

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDREZA FRARE

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO EM CIMENTOS
ÁLCALI-ATIVADOS

CURITIBA

2025

ANDREZA FRARE

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO EM CIMENTOS
ÁLCALI-ATIVADOS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Coorientadora: Profª. Drª. Caroline Angulski da Luz

CURITIBA
2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Frare, Andreza

Contribuição ao estudo da reação álcali agregado em cimentos álcali-ativados. / Andreza Frare. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Tese – (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Coorientadora: Profa. Dr. Caroline Angulski da Luz

1. Cimentos. 2. Álcalis. 3. Durabilidade (Engenharia). 4. Concreto – Expansão. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. IV. Luz, Caroline Angulski da. V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ANDREZA FRARE**, intitulada: **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO EM CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO HENRIQUE FARIA DE MEDEIROS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Agosto de 2025.

Assinatura Eletrônica

25/08/2025 17:42:51.0

MARCELO HENRIQUE FARIA DE MEDEIROS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/08/2025 10:02:40.0

FERNANDO PELISSER

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

14/08/2025 14:45:31.0

ELOISE APARECIDA LANGARO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Assinatura Eletrônica

15/08/2025 03:29:05.0

DIEGO JESUS DE SOUZA

Avaliador Interno (TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por guiar meus passos e me dar forças para enfrentar os desafios ao longo desta jornada. Sem Sua presença constante, eu não teria conseguido superar os momentos mais difíceis.

Aos meus pais, por nunca terem me deixado desistir, mesmo nos momentos em que nem eu conseguia enxergar um caminho. Obrigada por sonharem junto comigo, por acreditarem na minha capacidade e por serem meu porto seguro.

Ao Dyorgge, pela dedicação e pelo apoio incondicional. Obrigada por me ajudar na realização dos ensaios, por me encorajar a continuar e por estar ao meu lado em cada etapa desse processo.

Aos colegas da UTFPR de Pato Branco, em especial aos estagiários do laboratório de materiais, Kátia e Eduardo, e à técnica de laboratório, Cláudia. Vocês foram fundamentais na preparação dos materiais e no apoio técnico. À técnica de laboratório da UFPR, Viviane, pelo auxílio na realização dos ensaios. À UTFPR de Guarapuava, pelo empréstimo de equipamentos e pela infraestrutura disponibilizada para a realização dos ensaios. Aos colegas da mesma instituição, que compartilharam das mesmas angústias e me apoiaram ao longo do caminho.

Ao meu aluno Oberdam, por colaborar com a confecção de instrumentos de trabalho, e ao aluno Luiz, pelo auxílio nas análises. À aluna de iniciação científica Izadora, pelo empenho e dedicação. À UTFPR de Medianeira, ao professor Dr. Paulo e à doutoranda Aline, assim como à central de análises de Pato Branco, pelo suporte nos ensaios químicos.

À professora Dra. Eloíse e ao professor Dr. Diego de Jesus, pela paciência em me ajudar a compreender os ensaios e pela colaboração nas publicações. Às empresas que doaram materiais e contribuíram para a execução deste trabalho.

Aos membros da banca avaliadora, que se dispuseram a avaliar meu trabalho, minha gratidão pela dedicação e pelas contribuições para o aprimoramento desta pesquisa.

Ao meu orientador, professor Dr. Marcelo, por ter sido muito mais do que um orientador. Obrigada por ser amigo, incentivador, compreensivo e por estar ao meu lado nos momentos de dificuldade. Sua orientação foi essencial para o sucesso deste trabalho.

À minha coorientadora, professora Dra. Caroline, que me acompanha desde os primeiros passos na vida acadêmica a quem admiro muito. Obrigada por comemorar minhas vitórias, me aconselhar nos momentos de dificuldade e oferecer também um apoio emocional precioso.

Aos meus psicólogos, Daniela e Eduardo, por me ensinarem a caminhar um passo de cada vez. Sua orientação foi crucial para que eu pudesse me manter firme ao longo desta jornada.

Ao pessoal do IFSC de São Carlos, pelo apoio emocional. Obrigada por me ouvirem e me derem força quando eu mais precisei.

Ao CNPQ, pelo auxílio financeiro, que tornou este trabalho possível.

Meu trabalho é resultado de um esforço coletivo, e eu jamais teria conseguido sem o apoio de todas essas pessoas. Foi também uma luta emocional, cheia de altos e baixos, mas que me ensinou a recomeçar e a continuar.

A todos vocês, meu muito obrigada! Minha gratidão será eterna!

RESUMO

Os cimentos álcali-ativados (CAA) surgem como alternativas sustentáveis ao cimento Portland (CP), com menores emissões de CO₂ e propriedades mecânicas superiores. No entanto, sua alta concentração de álcalis pode favorecer a reação álcali-agregado (RAA), comprometendo a durabilidade do concreto. Este estudo investiga os mecanismos da RAA em CAA formulados com escória, cinza da casca de arroz e caulim, avaliando diferentes condições de exposição e a aplicabilidade dos métodos tradicionais de análise desenvolvidos para o cimento Portland (CP). Na primeira etapa, realizou-se a classificação de agregados reativos utilizando os testes de expansão em argamassa e concreto, selecionando o agregado mais reativo para a continuação dos experimentos. Na segunda etapa dosou-se o cimento álcali ativado, a partir de escória de alto forno (E), cinza da casca de arroz (CCA) e caulim (C). Ensaios de resistência à compressão, calorimetria e microestrutura foram conduzidos para otimizar a dosagem dos CAA, que apresentaram resistências mecânicas elevadas e comportamento adequado para análise da RAA. Na segunda etapa, a análise da RAA foi realizada por meio dos testes de argamassa e concretos, complementados pelo índice de classificação de danos (DRI) e o *Stiffness Damage Test* (SDT). O estudo também considerou os impactos de diferentes condições de exposição. Os resultados apontaram que o desempenho do CAA variou conforme o método de teste. No ensaio ABCPT, as amostras E (escória) e ECA (escória + CCA) permaneceram dentro do limite normativo de 0,04%, enquanto ECC (escória + CCA + C) e EC (escória + C) ultrapassaram esse valor, atingindo expansões de até 0,11%. No AMBT, as composições com escória também ultrapassaram os limites normativos, mas apresentaram expansões menores que o CPV. No ensaio CPT, o CAA mostrou expansões comparáveis ou inferiores ao CP, mas nem sempre abaixo dos limites normativos. A análise microestrutural indicou que produtos de hidratação, como o gel CASH (aluminosilicato de cálcio hidratado) e NASH (aluminosilicato de sódio hidratado), são responsáveis pela redução da reatividade dos álcalis. Além disso, os métodos convencionais de avaliação da RAA, projetados para o CP, mostraram-se inadequados para os CAA devido a diferenças na composição química e comportamento mecânico. A severidade das condições do AMBT, foi evidenciada. O ABCPT foi identificado como o mais adequado para analisar a RAA em CAA, especialmente devido à sua capacidade de minimizar a lixiviação de álcalis ao utilizar uma solução alcalina similar ao concreto. A combinação de testes acelerados e técnicas de análise de danos, como DRI e SDT, mostrou maior confiabilidade para avaliar o desempenho a longo prazo. Conclui-se que os CAA têm potencial para reduzir os impactos ambientais da indústria cimenteira e oferecem bom desempenho quanto à RAA. Este estudo contribui para o avanço na compreensão da durabilidade dos CAA, propondo ajustes nos métodos de avaliação.

Palavras-chave: cimento álcali ativado, reação álcali agregado, métodos de ensaio, durabilidade, expansão.

ABSTRACT

Alkali-activated cements (AAC) have emerged as sustainable alternatives to Portland cement (PC), offering lower CO₂ emissions and superior mechanical properties. However, their high alkali content may promote alkali–aggregate reaction (AAR), potentially compromising concrete durability. This study investigates the mechanisms of AAR in AAC formulated with slag, rice husk ash, and kaolin, evaluating different exposure conditions and the applicability of traditional assessment methods originally developed for Portland cement. In the first phase, reactive aggregates were classified using mortar and concrete expansion tests, allowing the selection of the most reactive aggregate for subsequent experiments. In the second phase, the alkali-activated cement was proportioned using ground granulated blast furnace slag (S), rice husk ash (RHA), and kaolin (K). Compressive strength, calorimetry, and microstructural analyses were conducted to optimize AAC mix design, which demonstrated high mechanical strength and suitable behavior for evaluating AAR. In the third phase, AAR performance was assessed through mortar and concrete tests, complemented by the Damage Rating Index (DRI) and the Stiffness Damage Test (SDT). The study also considered the influence of different exposure conditions. The results indicated that AAC performance varied according to the test method. In the ABCPT test, the S (slag) and S+RHA samples remained below the normative expansion limit of 0.04%, whereas the S+RHA+K and S+K mixtures exceeded this value, reaching expansions of up to 0.11%. In the AMBT test, slag-based compositions also exceeded the standard limits, although their expansions were lower than those of PCV. In the CPT test, AAC exhibited expansions comparable to or lower than PC, but not always below normative thresholds. Microstructural analysis revealed that hydration products such as CASH (calcium aluminosilicate hydrate) and NASH (sodium aluminosilicate hydrate) contribute to reducing alkali reactivity. Furthermore, conventional AAR assessment methods—designed for Portland cement—proved inadequate for AAC due to chemical and mechanical differences. The severity of AMBT exposure conditions was clearly evidenced. The ABCPT test was identified as the most suitable for evaluating AAR in AAC, particularly due to its ability to minimize alkali leaching by employing an alkaline solution similar to that of concrete pore solution. The combination of accelerated tests with damage assessment techniques such as DRI and SDT yielded greater reliability for long-term performance evaluation. In conclusion, AACs show significant potential for reducing the environmental impacts of the cement industry and demonstrate promising performance with respect to AAR. This study contributes to advancing the understanding of AAC durability and proposes adjustments to current evaluation methodologies.

