M. T. *et al.* Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. *Revista eletrônica de materiais e processos*, v. 8.2, p. 101–105, 2013.

BLIGHT, G.; ALEXANDER, M. Alkali-Aggregate Reaction and Structural Damage to Concrete. [s.l: s.n.].

Britannica Academic - Basalto. *Britannica Academic*, p. 13572, 2021.

CAIJUN SHI, P. V. K. AND D. R. Alkali-Activated Cements and Concretes. Taylor & Francis is an imprint of the Taylor & Francis Group, p. 369, 2006.

CANADA, N. ;; A.B.POOLE. The Alkali-Silica Reaction. [s.l: s.n.].

CASTALDELLI, V. N. *et al.* Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials. *Materials*, v. 6, n. 8, p. 3108–3127, 2013.

CASTRO, T. R. DE; MARTINS, C. H.; BASSETO, P. O potencial do resíduo industrial no desenvolvimento sustentável: as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material alternativo. 2012.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. V. 7 - Safra 2020/21, n.3 - Terceiro levantamento, dezembro de 2020. p. 62, 2020.

CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; DE ALMEIDA, R. S. Influence of ultrafine wet grinding on pozzolanic activity of submicrometre sugar cane bagasse ash. *Advances in Applied Ceramics*, v. 110, n. 8, p. 453–456, 2011.

DAVIDOVITS, J. PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS Joseph Davidovits Geopolymer Institute, 02100 Saint-Quentin, France. *Alkaline Cements and Concretes*, p. 1–19, 1994.

DAVIDOVITS, J. *Geopolymer chemistry and applications / Joseph Davidovits. [s.l: s.n.]*.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*, v. 8, n. 3, p. 335–350, 2017.

DAVIDOVITS, P. J. *The pyramids. [s.l: s.n.]*. v. 126

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

DE MORAES, L. C.; SEER, H. J.; MARQUES, L. S. Geology, geochemistry and petrology of basalts from Paraná Continental Magmatic Province in the Araguari, Uberlândia, Uberaba and Sacramento regions, Minas Gerais state, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 48, n. 2, p. 221–241, 2018.

DEMORTIER, G. Distribution of sodium and chlorine in samples of Egyptian pyramids. n. June, p. 1–9, 2020.

DIATOM. Sodium silicate.

DUTRA, A. I. F.; VENQUIARUTO, S. D.; TEMP, A. L. *Reação Álcali-Agregado : Estudo Comparativo De Agregados Da Fronteira Oeste Do Rio Grande Do Sul , Frente a Utilização De Cimento Portland : Cpv Ari . 2017.*

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

DUXSON, P.; PROVIS, J. L. Designing precursors for geopolymer cements. *Journal*

of the American Ceramic Society, v. 91, n. 12, p. 3864–3869, 2008.

F. PACHECO-TORGAL, J. A. L.; C. LEONELLI, A. P. AND; CHINDAPRASIRT, P. Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes. [s.l: s.n.].

FAIRBAIRN, E. M. R. *et al.* Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 9, p. 1864–1871, 2010.

FARNY, J. A; KOSMATKA, S. H. Concrete Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete. *Concrete Technology*, p. 1–23, 1997.

FERCHE, A. C. *et al.* Toward macro-modeling of alkali-silica reaction-affected structures. *ACI Structural Journal*, v. 114, n. 5, p. 1121–1129, 2017.

FERCHE, A. C. *et al.* Material, structural and modelling aspects of alkali aggregate reaction in concrete. *Nuclear Engineering and Design*, v. 351, n. November 2018, p. 87–93, 2019.

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

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F. Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements. *Advances in Cement Research*, v. 15, n. 3, p. 129–136, 2003.

FILHO, S. T. M.; MARTINS, C. H. Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-Açúcar como aditivo mineral na produção de blocos de concreto para pavimentação. *Revista em Agronegocio e Meio Ambiente*, v. 10, n. 4, p. 1205–1224, 2017.

FLETCHER, R. A. *et al.* The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 25, n. 9, p. 1471–1477, 2005.