Keywords: activated alkali cement, alkali-aggregate reaction, test methods, durability, expansion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura da tese	35
Figura 2: Esquema da RAA	37
Figura 3: Teste acelerado em barras de argamassa para CAA_4%, CAA_5%, CPV-ARI e CPV_RS.	45
Figura 4: Influência do tipo de ativador na expansão do CAA causada por RAA no de barras de argamassa	47
Figura 5: Relação do tipo de escória com a expansão causada pela RAA no ensaio de barras de argamassa.....	49
Figura 6: a) corpos de prova de argamassa para o ensaio de expansão, b) Ensaio de expansão de argamassa.....	52
Figura 7: a) Corpos de prova de concreto para ensaio de expansão, b) Ensaio de expansão de prismas de concreto.....	53
Figura 8: Imagem da técnica de índice de classificação de danos ou <i>Damage Rating Index (DRI)</i> realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LaME-UFPR)	55
Figura 9: Modelo qualitativo do dano devido a RAA versus níveis de expansão	57
Figura 10: a) realização do ensaio de SDT no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LaME-UFPR); b) comportamento tensão-deformação com carga 40% da resistência à compressão e 5 ciclos, para amostras de concreto afetadas pela RAA.....	58
Figura 11: a) Setup e posicionamento da amostra cilíndrica de concreto para realização do ensaio de cisalhamento direto; b) Perda média de resistência ao cisalhamento do concreto em função da expansão causada pela RAA.....	60
Figura 12: Localização das jazidas no estado do Paraná - BR.....	65
Figura 13: Imagens das lâminas delgadas de rocha polida para análise petrográfica.....	66
Figura 14: Amostras de britas selecionadas para análise petrográfica.....	70
Figura 15: Porcentagem modal dos minerais dos agregados G1, G2, G3, G4, G5, B1 e B2	71
Figura 16: Amostra de rocha em lâmina apresentando (a-b) Agregado G1 - cristais de quartzo recristalizados com aspecto límpido (c) Agregado G2 - cristais de quartzo recristalizado, minerais opacos, mica branca e epidoto orientados seguindo a foliação da	

rocha (d) Agregado G2 - cristais de apatita e fitas de quartzo orientados seguindo a foliação da rocha.....	74
Figura 17: Amostra de rocha em lâmina apresentando (a) Agregado G3 - cristais de biotita associada com minerais opacos e anfibólio acicular (b) Agregado G3 - cristal de mineral opaco milimétrico em contato com grãos de quartzo e feldspato potássico (c) Agregado G4 - cristais de feldspato apresentando cristais de anfibólio.....	75
Figura 18: Amostra de rocha em lâmina apresentando o agregado G5 (a-b) cristais de quartzo recristalizados e fraturados preenchidos por epidoto (c) Fragmento de rocha apresentando cristais de anfibólio e clorita	75
Figura 19: Fragmento de rocha apresentando (a-b) (a-b) cristais de sílica amorfa e celadonita associados a vesículas e cristais de plagioclásio bem definidos apresentando geminação (c) Agregado B2 - Cristais prismáticos de plagioclásio imersos aleatoriamente numa matriz mais fina e agregados de piroxênio com forma prismática e coloração castanho claro (d) Agregado B2 - grãos de celadonita e sílica amorfa associados a vesículas.	76
Figura 20: Média das expansões das argamassas ao longo do tempo pelo método AMBT da NBR 15577: 2018 parte 4	77
Figura 21: Média das expansões dos concretos ao longo do tempo de teste ABCPT de acordo com o procedimento de Sanchez (2008) e Sanchez, Kuperman, Helene (2011) ..	77
Figura 22: Média das expansões dos concretos ao longo do tempo de teste CPT de acordo com a NBR 15577:2018 parte 6	78
Figura 23: Limite de caracterização com agregado reativo comparativo dos resultados de expansão (ABMT, ABCPT e CPT) para os agregados	79
Figura 24: Variação de massa das amostras submetidas ao ensaio AMBT.....	81
Figura 25: Variação de massa das amostras submetidas ao ensaio ABCPT	82
Figura 26: Variação de massa das amostras submetidas ao ensaio CPT	82
Figura 27: Materiais empregados. (A) Escória, (b) Cinza da casca de arroz, (c) Caulim ..	89
Figura 28: Difratogramas dos materiais	90
Figura 29: Granulometria a laser dos materiais E – Escória, CCA – Cinza da casca de arroz e C – Caulim	91
Figura 30: Corpos de prova para a realização do ensaio de compressão.....	93
Figura 31: Resistência à compressão do CAA	95
Figura 32: Taxa de calor liberado nos CAA's com Escória (E), Escória e CCA (ECA), Escória, cinza e caulim (ECC) e Escória e caulim (EC).....	96

Figura 33: Calor de hidratação nos CAA's com Escória (E), Escória e CCA (ECA), Escória, cinza e caulin (ECC) e Escória e caulin (EC).....	96
Figura 34: Difratoogramas das amostras de CAA, composto por escória (E), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.....	98
Figura 35: Difratoogramas das amostras de CAA, composto por escória e cinza da casca de arroz (ECA), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.....	98
Figura 36: Difratoogramas das amostras de CAA, composto por escória, conza da casca de arroz e caulin (ECC), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.	99
Figura 37: Difratoogramas das amostras de CAA, composto por escória e caulin (EC), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.	99
Figura 38: Resultado da análise de TG/DTG nas amostras de CAA, composto por escória (E), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.....	100
Figura 39: Resultado da análise de TG/DTG nas amostras de CAA, composto por escória e cinza da casca de arroz (ECA), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação	101
Figura 40: Resultado da análise de TG/DTG nas amostras de CAA, composto por escória, cinza da casca de arroz e caulin (ECC), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação ..	101
Figura 41: Resultado da análise de TG/DTG nas amostras de CAA, composto por escória e caulin (EC), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.....	102
Figura 42: Temperatura de decomposição de hidratos e carbonatos em TG/DTG.	102
Figura 43: Número de publicações relacionadas à durabilidade dos CAA nas bases de dados Web of Science e Scopus	107
Figura 44: Percursores testados quanto a RAA em CAA encontradas nos artigos das bases de dados Web of Scince e Scopus a partir de 2015 com duas ou mais citações	108
Figura 45: Métodos de avaliação da RAA em CAA encontradas nos artigos das bases de dados Web of Scince e Scopus em todo espaço temporal com duas ou mais citações..	110
Figura 46: Distribuição granulométrica dos cimentos utilizados para análise da RAA.....	113
Figura 47: Localização da saibreira onde foi coletado o agregado graúdo	114
Figura 48: Curva granulométrica do agregado utilizado a partir da composição de 60% de brita 1 e 40% de brita 0	115
Figura 49: Resultados de expansão obtidos a) AMBT, b) ABCPT e c) CPT.....	115
Figura 50: Análise de DRX do agregado graúdo	117
Figura 51: Amostra de rocha em lâmina apresentando (a) cristais de quartzo recristalizados (b) intensa alteração do plagioclásio. Em vermelho tem-se fraturas preenchidas.	117

Figura 52: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	118
Figura 53: Expansão do agregado miúdo pelo método AMBT - NBR 15577-4.....	118
Figura 54: Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova	119
Figura 55: Ensaio de barras de argamassa para os cimentos álcali ativados E, EC, ECA e ECC e para CPV.....	124
Figura 56: Teores de óxidos e relação CaO/SiO ₂ presentes nas composições de CAA e CPV.....	125
Figura 57: Variação de massa das argamassas submetidas ao ensaio ABMT	126
Figura 58: Expansão em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA) no Teste Brasileiro de Prismas de Concreto Acelerado (ABCPT).....	128
Figura 59: Variação de massa dos prismas de concreto submetido ao ensaio de ABCPT	129
Figura 60: Expansão em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA) para o ensaio ACPT	130
Figura 61: Variação de massa dos prismas de concreto submetidos ao ensaio ACPT ...	131
Figura 62: Expansão em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA) no ensaio CPT	131
Figura 63: Variação de massa dos prismas de concreto submetidos ao ensaio CPT	133
Figura 64: Resultado da análise de retração dos prismas de concreto	133
Figura 65: Variação de massa relacionado ao ensaio de retração	134
Figura 66: Comparativo de resultados de expansão linear dos CAAs e CPV para os ensaios ABMT, ACPT, ABCPT e CPT.	136
Figura 67: Correlação entre expansão (%) e variação de massa (%) entre CPV e CAA, a partir dos ensaios a) ABMT, b) ACPT, c) ABCPT e d) CPT.....	139
Figura 68: Microscopia óptica do concreto de CAA submetido às condições de cura de 38 ⁰ e umidade de 95% com agregado reativo. a) Fissuras internas e externas carcteríticos de RAA, b) Deposição de gel de RAA nas fissuras do concreto de CAA.	141
Figura 69: Microscopia de varredura eletrônica em concreto de cimento Portland sujeito a RAA, aos 12 meses de idade à 38 ⁰ e umidade de 95%. a) Gel de RAA gretado, b) Poro preenchido por gel de RAA, c) Gel de RAA na superfície do agregado.	142
Figura 70: MEV de amostras de CAA. a) e b) Fissura na interface pasta agregado da amostra E, c) Pontos de EDS no material depositado na fissura encontrada na amostra E.	143

Figura 71: MEV de amostras de CAA. a) Fissuras e poros presentes na amostra EC, b) Poro com presença de gel de RAA na amostra EC, c) Material depositado em poro encontrado na amostra ECA.....	144
Figura 72: Relações em % atômicas do gel de RAA. a) Cimento Portland (Macioski, 2024) e b) CAA	146
Figura 73: Diagrama ternário dos principais componentes químicos encontrados no gel de RAA em a) Cimento Portland (Macioski, 2023), b) CAA	146
Figura 74: Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova	155
Figura 75: a) corpos de prova cilíndricos com pinos, b) dispositivo para medição de expansão	156
Figura 76: a) Ensaio de SDT em antamento, b) Cálculo dos índices SDI e PDI	157
Figura 77: a) corpos de prova cortados ao meio, b) microscópio utilizado no ensaio de DRI, c) amostra visível.....	158
Figura 78: Expansão em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA) e CPV para os corpos de prova cilíndricos.....	161
Figura 79: diferença nos resultados das amostras prismáticas moldadas na horizontal e das amostras cilíndricas moldadas na vertical. a) Corpo de prova cilíndrico. b) Corpo de prova prismático. c) Expansões em corpos de prova cilíndricos e prismáticos. d) Variações de massa em corpos de prova cilíndricos e prismáticos.....	162
Figura 80: Variação de massa dos corpos de prova cilíndricos.....	163
Figura 81: Evolução do DRI ao longo do período de avaliação da RAA em corpos de prova cilíndricos.....	164
Figura 82: Características petrográficas dos concretos de CAA e CPV	165
Figura 83: Fissuras observadas nas análises de DRI.....	166
Figura 84: Características microscópicas dos concretos de CAA e CPV	166
Figura 85: Fissuras presentes na pasta de cimento para concretos feitos com CAA	167
Figura 86: Evolução das fissuras na pasta de cimento CPV e CAA.....	168
Figura 87: Tensão-deformação da amostra E para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.	171
Figura 88: Tensão-deformação da amostra ECA para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.	172
Figura 89: Tensão-deformação da amostra EC para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.	172

Figura 90: Tensão-deformação da amostra ECC para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.	173
Figura 91: Índices SDI e PDI obtidos a partir do ensaio de SDT	174
Figura 92: Área de histerese para as amostras E, EC, ECA, ECC e CPV nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.	176
Figura 93: Módulo de elasticidade para as amostras E, EC, ECA, ECC e CPV nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.	177
Figura 94: Valores médios do módulo de elasticidade para as amostras de cimento álcali ativado ao longo das idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses, desvio padrão e análise estatística.	178
Figura 95: Resistência à compressão para as amostras E, EC, ECA e ECC nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.	179
Figura 96: Valores médios de resistência à compressão para as amostras de cimento álcali ativado ao longo das idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses, desvio padrão e análise estatística.	180
Figura 97: Microscopia de varredura eletrônica em concreto de cimento Portland sujeito a RAA, aos 12 meses de idade à 38 ⁰ e umidade de 95%. a) Poro no concreto, b) Poro preenchido por gel de RAA na amostra EC, c) Poro encontrado na amostra ECA.	181
Figura 98: análise de MEV para amostra de CAA - E. a) fissura interface agregado/pasta. b) material depositado na fissura, pontos para análise de EDS	183
Figura 99: fissuras entre o agregado/pasta com material depositado em amostra de ECC.	184
Figura 100: Poros com presença de material com estrutura rendada na amostra EC	185
Figura 101: Diagrama ternário com composições químicas encontradas nas análises de EDS	186
Figura 102: Relações em % atômicas do gel de RAA. a) Cimento Portland (Macioski, 2024) e b) CAA	187
Figura 103: correlação entre variação de massa (%) e Expansão (%) para o ensaio realizado em corpos de provas cilíndricos nas condições de 95% de umidade e 38 ⁰ de cura	189
Figura 104: correlação entre os dados de expansão (%) e resistência à compressão (MPa) das amostras de CAA e CPV.....	190

Figura 105: relação entre a expansão e o módulo de elasticidade nas amostras de CAA e CPV	192
Figura 106: correlação da expansão (%) sobre o SDT (Dano da Rigidez - GPa) nas amostras de CAA e CPV	193
Figura 107: correlação entre os dados de DRI e expansão para as amostras de CAA e CPV.	194
Figura 108: a) correlação entre resistência à compressão e área de histerese e b) correleção entre módulo de elasticidade e área de histerese.....	195
Figura 109: esquema do mecanismo de reação álcali-agregado para cimentos álcali ativados	197

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Minerais e rochas susceptíveis à reação álcali-agregado.....	39
Tabela 2: Limites de álcalis, estipulados internacionalmente, para o controle da expansão devido o uso de agregados reativos	41
Tabela 3: Resumo das condições de teste dos métodos acelerados de avaliação da RAA discutidos na pesquisa.....	54
Tabela 4: Características ponderadas para análise de DRI.....	56
Tabela 5: Características físicas, químicas exigidas pala NBR 15577: 2018 para o cimento	64
Tabela 6: Características físicas dos agregados	66
Tabela 7: Granulometria requerida do material para ensaio.....	67
Tabela 8: Consumo de materiais em kg/m ³ de concreto	68
Tabela 9: Minerais e rochas suscetíveis à RAA.....	72
Tabela 10: Características petrográficas dos agregados e classificação quanto o potencial reativo	73
Tabela 11: Classificação dos agregados quanto os ensaios de expansão realizados.	81
Tabela 12: Caracterização química e física da escória (E), cinza da casca de arroz (CCA) e metacaulim (C).	89
Tabela 13: Percentual retido acumulado (50% e 90%) dos materiais E – Escória, CCA – Cinza da casca de arroz e C - Caulim	91
Tabela 14: Composições utilizadas para a confecção das pastas.....	92
Tabela 15: Composição dos cimentos álcali ativados	112
Tabela 16: Caracterização química dos cimentos utilizados para análise da RAA.....	112
Tabela 17: Tamanhos das partículas retidas acumuladas em 50% e 90%.....	113
Tabela 18: Caracterização física do agregado graúdo utilizado	114
Tabela 19: Composição química do agregado graúdo	116
Tabela 20: Caracterização de agregado miúdo	118
Tabela 21: Faixas granulométricas indicadas pela NBR 15577-4 (2014)	120
Tabela 22: Teor de álcali no CAA (E, ECA, ECC e EC) e no CPV	121
Tabela 23: Classificação das amostras de CAA e CPV quanto à sua reatividade submetidas aos ensaios ABMT, ABCPT, ACPT e CPT.	137
Tabela 24: Relações atômicas (%) encontradas neste estudo e referências	148
Tabela 25: Resumo de principais estudos recentes sobre RAA em CAAs.....	152

Tabela 26: Característica de dano e fator empregado para a RAA	159
Tabela 27: Classificação de dano multiparâmetro baseada nos ensaios SDT e DRI	160
Tabela 28: Relações atômicas (%) encontradas neste estudo e referências	188

LISTA DE ABREVIACÕES

A/C- Realção água/cimento
AAFA – Cinza volante ativada por álcali
AAR – Activated alkali reaction
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABCPT – Accelerated Brazilian Concrete Prism Test
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI - American Concrete Institute
ACPT - Accelerated Concrete Prism Test
AMBT - Accelerated Mortar Bar Test)
ASTM – American Society for Testing and Materials
BR – Brasil
C – Caulim
C/S – Relação óxido de cálcio/sílica
CSA – Canadian Standards Association
CASH – Alumino silicato de cálcio hidratado
CAA – Cemento álcali-ativado
CCA – Cinza da Casca de Arroz
CME – Centro de Microscopia Eletrônica
CP – Cemento Portland
CPT – Concrete Prism Test
CPV – Cemento Portland tipo V
CPV-ARI – Cemento Portland tipo V de Alta Resistência Inicial
CPV-RS – Cemento Portland tipo V Resistente à sulfatos
CSH – Silicato de Cálcio Hidratado
CVA – Cinza volante ativada
DRI - *Damage Rating Index*
DRX – Difração por Raios – X
DTG – Derivada da análise Termogravimétrica
E – Escória
EDS – Espectroscopia por Energia Dispersiva
GCCA - Cement and Concrete Association
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LaME - Laboratório de Materiais e Estruturas
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa – Megapascal
NASH – Alumino silicato hidratado
NBR – Norma Brasileira
NLI – Non-Linear Index
PDI - Plastic Deformation Index
R1 – Grau reativo 1

RAA – Reação álcali agregado

RAC – Reação álcali-carbonato

RAS – Reação álcali-sílica

RILEM – Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

SDT - *Stiffness Damage Test*

TG – Análise termogravimétrica

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UNE - Asociación Española de Normalización

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

WG – Water Glass - Silicato de sódio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVO	26
1.1.1 Objetivo geral.....	26
1.1.2 Objetivos específicos	26
1.2 JUSTIFICATIVA E INOVAÇÃO	27
1.2.1 Justificativa Ambiental	27
1.2.2 Econômica	28
1.2.3 Técnica.....	30
1.2.4 Social.....	32
1.3 ESTRUTURA DA TESE	34
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	37
2.1 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	37
2.2 FATORES QUE INFLUÊNCIAM NA OCORRÊNCIA DA RAA	40
2.2.1 Teor de ácalis	40
2.2.2 Adições minerais.....	41
2.2.3 Condições de exposição.....	42
2.3 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E CIMENTOS ÁLCALI ATIVADOS	44
2.3.1 Efeito de ativadores alcalinos	46
2.3.2 Efeito do tipo de precursor	47
2.3.4 Avaliação de RAS em CAA.....	50
2.4 MÉTODOS ACELERADOS DE AVALIAÇÃO DE RAS.....	51
2.4.1 Expansão em barras de argamassa	51
2.4.2 Expansão em prismas de concreto.....	53
2.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RAS POR ANÁLISE DE DANOS.....	55
2.5.1 <i>Damage Rating Index (DRI)</i>	55
2.5.2 <i>Stiffness Damage Test (SDT)</i>	57
2.5.3 Ensaio de Cisalhamento direto	59
3 ANÁLISE DE REATIVIDADE DOS AGREGADOS.....	61
3.1 INTRODUÇÃO.....	61
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
3.2.1 Materiais	63
3.2.2 Teste acelerado das barras de argamassa (AMBT)	67
3.2.3 Teste de prismas de concreto (CPT)	68
3.2.4 Teste Brasileiro Acelerado em Prismas de Concreto (ABCPT)	69
3.3.1 Análise petrográfica	70

3.3.2 Análise de expansão.....	77
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85

4 DESENVOLVIMENTO DAS PROPORÇÕES DE MISTURA DO CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO.....87

4.1 INTRODUÇÃO.....	87
4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	88
4.2.1 Materiais	88
4.2.2 Métodos.....	91
4.2.2.1 Definição das composições	91
4.2.2.2 Preparação das pastas	92
4.2.2.3 Caracterização das pastas	92
- Resistência à compressão.....	92
- Calorimetria de condução isotérmica.....	93
4.2.2.4 Avaliação da microestrutura	93
4.3 RESULTADOS	95
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103

5 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADOEM CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS106

5.1 INTRODUÇÃO.....	106
5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	111
5.2.1 Materiais	111
5.2.2 Métodos.....	119
5.2.2.1 Teste acelerado das barras de argamassa (AMBT)	119
5.2.2.2 Método de dosagem do concreto para os ensaios de expansão em prismas	120
5.2.2.3 Métodos de avaliação do concreto	121
5.2.2.4 Analise de microestrutura	123
5.3 RESULTADOS	124
5.3.1 Análises de expansão.....	124

6 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO EM CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS COM ABORDAGEM DE EVOLUÇÃO DE DANOS.....151

6.1 INTRODUÇÃO.....	151
6.2.1 Materiais	154
6.2.2. Métodos	155
6.2.2.3 Análise da deterioração dos corpos de prova	156
6.2.2.4 Analise de microestrutura	160
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	161
6.3.2 Análise da deterioração do concreto de CAA considerando a evolução de danos	164

6.3.2.1 Índice de Classificação de Danos (Damage Rating Index) – DRI	164
6.3.2.2 Teste de Dano da Rígidez (Stiffness Damage Test) – SDT	170
6.3.3 Discussão geral dos resultados	189
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	198
7 CONCLUSÕES	200
7.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	201
7.2 ATUAÇÃO NA ELABORAÇÃO DE ARTIGOS NO PERÍODO	201
REFERÊNCIAS	204

1. INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland é uma das principais fontes industriais de emissões de CO₂, liberando cerca de 0,87 a 0,94 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento produzido, o que equivale a aproximadamente 7% das emissões globais. No Brasil, essa indústria contribui com 2,3% das emissões de CO₂ (GCCA, 2021). Desse modo, discutir a produção de cimento e seu impacto negativo sobre o meio ambiente e os recursos ecológicos é um tema recorrente. Segundo a Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA), as indústrias cimenteiras dos países ocidentais firmaram um acordo para atingir a neutralidade de carbono na produção de cimento até o ano de 2050.

Desta forma, há uma crescente necessidade de pesquisas voltadas para o reaproveitamento de subprodutos industriais, especialmente aquelas que visam reduzir o consumo de matérias-primas e evitar a degradação de novas áreas para deposição de resíduos. Além disso, aumentar a vida útil dos materiais à base de cimento para mitigar a demanda por novas estruturas, contribuindo para a redução do consumo excessivo, da emissão de gases poluentes e prejuízos econômicos (Ibrahim et al. 2022).