FRANÇA, Sâmara; DE MOURA SOLAR SILVA, Marcos Vinicio; RIBEIRO BORGES, Paulo Henrique; DA SILVA BEZERRA, Augusto Cesar. A review on some properties of alkali-activated materials. *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 7, n. 2, 2022. DOI 10.1007/s41062-022-00789-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41062-022->

00789-w.

FRANÇA, Sâmara; FERNANDES FIGUEIREDO, Pâmella; NÓBREGA SOUSA, Leila; VINICIO DE MOURA SOLAR SILVA, Marcos; HENRIQUE RIBEIRO BORGES, Paulo; CESAR DA SILVA BEZERRA, Augusto. Reaction mechanisms in geopolymers produced from sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, vol. 377, p. 131124, Mai. 2023. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.131124. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182300836X>.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 6, p. 515–524, 2007.

GAO, X. *et al.* Investigation on a green olivine nano-silica source based activator in alkali activated slag-fly ash blends: Reaction kinetics, gel structure and carbon footprint. *Cement and Concrete Research*, v. 100, n. May, p. 129–139, 2017.

GAO, X.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag-fly ash blends. *Construction and Building Materials*, v. 80, p. 105–115, 2015.

GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 2, p. 175–183, 2007.

GAUTAM, B. Multiaxially loaded concrete undergoing alkali-silica reaction (ASR) Multiaxially Loaded Concrete Undergoing Alkali – Silica Reaction (ASR) by for the degree of PhD. n. April, 2016.

GEOPOLYMER. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>. Acesso em 14/01/2021.

GERALDO, R. H. Aglomerante Álcali-Ativado Contendo Lodo De Eta E Cinza De Casca De Arroz. p. 121, 2016.

GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag.

Journal of Cleaner Production, v. 162, p. 1407–1417, 2017.

GILLOTT, J. E. Alkali-aggregate reactions in concrete. *Engineering Geology*, v. 9, n. 4, p. 303–326, 1975.

GILLOTT, J. E. Review of expansive alkali-aggregate reactions in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 7, n. 4, p. 278–282, 1995.

GLASSER, F. P. Chemistry of the alkali-aggregate reaction. *The Álcali-Silica Reaction in Concrete*. SWAMY, R.N. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrans Reinhold, 1992, p.30-53.

HASPARYK, N. *et al.* Investigação da Reação Álcali-Agregado em. 2002.

HASPARYK, N. P. Investigação De Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado E Caracterização Avançada Do Gel Exsudado. p. 326, 2005.

I. GARCIA-LODEIRO, A. PALOMO, A. F.-J. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based bindres, 2015.

ISMAIL, I. *et al.* Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 46, n. 3, p. 361–373, 2013.

JAGADESH, P. *et al.* Micro-analytical studies on sugar cane bagasse ash. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, v. 40, n. 5, p. 1629–1638, 2015.

JOHN L. PROVIS AND JANNIE S. J. VAN DEVENTER. *Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications*. [s.l: s.n.]. v. 1

JUENGER, M. C. G. *et al.* Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1232–1243, 2011.

KAWA, P. L. Resíduos da produção de cana de açúcar. p. 2020–2022, 2021.

KHAN, M. N. N.; SARKER, P. K. Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar. *Construction and Building Materials*, v. 263, p. 120177, 2020.

LE QUÉRÉ, C. *et al.* Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, v. 8, n. 2, p. 605–649, 2016.

LUUKKONEN, T. *et al.* Application of alkali-activated materials for water and wastewater treatment: a review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 18, n. 2, p. 271–297, 2019.

LYRA, G. P. *et al.* Comparison of original and washed pure sugar cane bagasse ashes as supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, v. 272, p. 122001, 2021.

MADUREIRA, E. L.; RODRIGUES, E. C. Parametric analysis of AAR influent factors on thin-walled columns. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 8, n. 5, p. 591–603, 2015.

MAGALHÃES, L.F.D., FRANÇA, S., OLIVEIRA, M.D.S., PEIXOTO, R.A.F., BESSA, S.A.L., BEZERRA, A.C.D.S., 2020. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. *J. Clean. Prod.* 274.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. [s.l: s.n.].

MEI, K. *et al.* Effectiveness and microstructure change of alkali-activated materials during accelerated carbonation curing. *Construction and Building Materials*, v. 274, p. 122063, 2021.