Nesse cenário, surgem pesquisas que exploram materiais aglomerantes sem clínquer, destacando-se o cimento álcali ativado (CAA), conhecido por seu baixo impacto ambiental. Esse tipo de cimento pode ser produzido a partir de subprodutos industriais e aluminossilicatos naturais, que são ativados mediante uma solução alcalina, considerando-se assim materiais de baixa energia incorporada e baixo carbono incorporado (Yao et al., 2024). Além disso, o CAA possui uma formulação que permite o uso de uma variedade de materiais adaptando-se as matérias primas de cada região, o que também resultaria numa redução significativa no custo dos materiais de construção e na gestão eficaz de vários materiais residuais (Nedeljković; Li et al. 2018; Ibrahim et al. 2022; Yao et al. 2024; Frare; Angulski da Luz; Medeiros, 2024).

A durabilidade dos materiais cimentícios está intimamente ligada aos seus componentes, ao ambiente de exposição das estruturas e às propriedades físico-químicas dos produtos resultantes do processo de hidratação do cimento. Dentre as várias formas de deterioração das estruturas de concreto, encontram-se manifestações relacionadas à reação álcali agregado (RAA). A mesma ocorre principalmente pela combinação de três

fatores: elevado teor de álcalis, agregado reativo e presença de umidade (Fournier; Bérubé, 2000).

De forma geral, para que não ocorra a RAA, basta selecionar agregados não reativos. Porém, muitas vezes faltam estudos que permitam classificar os agregados como reativos ou não, além de a maioria das vezes essas obras ocorrerem em locais de difícil acesso e assim tornar-se mais viável a utilização de material encontrado nas proximidades. Outro caso refere-se a países como o Canadá, no qual a maioria dos agregados é reativa e assim necessitam buscar outras formas de mitigação da RAA (Frare et al. 2023).

No Brasil os estudos relacionados à RAA, referem-se à catalogação de obras com indícios de RAA, na maioria dos casos usinas hidroelétricas (Pagan Hasparyk, 2005; Andrade, 2006; Silva, 2007; Marques, 2009; Zambotto, 2014; Sato, 2017) e caracterização de agregados em parceria com a Associação Brasileira de cimento Portland (Battagin, 2016).

Considerando todos os tópicos apontados, o estudo de novos materiais que reduzam os impactos ambientais causados pelo cimento e que tenha bom desempenho quanto à durabilidade é um assunto relevante.

Sobre este tema, deve-se destacar que o CAA apresenta diversas vantagens, tanto ambientais quanto de desempenho mecânico. Ele é resistente ao fogo (Kong; Sanjayan, 2010) e a ataques por sulfatos (Bakharev, et al. 2002 e Chindaprasirt et al. 2013) além de liberar pouco calor durante a hidratação, o que é benéfico para grandes construções (Frare et al., 2024b). No entanto, a alta alcalinidade do ativador usado no CAA levanta preocupações sobre sua susceptibilidade à reação álcali-agregado. Este é um exemplo da importância de investigar a durabilidade desse material para que ele possa ser mais amplamente aceito no mercado e considerado um produto confiável (Mohammadi; Ghiasvand; Nili, 2020).

Os estudos relacionados à RAA em CAA apresentam-se em uma quantidade muito menor quando comparado ao cimento Portland (CP), além de apresentar resultados conflitantes. Alguns indicam que argamassas de CAA não apresentam expansões por RAA (Davidovits, 2005), outros apresentam expansões, porém menor que o CP (Fernandez-Jimenez; García-Lodeiro; Palomo, 2007; Rodríguez et al., 2008; Moraes et al., 2021) e

existem os que demonstram maiores expansões que o CP (Krivenko et al., 2014; Tänzer; Jin; Stephan, 2017).

A complexidade intrínseca dos materiais ativados por álcalis pode representar um desafio significativo na abordagem de seus aspectos de durabilidade. Ao contrário dos materiais cimentícios convencionais, a melhoria dessas propriedades de durabilidade não pode ser alcançada apenas pelo controle de parâmetros limitados, como a relação água/cimento, dosagem do ligante e tipo de ligante. Os mecanismos de degradação desses ligantes são influenciados por diversos fatores, incluindo características da mistura, composição química, finura e teor amorfos dos precursores, tipo e molaridade do ativador, módulo de silicato, regime de cura (Paruthi et al., 2022; Sahoo; Singh, 2022; Ahmad et al., 2022; Alexander; Shashikala, 2022; Ekinci, 2023; Jegan; Annadurai; Kannan Rajkumar, 2023; Raut; Lal Murmu; Alomayri, 2023).

No que tange à avaliação da RAA em CAA, os métodos utilizados são frequentemente normatizados com base no comportamento do CP. Apesar disso, esses métodos são debatidos e criticados quanto à sua aplicabilidade ao CAA, como é o caso do teste acelerado em barras de argamassa. Este teste, caracterizado por condições de exposição severas, não representa fielmente a realidade das estruturas e suscita diversas dúvidas por parte de pesquisadores (Thomas et al., 2006; Wood, 2017; Golmakani; Hooton, 2019). Ademais, há uma escassez de testes acelerados disponíveis para avaliar a performance a longo prazo dos CAA, e sua aplicação pode ser ineficaz devido às diferenças de composição entre os CAA e os materiais de CP.

Diante desse cenário, métodos complementares que proporcionem uma análise mais abrangente dos mecanismos de degradação têm sido explorados, com destaque para os ensaios de dano, como o *Stiffness Damage Test* (SDT) e o *Damage Rating Index* (DRI). O SDT quantifica a perda de rigidez do material por meio de ciclos de carregamento-descarregamento, sendo sensível à presença e ao grau de microfissuração no concreto, permitindo inferências sobre o grau de comprometimento estrutural de amostras afetadas por reações expansivas. Já o DRI consiste em uma metodologia semi-quantitativa baseada na contagem petrográfica de indicadores de dano (como fissuras em agregados, contorno de partículas e presença de gel), fornecendo um índice de deterioração que pode ser correlacionado com diferentes mecanismos patológicos. Ambos os métodos têm sido utilizados em estudos de avaliação de estruturas afetadas por RAA em concretos com

cimento Portland (Sanchez, 2014; Sanchez, 2015, 2016a; De Souza; Antunes; Sanchez, 2022), sua aplicação em cimentos álcali ativados ainda não foi estudada, o que evidencia a necessidade de investigações sobre sua viabilidade e desempenho nesse novo contexto. A introdução desses ensaios pode representar um avanço na compreensão dos mecanismos de dano em sistemas cimentícios alternativos e na avaliação da sua durabilidade em condições agressivas.

Diante dessas discussões, este estudo propõe analisar a RAA em cimentos álcali ativados, levando em consideração diferentes condições de exposição e materiais suplementares, com o objetivo de compreender os aspectos relacionados às distintas técnicas de avaliação.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Investigar o mecanismo e a cinética de desenvolvimento da RAA em CAA, aplicando diferentes métodos de indução da RAA e abordando a avaliação da expansão, evolução de danos e modificações na microestrutura do compósito cimentício.

1.1.2 Objetivos específicos

- Contribuir para a caracterização de agregados disponíveis no estado do Paraná, quanto a sua reatividade frente a diferentes métodos avaliativos;
- Investigar e desenvolver proporções de mistura de CAA aprimoradas para submeter aos testes de reação álcali-agregado;
- Estudar diferentes condições de exposição através da aplicação de métodos de avaliação distintos da RAA para o CAA.
- Analisar os danos gerados pela RAA, a partir de ensaios de SDT e DRI e seu comportamento no CAA em comparação com o Cimento Portland (CPV);

- Avaliar o impacto da retração inicial no comportamento do CAA, em relação à a expansão por RAA a deterioração.

1.2 JUSTIFICATIVA E INOVAÇÃO

1.2.1 Justificativa Ambiental

A indústria do cimento é uma das maiores responsáveis pelas emissões globais de CO₂, com estimativas que indicam cerca de 5 a 8% do total de emissões, ou aproximadamente 2,2 bilhões de toneladas anuais (Fennell et al., 2021). Este impacto ambiental tornou-se um dos focos principais das agendas climáticas internacionais, sendo discutido em conferências como a COP29 e com novos compromissos estabelecidos na COP30, que ocorrerá no Brasil em 2025 (Perilli, 2025). O Brasil se comprometeu a reduzir 50% de suas emissões até 2030 e atingir a neutralidade de carbono até 2050 (CBIC, 2025). O setor da construção civil e da indústria cimenteira, está alinhado a essas metas e tem buscado alternativas sustentáveis para reduzir seu impacto, sendo os CAAs uma alternativa mais promissora.

Em sua produção, os CAAs, não envolvem o processo da calcinação de calcário e argila a altas temperaturas, demonstrando uma redução de até 57% nas emissões de CO₂, em comparação com o cimento Portland tradicional (Komkova; Habert, 2023). Em vez disso, os CAAs contribuem para a economia circular ao reutilizar resíduos industriais e agroindustriais, como cinza de casca de arroz, escória de alto-forno e argilas naturais como o caulim, como matérias-primas (CBIC, 2025). A escória de alto-forno, por exemplo, é um subproduto da indústria siderúrgica e o uso da cinza de casca de arroz evita sua dispersão no ar e na água, transformando um passivo ambiental em um recurso valioso. O caulim, que não necessita de calcinação para ser utilizado, também reduz a energia e as emissões associadas à produção de cimento convencional (Payá et al., 2022).

Os CAAs têm ainda o potencial para melhorar a durabilidade das estruturas, o que, a longo prazo, contribui para a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de manutenção e reconstrução. Uma maior durabilidade significa menos necessidade de recursos e menos geração de resíduos, alinhando a construção civil às metas de descarbonização globais.

No entanto, a durabilidade dos CAAs em condições práticas, especialmente sob a ação da RAA, ainda não foi completamente investigada (Li et al., 2023).

Alguns estudos, como os de Moraes et al., (2021) e Puertas et al., (2009), indicam que a expansão por RAA em argamassas e concretos de CAAs é menor do que no cimento Portland, enquanto outros, como Krivenko et al., (2014) e Tänzer et al., (2017), relatam expansões maiores. A resposta do CAA à RAA e sua durabilidade em diferentes condições climáticas e ambientais precisam ser analisadas com mais profundidade, pois essas características influenciam diretamente a viabilidade do uso de CAAs em construções estruturais duráveis (Li et al., 2023).

O estudo da durabilidade desses materiais e do comportamento da RAA em sua matriz cimentícia é fundamental para garantir que os CAAs possam ser utilizados com segurança em grande escala, promovendo não apenas a sustentabilidade da construção civil, mas também contribuindo significativamente para os esforços globais de redução de emissões de CO₂.

1.2.2 Econômica

A RAA representa uma das principais causas de deterioração de estruturas de concreto em todo o mundo, com impactos não apenas sobre a segurança, mas também sobre os custos de manutenção e reparo de obras públicas e privadas (Tanesi, 2021). Nesse contexto, a análise da RAA em sistemas cimentícios alternativos se configura como um tema de interesse estratégico, diante da busca por soluções mais duráveis e econômicas para o setor da construção civil.

Além disso os CAAs apresentam viabilidade econômica, sobretudo por utilizarem resíduos industriais abundantes no Brasil, como escória de alto-forno, cinza de casca de arroz (CCA) e caulim. Esses materiais, muitas vezes tratados como passivos ambientais, podem ser reaproveitados como precursores ou adições cimentícias em misturas ativadas, promovendo a economia circular e reduzindo a dependência de matérias-primas naturais. Além disso, o uso desses subprodutos diminui o custo de produção quando comparado ao cimento Portland convencional, cuja fabricação envolve a queima de calcário e altos gastos

energéticos associados à produção de clínquer, principal responsável pelas emissões de CO₂ no setor (Gomes da Silva; Meng, 2006; Frare et al., 2024a; Frare et al., 2024b).

A possibilidade de empregar esses resíduos em larga escala é especialmente relevante no cenário brasileiro. A indústria siderúrgica nacional produz de 6,7 e 10,1 milhões de toneladas de escória anualmente, parte das quais não é aproveitada como material cimentício (IABr, 2025). O mesmo ocorre com a cinza de casca de arroz, gerada em grandes volumes nas regiões produtoras de arroz e frequentemente descartada sem uso (Tashima et al., 2012). O aproveitamento direto do caulim, sem calcinação, também reduz custos energéticos e emissões associadas, o que torna os CAAs ainda mais atrativos do ponto de vista econômico (Gomes da Silva; Meng, 2006). Ao valorizar esses materiais locais, há uma redução nos custos logísticos, incentivo ao desenvolvimento regional e fortalecimento de uma cadeia produtiva mais sustentável.

Além disso, a tendência de precificar emissões de carbono torna o cimento convencional mais caro no longo prazo – na União Europeia, por exemplo, fabricantes de cimento já precisam pagar por parte de suas emissões de CO₂ (Palomo et al., 2021). Nesse contexto, cimentos alternativos de baixo carbono como os CAAs tornam-se cada vez mais atraentes economicamente.

Do ponto de vista da manutenção de estruturas, o estudo da RAA em CAAs é estratégico. Diversas estruturas ao redor do mundo evidenciam os impactos técnicos e financeiros causados pela RAA. A Usina Hidrelétrica de Mactaquac, no Canadá, por exemplo, enfrenta gastos anuais entre US\$ 6 e 7 milhões com medidas mitigadoras para garantir a segurança da operação, devido à necessidade de monitoramento contínuo e alívio de tensões internas provocadas pela reação. Na Austrália, a Ponte Munna Point, em Queensland, demandou mais de US\$ 5 milhões em reparos e reforços nas estacas afetadas pela reação álcali-sílica. Já no Aeroporto Internacional de Denver, nos Estados Unidos, diversas pistas apresentaram fissuração e expansão indesejada, levando a intervenções custosas que chegaram a valores entre US\$ 10 e 30 milhões por pista, tudo isso sem interromper as atividades do aeroporto (Tanesi, 2021). No Brasil, barragens hidrelétricas e estruturas de grande porte já apresentaram manifestações da RAA, exigindo monitoramento constante e medidas corretivas com alto custo(Funahashi et al., 2023). Se os CAAs demonstrarem menor suscetibilidade à RAA ou maior capacidade de resistir aos

seus efeitos, será possível reduzir de forma significativa os gastos com recuperação e prolongar a vida útil das estruturas.

Estruturas mais duráveis requerem menos intervenções ao longo do tempo, o que dilui o investimento inicial e reduz o custo total de propriedade. A estimativa do Banco Mundial em 2015 era de que cerca de 6% do PIB mundial era consumido com manutenção de infraestrutura (Ruiz-Nuñez; Wei, 2015); melhorar a durabilidade do concreto por meio de materiais como os CAAs contribui diretamente para aliviar esse peso econômico, liberando recursos para novos investimentos.

Além disso, a adoção de ensaios avançados como o Damage Rating Index (DRI) e o Stiffness Damage Test (SDT) no estudo da RAA em CAAs possibilita a detecção precoce de danos, o que permite a realização de manutenções preventivas mais baratas e eficazes, além de reduzir custos com inspeções corretivas e emergenciais (Funahashi et al., 2023).

Em um cenário de escassez de recursos públicos e alta demanda por infraestrutura resiliente, estudar a durabilidade dos CAAs frente à RAA representa não apenas uma contribuição científica, mas também uma resposta econômica aos desafios da construção civil nacional. Trata-se de um investimento estratégico em inovação, que pode reduzir custos com materiais, diminuir os impactos de manifestações patológicas estruturais e valorizar resíduos industriais abundantes. A longo prazo, a implementação de CAAs com desempenho comprovado frente à RAA pode reduzir o custo total de obras públicas e privadas, melhorar a eficiência dos investimentos em infraestrutura e estimular uma economia mais sustentável, competitiva e circular.

1.2.3 Técnica

Os CAA vêm ganhando destaque como alternativa sustentável ao cimento Portland convencional, pois aproveitam subprodutos industriais como escória de alto-forno, cinza de casca de arroz e caulim calcinado (metacaulim) na produção de ligantes de baixo impacto ambiental. No entanto, embora essas matrizes cimentícias alcali ativadas possam exibir desempenho superior em relação aos materiais à base de Portland convencional, seu

comportamento frente à RAA permanece menos investigado e compreendido (Shi et al., 2015a; Moreira et al., 2021).

A RAA é uma patologia bem conhecida em concretos de cimento Portland e já foi amplamente estudada nesse contexto, ao passo que nos CAA há lacunas de conhecimento que motivam precaução na sua aplicação estrutural quando se empregam agregados potencialmente reativos (Wang; Noguchi, 2020). Assim, torna-se necessário aprofundar os estudos de durabilidade dos CAA, particularmente no tocante à suscetibilidade à RAA, de forma a assegurar que a adoção desses ligantes ecológicos não comprometa a vida útil das estruturas.

A avaliação da RAA normalmente se baseia em métodos normativos, que medem a expansão em prismas ou barras de argamassa, notadamente os ensaios acelerados como método das barras de argamassa e prisma de concreto, além do método RILEM, entre outros (Shi et al., 2015a). No entanto, esses métodos não detectam diretamente os danos internos, como fissuras e perda de resistência, o que é uma limitação importante, especialmente no caso do concreto com CAA. Isso porque, nesse tipo de concreto, expansões pequenas não garantem ausência de danos. Por isso, é necessário usar métodos complementares que avaliem os danos internos de forma mais completa.

Diante das limitações dos métodos tradicionais, esta pesquisa propõe aplicar ao CAA ferramentas diferentes como o *Damage Rating Index* (DRI) e o *Stiffness Damage Test* (SDT), originalmente usados em concretos convencionais. O DRI é um método petrográfico que quantifica o dano interno causado pela RAA, permitindo avaliar a natureza e intensidade da deterioração (Sanchez, 2015). O DRI se correlaciona bem com a expansão e o avanço da reação, sendo útil para verificar se os padrões de fissuração e produtos de reação no CAA diferem dos observados no cimento Portland.

O *Stiffness Damage Test* (SDT) é uma ferramenta mecânica usada para quantificar a perda de rigidez causada pela RAA, por meio de ensaios de carregamento cíclico. Ele fornece índices como o SDI e o PDI, que indicam a extensão da microfissuração interna. O SDT é sensível para detectar danos antes mesmo de grandes expansões externas ocorrerem (Sanchez, 2014). Aplicado ao CAA, o método permitirá avaliar a perda de rigidez e integridade mecânica provocada pela RAA, aspecto essencial para a segurança estrutural e não detectado pelos métodos tradicionais.

É importante destacar que a utilização do DRI e do SDT nesta investigação virá acompanhada da correlação com os resultados dos ensaios de expansão convencionais em argamassas e concretos. Esse cruzamento de informações permitirá verificar a correspondência entre expansão e dano efetivo para os CAA, algo já explorado em estudos com concretos convencionais (Sanchez, 2016).

A caracterização química e morfológica dos produtos da RAA será essencial para entender os mecanismos de deterioração em CAA, cujas matrizes diferem do concreto convencional (Li; Khatri; Khosla, 2010). Devido à composição química distinta, a formação e composição do gel de RAA podem variar. Serão utilizadas técnicas como MEV-EDS para identificar os produtos da reação. Essa análise microestrutural complementará os ensaios de dano e expansão, oferecendo suporte para interpretar os resultados e entender os processos físico-químicos envolvidos na RAS em sistemas ativados.

Os resultados obtidos nessa investigação oferecerão uma contribuição decisiva para validar a durabilidade dos CAA frente à reação álcali-agregado, apoiando sua adoção segura em aplicações estruturais de longo prazo. Ao demonstrar-se, através de métricas de dano (DRI, SDT) correlacionadas com expansões e análises químicas, como esses novos ligantes se comportam em presença de agregados reativos, será possível estabelecer critérios de desempenho e diretrizes de projeto específicas para CAA, análogas às já existentes para concretos de cimento Portland.

1.2.4 Social

deterioração progressiva causada pela RAA compromete a capacidade estrutural ao longo do tempo, podendo levar a situações críticas e até à demolição preventiva de estruturas. No Reino Unido, a ponte Merafield Bridge, em Plympton, teve de ser demolida após poucas décadas de uso devido ao risco de colapso (Global Highways, 2023). De forma semelhante, uma ala do Hospital Royal Devon and Exeter foi demolida nos anos 1990 por danos causados pela reação (Exeter Memories, 2014). Um caso ainda mais grave é o da barragem Mactaquac, no Canadá, cuja RAA generalizada reduziu sua vida útil em quase 40 anos, exigindo uma reconstrução prevista até 2028 (CBC NEWS, 2014). Os impactos sociais decorrentes dessa deterioração são severos: desabrigados, feridos, interrupção de

serviços públicos e, em casos extremos, perdas de vidas humanas. Esses exemplos reforçam a necessidade de monitoramento e intervenção precoce frente à RAA.

Uma vez iniciada, a RAA é difícil de conter e sua progressão pode levar a fissuras internas, perda de resistência e até colapsos estruturais. Além disso, edificações com valor histórico e cultural, construídas em concreto armado, podem sofrer danos irreparáveis, resultando na perda de patrimônio e memória coletiva, como é o caso da demolição da ponte histórica Sixth Street Viaduct, em Los Angeles (Campa; McMullin; Gilbert, 2020).

Na área da habitação, os CAAs apresentam potencial para a produção de blocos e componentes construtivos mais acessíveis e duráveis, beneficiando programas de moradia popular (Robayo-Salazar et al., 2021). Ao utilizar materiais de baixo custo, como cinza de casca de arroz, escória de alto-forno e caulim, o custo final das construções pode ser reduzido, ampliando o acesso à moradia digna, especialmente em regiões com grande déficit habitacional. Habitações mais duráveis também reduzem os gastos com manutenção ao longo do tempo, aliviando o orçamento familiar e o custo público com reabilitação de unidades danificadas (Moseson et al., 2012).