META DA INDUSTRIA DO CIMENTO É EMISSÃO ZERO DE CO₂ ATÉ 2050. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO**. Disponível em: <https://abcic.org.br/Noticia/Exibir/meta-da-industria-do-cimento-e-emissao-zero-de-co-ate-2050>. Acesso em: 15/10/2023.

MIZUMOTO, C. *Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto e Agregados Constituintes*. 2009.

MOHD SALAHUDDIN, M. B.; NORKHAIRUNNISA, M.; MUSTAPHA, F. A review on thermophysical evaluation of alkali-activated geopolymers. *Ceramics International*, v. 41, n. 3, p. 4273–4281, 2015.

MORAES, I. S. B. M. C. DE. ANÁLISE DO CIMENTO ÁLCALI ATIVADO QUANDO SUJEITO À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO. [s.l: s.n.].

MUNHOZ, F. A. DA C. Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, v. 5, p. 161, 2007.

NOGUEIRA, K. A. Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/ 2008. p. 93, 2010.

NOVACANA. Como é feito o processamento da cana de açúcar nas usinas. Novacana.Com, p. 1–5, 2013.

OWSIAK, Z.; ZAPAŁA-SŁAWETA, J.; CZAPIK, P. Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, v. 63, n. 1, p. 23–29, 2015.

OZER, I.; SOYER-UZUN, S. Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. Ceramics International, v. 41, n. 8, p. 10192–10198, 2015.

PACHECO-TORGAL, F. *et al.* Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue? Construction and Building Materials, v. 30, p. 400–405, 2012.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. Construction and Building Materials, v. 22, n. 7, p. 1305–1314, 2008.

PALOMO, A. *et al.* A review on alkaline activation: New analytical perspectives. Materiales de Construcción, v. 64, n. 315, 2014.

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

PAN, J. W. *et al.* Modeling of alkali-silica reaction in concrete: A review. Frontiers of Structural and Civil Engineering, v. 6, n. 1, p. 1–18, 2012.

PEREIRA, A. M. *et al.* Valorisation of sugarcane bagasse ash (SCBA) with high quartz content as pozzolanic material in Portland cement mixtures ; Valorización de la ceniza de bagazo de azúcar (SCBA) con alto contenido de cuarzo como material puzolánico en mezclas de cemento Por. v. 68, n. 330, p. 1–10, 2018a.

PEREIRA, A. M. Avaliação do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de aglomerantes ativadas alcalinamente. p. 170, 2019.

PEREIRA, F. M. *et al.* Assesment of the potential reactivity of rocks used as aggregates in civil construction in the Rio Grande do Sul state. Revista Materia, v. 23, n. 3, 2018b.

PINHEIRO, C. *et al.* Application of the response surface method to optimize alkali activated cements based on low-reactivity ladle furnace slag. Construction and Building Materials, v. 264, p. 120271, 2020.

PONCE, J. M.; BATIC, O. R. Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. Cement and Concrete Research, v. 36, n. 6, p. 1148–1156, 2006.

PROVIS, J. L. Introduction and Report. [s.l: s.n.].

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

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 40–48, 2018.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. Annual Review of Materials Research, v. 44, p. 299–327, 2014a.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Binder chemistry – Blended systems and intermediate Ca content. [s.l: s.n.]. v. 13

PUERTAS, F. *et al.* C-A-S-H gels formed in alkali-activated slag cement pastes. Structure and effect on cement properties and durability. MATEC Web of Conferences, v. 11, 2014.

RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <https://namidia.fapesp.br/residuos-da-producao-de-cana-de-acucar/109777> - Acesso em 13/03/2021

REZENDE, M. F. *et al.* Substituição parcial do cimento Portland pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar em habitações de interesse social. *Revista Agrogeoambiental*, v. 9, n. 1, p. 87–99, 2017.

ROY, D. M.; JIANG, W.; SILSBEE, M. R. Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 12, p. 1879–1884, 2000.

RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alternative prime materials for developing new cements: Alkaline activation of alkali aluminosilicate glasses. *Ceramics International*, v. 42, n. 8, p. 9333–9340, 2016.