No campo da saúde pública, o uso de CAAs pode ajudar a mitigar os impactos negativos associados à cadeia produtiva do cimento Portland, que responde por 7% a 9% das emissões globais de CO₂ e é uma das maiores fontes industriais de poluentes atmosféricos (Śłosarczyk et al., 2023). A substituição progressiva do clínquer por materiais alternativos pode contribuir para a melhora da qualidade do ar, especialmente em comunidades vizinhas a polos cimenteiros e pedreiras, que sofrem com poeira, emissão de gases tóxicos e resíduos sólidos (Raffetti et al., 2019). Além disso, os resíduos usados nos CAAs, como escórias e cinzas, podem ser quimicamente estabilizados na matriz cimentícia, minimizando riscos ambientais e sanitários (Śłosarczyk et al., 2023).

Outro ponto relevante é o impacto positivo que a adoção dos CAAs pode gerar na economia local e na geração de empregos. ao incentivar o reaproveitamento de resíduos industriais e agroindustriais, como a cinza de casca de arroz em regiões arrozeiras ou o resíduo de caulim em regiões mineradoras (Śłosarczyk et al., 2023).

Assim, estudar a RAA em CAAs não é apenas uma questão técnica e científica, mas uma ação com impactos no bem-estar social. Ao garantir a segurança, durabilidade e viabilidade dos CAAs, promove-se a construção de moradias acessíveis, cidades mais

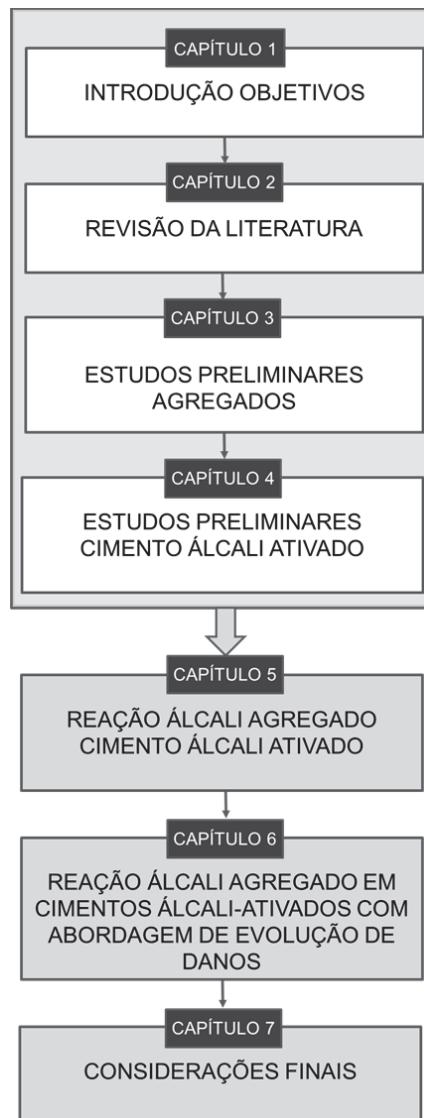
resilientes, valorização cultural, melhoria da saúde coletiva e ambiental (Alrawashdeh et al., 2024). O conhecimento gerado por esta tese contribui diretamente para que a engenharia civil avance de forma responsável, aliando inovação a compromisso social.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho aborda diferentes métodos de avaliação para a reação álcali agragado e visa contribuir com a literatura no que diz respeito a sua ocorrência em cimentos álcali ativados. Assim, a tese está dividida em 7 capítulos, conforme a Figura 1. Os capítulos 3 a 5 são independentes e cada um deles contém introdução, programa experimental, resultados, discussão e considerações finais.

Foram realizadas revisões sistemáticas sobre os temas abordados. A revisão está contida na introdução de cada capítulo. E, a partir dessa ferramenta os pontos de destaque e inovação são apontados nos próprios capítulos, sendo baseados em dados da literatura.

Figura 1: Estrutura da tese



Capítulo 2 - Revisão da Literatura;

- Abrange conceitos e uma breve revisão sobre a reação álcali agregado e seus fatores de influência, seguindo uma breve revisão sobre reação álcali agrgado em cimento álcali ativado. O tema de cada capítulo independente será discutido de forma direcionada na introdução do mesmo capítulo.

Capítulo 3 - Análise de reatividade dos agregados;

- Apresenta a caracterização e coleta dos agregados utilizados. O capítulo também aborda o teste acelerado de barras de argamassa e prismas de concreto prescritos na NBR 15577:2008 e o teste acelerado em concreto,

desenvolvido por Sanchez; Kuperman; Helene (2011) a fim de compará-los e utilizá-los como parâmetros para obter uma classificação orientativa da reatividade dos agregados selecionados.

Capítulo 4 - Ensaios preliminares – Desenvolvimento do cimento álcali ativado;

- Apresenta a escolha e caracterização dos materiais e desenvolvimento do cimento álcali ativado, bem como o estudo relacionado ao processo de hidratação, características mecânicas e microestruturais do mesmo.

Capítulo 5 – Estudo da Reação álcali agregadoem cimentos álcali ativados;

- Apresenta um breve referencial bibliográfico sobre o tema, metodologias de avaliação variadas a fim de comparar, minimizar os resultados contraditórios e entendimento da reação com materiais suplementares de baixo teor de cálcio e presença de aluminossilicatos.

Capítulo 6 - Reação álcali agregadoem cimentos álcali-ativados com abordagem de evolução de danos

- Apresenta uma análise da literatura e a discussão dos resultados experimentais relacionados à RAS em CAA, com base em ensaios de expansão, SDT, DRI e propriedades mecânicas. A abordagem integrada desses métodos permite avaliar os efeitos da reação e compreender seu mecanismo no CAA.

Capítulo 7 - Considerações finais;

- Neste último capítulo são apresentadas as conclusões globais da pesquisa, as quais buscam correlacionar os resultados e apontar os mais importantes. Além de apresentar as perspectivas futuras e contribuições relativas ao desempenho da RAS frente às propostas apresentadas neste estudo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

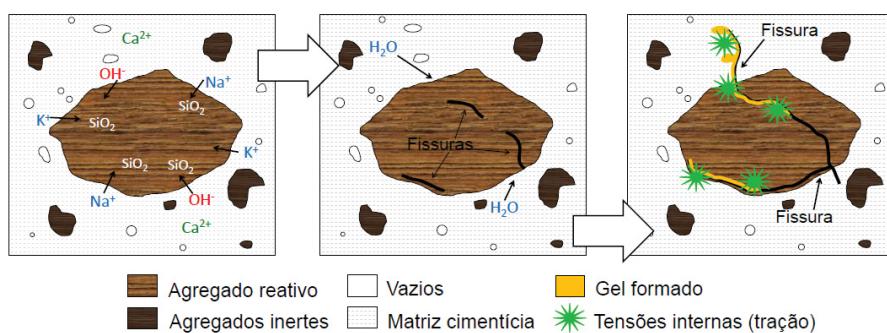
2.1 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Em 1940, Staton publicou seu primeiro estudo sobre a RAA, após observar a deterioração de pavimentos na Califórnia. Esse marco inicial despertou o interesse de diversos pesquisadores no tema (Gillott, 1975; Forster et al., 1998; Fournier; Bérubé, 2000).

Desde a identificação do primeiro caso de RAA em estruturas de concreto, inúmeras obras foram inspecionadas e diagnosticadas com sinais dessa reação, o que estimulou a realização de muitas pesquisas. A RAA foi definida como uma reação entre componentes reativos dos agregados e hidróxidos alcalinos, especificamente os íons Na^+ , K^+ e OH^- , presentes na matriz cimentícia. Em presença desses íons, a alcalinidade dos poros do concreto permanece elevada, o que pode desencadear a RAA (McCartney da Fonseca et al., 2018; Olajide; Nokken; Sanchez, 2024).

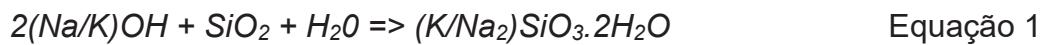
Alrawashdeh et al., (2024) e Olajide; Nokken; Sanchez, 2024 indicam três condições propícias para o desencadeamento e manutenção da RAA: reatividade dos agregados, alcalinidade do aglomerante e presença de umidade. Nessas condições, a RAA leva à formação de um gel expansivo que se acumula nas fissuras dos agregados ou em sua superfície, gerando tensões internas no concreto. Essas tensões podem provocar a degradação da estrutura, resultando em trincas e fissuras que facilitam a entrada de outras soluções deteriorantes (Hasparyk, 2022; Yang; Poon; Cui, 2023). A Figura 2 apresenta um esquema de deterioração por RAA.

Figura 2: Esquema da RAA



FONTE: Langaro (2023).

A categorização do tipo de RAA identificada em cada estrutura de concreto está diretamente ligada ao tipo e à mineralogia do agregado reativo envolvido no processo. A Reação Álcali-Carbonato (RAC) é caracterizada por mecanismos de degradação e desenvolvimento ainda pouco conhecidos e estudados, sendo predominantemente observada em agregados de origem calcária e dolomítica. Por outro lado, a reação álcali-sílica (RAS), mais comumente encontrada em estruturas de concreto, resulta da interação de diferentes formas de sílica reativa presentes nos agregados. Seu mecanismo de reação pode ser descrito conforme a Equação 1 (Alexander, 2019).



Os grupos silanol (Si-OH) e siloxano (Si-O-Si), presentes na estrutura da sílica nos agregados, são suscetíveis ao ataque por íons hidroxila, resultando na substituição por pares de SiO^- . Em seguida, os cátions (Na^+ e K^+), atraídos pelos ânions, contribuem para a formação de um gel sílico-alcalino composto por silicato de sódio ou potássio, em diversas proporções, podendo ainda incorporar íons de cálcio presentes na solução (McCartney da Fonseca et al., 2018; Mohammadi; Ghiasvand; Nili, 2020).

Essa reação promove a degradação da estrutura original da sílica, facilitando a absorção de mais álcalis e água (Taylor, 1997; Olajide; Nokken; Sanchez, 2024). A presença e a quantidade de íons (Na^+ , K^+ e Ca^{2+}) podem influenciar as características do gel resultante. Em ambientes com elevada concentração de Ca^{2+} , este pode ser absorvido pelo gel, formando como produto final o CSH, que não é expansível e contribui para o aumento da resistência, porém mesmo assim o dano é ocasionado. Por outro lado, o gel formado em ambientes com predominância de Na^+ e K^+ tende a expandir quando exposto à umidade (Frýbort et al., 2018; Leemann; Shi; Lindgård, 2020a).

A variedade de formações e origens dos agregados pode implicar na presença de fases reativas. A norma NBR 15577:2018 – Parte 3 fornece uma lista dessas rochas e minerais suscetíveis à ocorrência da reação, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Minerais e rochas susceptíveis à reação álcali-agregado

Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica metaestável e vídros vulcânicos		
Material Reativo	Rochas de ocorrência	
	Rochas sedimentares	Rochas vulcânicas
Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico	Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito	Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riólito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítreia, além de alguns basaltos
Rochas potencialmente reativas contendo quartzo		
Material Reativo	Tipos de rocha	
Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino.	Chert, veio de quartzo, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso e calcário com quartzo microgranular disperso.	
Quartzo macrograular fraturado, e/ou deformado, podendo conter agregados de quartzo microcristalino no contato do grão (textura mortar)	Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino. Outras rochas que contenham quartzo deformado, microcristalino ou criptocristalino, tais como: <ul style="list-style-type: none"> • Rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito (desde que apresentem feições e fases indicativas de reatividade) • Rochas sedimentares: grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso e arcóseo • Rochas metamórficas: gnaisse, quartzo-mica xisto, quartzito, filito, ardósia, rochas miloníticas e cataclásticas 	

FONTE: Adaptado NBR 15557: 2018.

Um dos aspectos determinantes para a intensidade da reação é o nível de reatividade dos agregados, ou da sílica reativa no caso da Reação Álcali-Sílica (RAS) (Marzouk; Langdon, 2003; Binal, 2015). Adicionalmente, Alexandre (2019) menciona a existência de outros minerais com potencial reativo aos álcalis presentes na matriz do concreto.

2.2 FATORES QUE INFLUÊNCIAM NA OCORRÊNCIA DA RAA

2.2.1 Teor de álcalis

Os álcalis presentes nas soluções dos poros de concreto são um dos fatores mais importantes no desenvolvimento da RAA (Fournier; Bérubé, 2000; Mohammadi; Ghiasvand; Nili, 2020). Uma parcela de álcalis é proveniente dos agregados utilizados, materiais pozôlanicos (Thomas, 2011; Rajabipour, 2015) e fontes externas (RAJABIPOUR et al., 2015), mas a principal contribuição é proveniente do cimento utilizado (Yujiang; Min; Mingshu, 2008; Frýbort et al., 2018; McCartney da Fonseca et al., 2018).

O teor de óxido de sódio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) quantifica o teor de álcalis presentes no cimento e pode ser calculado a partir da Equação 2.

$$\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \Rightarrow \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O} \quad \text{Equação 2}$$

A constante 0,658 presente na equação é originada da razão entre a massa atômica do Na_2O e o K_2O .

Estudos relacionados ao teor de álcalis presente no cimento vêm sendo realizados desde 1960, onde se indica um limite de até 0,6% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (Alexander, 2019), o qual é aceito até os dias atuais. Em casos onde se faz o uso de agregados reativos em estruturas de concreto armado, a norma NBR 15577:2018 indica-se um teor máximo de 2,4 kg/m³ de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ no concreto, conforme, sendo assim controlado normalmente pelo tipo de cimento empregado (Alexander, 2019).

Teores alcalinos acima de 0,6% em cimentos apresentam expansões devido à RAA significativamente maiores do que em cimentos de baixo teor de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ para um mesmo tipo de agregado. Isso porque os teores de álcalis presentes nos poros têm influência na reatividade do agregado, na dissolução da sílica e no grau da reação (Shehata; Thomas, 2015; Frýbort et al., 2018).

Porém os limites de álcalis aceitos presentes no cimento variam de acordo com os países e suas normas como se observa na Tabela 2 (Alexander, 2019). Além disso, é importante ressaltar que o grau de reatividade dos agregados, o ambiente em que a estrutura está inserida, a utilização dos materiais e os parâmetros de dosagem podem auxiliar na inibição da RAA.

Tabela 2: Limites de álcalis, estipulados internacionalmente, para o controle da expansão devido o uso de agregados reativos

País	Limite de álcali total especificado para concreto (kg/m ³)
Estados Unidos (ASTM C1567, 2013; ASTM C1293, 2018)	1,8-3,0
Canadá (CSA A23.1 e 2, 2014)	2,0-3,0
Reino Unido (BRE Digest 330.2, 2004)	3,5
RILEM-AAR 7.1 – 2016	2,5-3,5
Japão (JIS A5308, 2009)	3,0
Austrália (HB 79, 2015)	2,8
Nova Zelândia (CCANZ TR3, 2012)	2,5
África do Sul (SANS 6245, 2006)	2,0-4,0
Brasil (NBR 15577, 2018)	2,4

FONTE: Adaptado de (Alexander, 2019).

2.2.2 Adições minerais

A utilização de adições minerais em concretos visando à mitigação da RAA é objeto de estudo de diversos pesquisadores. Sabe-se que adições de natureza silicosa e sílico-aluminosa, dotadas de propriedades pozolânicas, têm o potencial de reduzir ou retardar os efeitos da RAA (Boddy; Hooton; Thomas, 2003; Thomas, 2011; Abbas; Kazmi; Munir, 2017).

A portlandita gerada durante a hidratação do cimento, juntamente com a reação pozolânica e a formação de silicato de cálcio hidratado, reduz a quantidade de álcalis presentes nos poros por meio do consumo de cálcio na reação (Thomas, 2011; De Medeiros et al., 2017; Filho et al., 2017; Leemann; Shi; Lindgård, 2020a). O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) resultante das reações pozolânicas apresenta uma relação C/S menor, o que melhora a capacidade de ligação dos álcalis (Na^+ e K^+), reduzindo o teor desses íons nos poros do concreto (Thomas, 2011; Abbas; Kazmi; Munir, 2017; Frýbort et al., 2018).

Geralmente, as adições minerais empregadas para reduzir a RAA possuem partículas de tamanho reduzido, o que promove um efeito físico ao melhorar o empacotamento dos grãos, refinar os poros, densificar a matriz cimentícia e, consequentemente, tornar o concreto menos permeável, além de auxiliar na hidratação do cimento (Berodier; Scrivener, 2014). Partículas finas, como as adições pozolânicas, favorecem sua reatividade com a portlandita, levando em consideração sua estrutura, composição química e quantidade adicionada (Shehata; Thomas, 2002; Filho et al., 2017). Em quantidades inadequadas, as adições minerais podem não ser eficazes, dependendo das condições que envolvem a RAA (Thomas, 2011). Observa-se também uma diferença na escala de tempo em que a RAA e a reação pozolânica ocorrem, podendo ser aceleradas ou retardadas em função do tamanho das partículas do material silicoso (Thomas, 2011; Olajide; Nokken; Sanchez, 2024).

O uso de materiais cimentícios suplementares ricos em alumínio (Al) têm demonstrado eficácia na redução da expansão do concreto causada pela Reação Álcali-Sílica (RAS). No entanto, o papel do Al na mitigação da formação e estrutura dos produtos resultantes da RAA ainda é pouco compreendido (Zhenguo; Bin; Lothenbach, 2021). Estudos apontaram que a principal razão para a atuação do Al na mitigação da RAS reside na absorção deste elemento na superfície da sílica, limitando assim a dissolução da sílica amorfa (Chappex; Scrivener, 2012a, 2012b, 2013; Bernard; Leemann, 2015; Leemann et al., 2015). Outra explicação sugere a formação inicial de silicato de alumínio na superfície da sílica, seguida pela precipitação de zeólitas, que, por sua vez, inibem a RAS ao reduzir a concentração da chamada sílica "livre" disponível para a reação (Hünger, 2007). Zhenguo, Bin e Lothenbach (2021) constataram que a presença de Al em concentração inferior a 0,1 mM não previne a ocorrência da RAA nem altera a estrutura dos produtos cristalinos resultantes da RAS a 40°C. Por outro lado, à 80°C, a formação do produto cristalino resultante da RAS é reduzida em maior teor de Al, devido à formação de um precursor zeolítico.

2.2.3 Condições de exposição

A RAA é desencadeada pela interação de três fatores primordiais: a presença de álcalis no concreto, a reatividade dos agregados e a existência de umidade. Esta última, frequentemente proveniente do ambiente em que a estrutura está inserida, ou da umidade interna presente no próprio concreto. Segundo Olajide et al., (2024) e Penttala, (2009), a umidade interna necessária para a ocorrência da RAA deve atingir aproximadamente 85%. Outro estudo conduzido por Lindgård et al., (2006) também indica esse percentual de umidade como sendo necessário para o desencadeamento da RAA, embora seja importante considerar o grau de reatividade dos agregados.

Outra pesquisa sugere que a RAA pode ser iniciada apenas pela presença de água nos poros do concreto, e qualquer aumento subsequente na umidade pode acelerar sua expansão (Bouzabata et al., 2012).

Os poros formados no concreto após a hidratação do cimento podem derivar de vazios capilares, os quais não são preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento. Dependendo do grau de hidratação e da relação água/cimento (a/c), esses poros podem ser classificados como microporos ($<50\text{ nm}$) e macroporos ($>50\text{ nm}$), sendo estes últimos os de maior impacto na permeabilidade e resistência mecânica. Além disso, existem os vazios interlamelares (contidos no CSH) e os vazios gerados pelo ar aprisionado, sendo este último um fator importante na permeabilidade e resistência mecânica do concreto (Mehta; Monteiro, 2006).

Assim, observa-se que a quantidade de poros e de água presente nesses poros é diretamente proporcional à relação a/c utilizada na dosagem do concreto, o que, consequentemente, influencia na sua resistência mecânica e durabilidade. O aumento do tamanho dos poros à medida que se eleva a relação a/c torna o concreto mais permeável e suscetível a agentes agressivos do meio (Chaudhry, 2018; Hover, 2011).

Por outro lado, relações a/c menores reduzem a permeabilidade do concreto e a expansão dos elementos formados pela RAA na presença de umidade (Fournier; Bérubé, 2000). Além disso, ao restringir o acesso à água, a liberação dos álcalis presentes no agregado pode ser limitada (Wang, 2008).

A porosidade pode, por sua vez, contribuir positivamente para a RAA se estiver presente em quantidade adequada. Em outras palavras, na presença da RAA, ocorre a

formação de um gel expansivo que pode se acomodar nos poros do concreto, reduzindo as expansões e tensões (Jaroonvechatam et al., 2017).

Diferentes condições de exposição, umidade e temperatura são encontradas em estruturas de concreto reais, o que pode desencadear ou até mesmo acelerar a RAA, especialmente quando o concreto é produzido com agregados reativos (Deschenes et al., 2018; McCartney da Fonseca et al., 2018). Conforme observado por Multon; Toutlemonde (2010), mesmo em casos de monitoramento de estruturas que apresentam expansões estáveis, uma mudança nas condições ambientais pode desencadear novas reações e expansões. Portanto, é importante controlar a relação a/c e utilizar materiais e proporções adequadas.