SANTOS, T. A. Avaliação Do Potencial Calorífico Do Bagaço De Cana-De- Açúcar E Da Atividade Pozolânica Das Cinzas Geradas. p. 167, 2017.

SARAIVA, S. L. C. ESTUDO DAS REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO DE BAGAÇO DE CANA – DE – AÇÚCAR. [s.l: s.n.].

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2016.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, n. June, p. 2–26, 2018.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011.

SILVA, D. J. F. *et al.* Estudo dos efeitos do LiNO₃ na reação Álcali-Sílica e comparação com os efeitos da cinza volante na reação. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 3, n. 3, p. 310–321, 2010.

ŠKVÁRA, F. ALKALI ACTIVATED MATERIAL – GEOPOLYMER 1 Introduction. p.

661–676, 2007.

SOUSA, L. N. Material álcali-ativado em sistema ternário com o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar como precursor. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, p. 60, 2021.

SOUSA, Leila Nóbrega; FIGUEIREDO, Pâmella Fernandes; FRANÇA, Sâmara; DE MOURA SOLAR SILVA, Marcos Vinicio; BORGES, Paulo Henrique Ribeiro; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva. Effect of Non-Calcined Sugarcane Bagasse Ash as an Alternative Precursor on the Properties of Alkali-Activated Pastes. *Molecules*, vol. 27, n. 4, p. 1185, 2022.

TIECHER, F. *et al.* Influence of mesostasis in volcanic rocks on the alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 10, p. 1130–1140, 2012.

TIECHER, F.; GOMES, M. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Alkali-Aggregate Reaction: A study of the influence of the petrographic characteristics of volcanic rocks. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 8, n. 1, p. 2399–2404, 20 fev. 2018.

TORRES AGREDO, J. *et al.* Characterization of sugar cane bagasse ash as supplementary material for Portland cement. *Ingeniería e Investigación*, v. 34, n. 1, p. 5–10, 26 mar. 2014.

TROMBETA, N. DE C.; FILHO, J. V. C. Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: Indicadores agroindustriais. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 55, n. 3, p. 479–496, 2017.

TUYAN, M.; ZHANG, L. V.; NEHDI, M. L. Development of sustainable preplaced aggregate concrete with alkali-activated slag grout. *Construction and Building Materials*, v. 263, p. 120227, 2020.

UNICA. CARTILHA DA BIOELETRICIDADE. 2019.

VALDUGA, L. Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado. p. 206, 2007.

VAN DEVENTER, J. S. J. *et al.* Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardization. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 4, n. 2, p. 116–128, 2014.

WAKIZAKA, Y. Alkali–silica reactivity of Japanese rocks. *Engineering Geology*, v. 56, n. 1–2, p. 211–221, abr. 2000.

WANG, H.; WU, D.; MEI, Z. Effect of fly ash and limestone powder on inhibiting alkali aggregate reaction of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 210, p. 620–626, 2019.

WANG, P. Z.; TRETTIN, R.; RUDERT, V. Effect of fineness and particle size distribution of granulated blast-furnace slag on the hydraulic reactivity in cement systems. *Advances in Cement Research*, v. 17, n. 4, p. 161–166, 2005.

WANG, S. D.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 6, p. 1033–1043, 1994.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL Global status report 2017 | UN environment and the international energy agency. Disponível em: <https://www.worldgbc.org/news-media/global-status-report-2017>. Acesso em 13/01/2021.

XIAO, R. *et al.* Alkali-activated slag supplemented with waste glass powder: Laboratory characterization, thermodynamic modelling and sustainability analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 286, p. 125554, 2021.

YANG, H.; LI, P.; RAO, M. Long term investigation and inhibition on alkali-aggregates reaction of Three Gorges Dam concrete. *Construction and Building Materials*, v. 151, p. 673–681, 2017.

YIP, C. K. *et al.* Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 4, p. 554–564, 2008.

YIP, C. K.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 9, p. 1688–1697, 2005.

ZHANG, J. *et al.* Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 598–613, 2017.

2050 Net Zero Roadmap - One Year On. Disponível em:
<https://gccassociation.org/2050-net-zero-roadmap-one-year-on/>. Acesso em
:04/11/2023