2.3 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E CIMENTOS ÁLCALI ATIVADOS

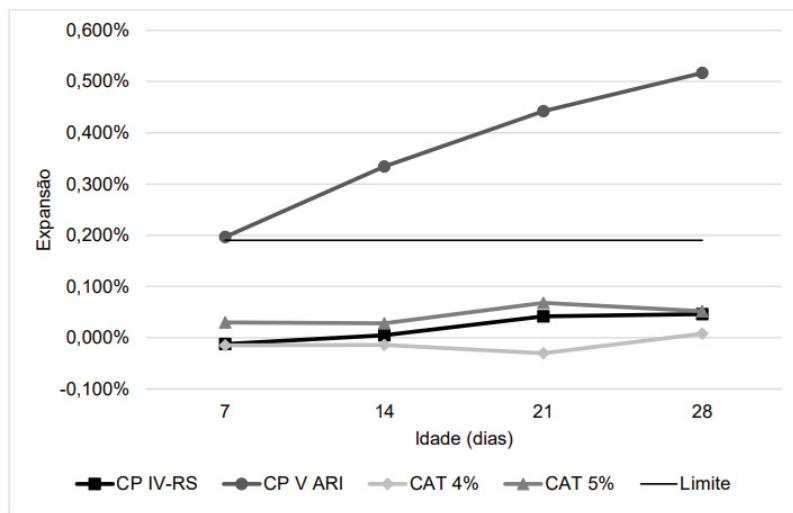
Os cimentos álcali ativados emergem como uma alternativa promissora ao cimento Portland (CP), devido ao seu desempenho mecânico superior e às significativamente menores emissões de CO₂ durante o processo de produção. Este tipo de cimento, fabricado a partir de matérias-primas alternativas, é ativado por uma solução alcalina, visando ampliar o potencial de reação pozolânica dos materiais (Olajide; Nokken; Sanchez, 2024).

Os cimentos álcali ativados geralmente apresentam um teor de álcalis mais elevado do que o CP, o que suscita preocupações quanto ao seu potencial de desencadear a RAA (Fernandez-Jimenez; García-Lodeiro; Palomo, 2007). Estudos conduzidos com argamassas sugerem que o ativador empregado se combina com os produtos da reação de hidratação, reduzindo assim a disponibilidade de álcalis, tornando-se menos propenso à RAA (Garcia-Lodeiro et al., 2016; Moraes et al., 2021).

Moraes et al. (2021) realizaram uma comparação entre barras de argamassa produzidas com CPV e CAA, utilizando diferentes teores de ativador (4% e 5% de NaOH). Constataram que apenas o CPV – ARI apresentou potencial de reação deletéria. A expansão com CPV-ARI atingiu o limite de 0,19%, estabelecido pela norma NBR 15577-4 (2008), em apenas 7 dias. Em comparação com os outros cimentos testados, CPIV-RS, CAA 5% e CAA 4%, a expansão observada caracterizou o cimento como potencial de

redução da RAA, ou seja, abaixo de 0,19% aos 28 dias. Este resultado é ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Teste acelerado em barras de argamassa para CAA_4%, CAA_5%, CPV-ARI e



FONTE: Moraes et al. (2021).

* CAT – Cimento alcali-ativado

Outras investigações fornecem evidências de expansão devida à Reação Álcali-Agregado (RAA) em cimentos álcali ativados (CAA) (Ichikawa, 2009; Thomas, 2011). Portanto, é importante que o estudo dessa reação seja levado em consideração para um melhor entendimento do fenômeno.

Já Yang et al., (2023) utilizaram a tomografia computadorizada de raios X (μ -TC) para investigar a reação álcali-sílica (RAS), substituindo o método convencional de avaliação por comparador de comprimento. A pesquisa confirmou a correlação entre a expansão de RAS e a evolução dos poros, permitindo distinguir fissuras iniciais e fissuras induzidas por RAS em argamassas de perlita expandida. Os resultados mostraram ainda que os produtos da reação RAS preencheram todos os poros na perlita expandida, causando maior expansão e fissuração. A diminuição da porosidade, que atinge um nível constante em argamassas de cimento Portland após 14 dias, continua nas argamassas ativadas por álcalis, correlacionando-se com maior expansão e fissuração.

Como apresentado os cimentos álcali ativados (CAA) apesar de representarem uma alternativa ecologicamente vantajosa ao cimento Portland (CP), com desempenho mecânico superior e menores emissões de CO₂ trazem preocupações relacionadas a sua

durabilidade, principalmente quanto a RAA, dado o teor mais elevado de álcalis nos CAA. A seguir serão apresentadas as características que podem influenciar o desempenho do CAA quanto a RAA.

2.3.1 Efeito de ativadores alcalinos

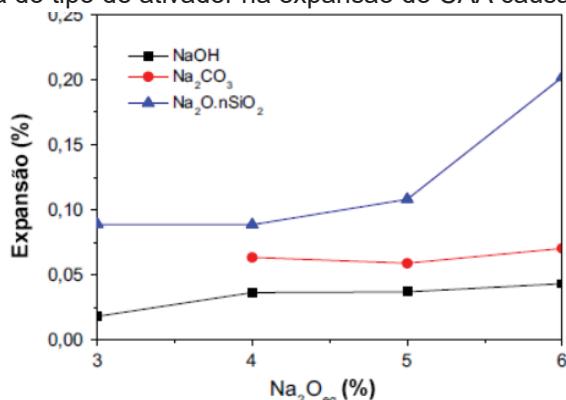
O ativador alcalino empregado na formulação do cimento álcali ativado desempenha um papel importante na hidratação do material e na obtenção de propriedades mecânicas adequadas. Contudo, esses ativadores se tornam a principal fonte de álcalis na solução dos poros do concreto, o que pode resultar posteriormente na ocorrência de RAA no sistema (Wang; Noguchi, 2020).

Dentre os ativadores frequentemente utilizados estão o hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$), hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfato de sódio (Na_2SO_4). A utilização de diferentes ativadores pode conduzir à formação de produtos de hidratação distintos e influenciar na microestrutura do material, levando a comportamentos variados em relação à RAA (Wang; Noguchi, 2020).

Estudos realizados por Tänzer et al., (2017) sobre escórias ativadas por ativadores à base de potássio e sódio revelaram que, no primeiro caso, as expansões decorrentes da RAS foram menores. Por sua vez, Shi et al., (2018) investigaram argamassas ativadas por silicato de sódio (WG) e constataram que a expansão devido à RAA foi maior do que aquelas ativadas por NaOH .

Em uma análise conduzida por Chen et al., (2002) em argamassas ativadas por três tipos distintos de ativadores, observou-se que as maiores expansões ocorreram seguindo essa ordem, independentemente do teor de ativador: Wather Glass (WG), Na_2CO_3 e NaOH , conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4: Influência do tipo de ativador na expansão do CAA causada por RAA no de barras de



FONTE: Chen et al. (2002).

Gifford e Gillott, (1996) conduziram uma análise em concretos ativados por Na₂CO₃ e Na₂SiO₃, ambos com 6% de Na₂O_{eq}, após um ano de armazenamento a 38 °C e 100% de umidade relativa, não foram observadas diferenças significativas entre as expansões devido à RAS em ambos os traços.

Os teores de ativadores também desempenham um papel fundamental no desenvolvimento da RAA. Estudos realizados por Chen et al., (2002)e Al-Otaibi et al., (2008) afirmam que o aumento da concentração de ativador tende a aumentar as expansões devido à RAA. Em contrapartida, Shi et al., (2017) investigaram diferentes concentrações de NaOH e observaram uma redução nas expansões por RAA à medida que o teor de ativador aumentava.

Diante dessa diversidade de fatores que impactam as características da RAA em sistemas de cimento álcali ativado, é claro que os resultados podem ser contraditórios. Portanto, torna-se fundamental o desenvolvimento de mais pesquisas nesse campo para um entendimento mais aprofundado.

2.3.2 Efeito do tipo de precursor

Compreender a natureza dos componentes do cimento álcali ativado (CAA) e seu impacto no desempenho em relação à RAA é primordial para selecionar os precursores adequados e mitigar os efeitos dessa reação.

É notável que sistemas com maior teor de cálcio em sua composição tendem a ser mais suscetíveis a expansões devido à RAA, muitas vezes superiores às observadas no cimento Portland (CP). Resultados de estudos anteriores, como os de Gifford e Gillott (1996), Bakharev et al., (2001) e Shi et al., (2017), destacaram essa tendência, embora tenham sido obtidos em condições de exposição diversas, gerando conclusões contraditórias. Fernández-jiménez e Puertas, (2002) sugeriram a realização de ensaios com períodos de teste superiores a 28 dias para uma análise mais abrangente.

A alta vulnerabilidade à RAA nesses sistemas decorre de seu elevado teor de álcalis, fatores que favorecem o início da reação, demandando ações para sua supressão. A presença de cálcio na matriz de cimento pode acelerar a reação, aumentando a alcalinidade da solução do poro e facilitando a dissolução de sílica do agregado reativo. Além disso, o cálcio está envolvido na formação de produtos de hidratação, como o silicato de cálcio hidratado (CSH). Uma relação adequada entre cálcio e silício (Ca/Si) no CSH pode reduzir a disponibilidade de álcalis livres na solução do poro, mitigando assim os efeitos da RAA. No entanto, um excesso de cálcio pode levar à formação de produtos expansivos, que podem contribuir para a expansão e fissuração do concreto (Hoppe Filho, 2017; Medeiros, 2017; Zhang et al., 2017; Frýbort et al., 2018).

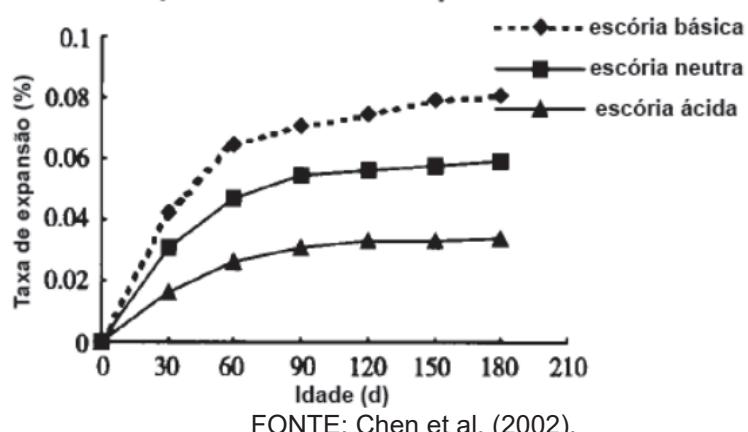
Estudos envolvendo precursores com alto teor de alumina e baixo teor de cálcio, como a cinza volante e o metacaulim, mostraram-se menos propensos à RAA. Davidovits, 1994 realizou investigações em argamassas com cinza volante ativada por álcali, concluindo que esse sistema apresentava expansões muito baixas nos ensaios de RAA, mesmo com teores de até 10% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. Cyr, Pouhet (2015), ao estudarem barras de argamassas com metacaulim, constataram que estas eram menos suscetíveis à ação da RAA quando comparadas ao CP.

Krivenko et al., (2019) avaliaram os processos de formação da estrutura na zona de transição interfacial entre a matriz de cimento e os agregados em concretos de cimento ativados por álcalis sujeito a RAA. Os resultados indicaram que o teor de Al_2O_3 presente tanto no cimento quanto nos agregados desempenha um papel importante quando interagem com álcalis na presença de SiO_2 reativo, podendo influenciar os processos da reação álcali-agregado de maneira significativa, gerando efeitos tanto destrutivos quanto construtivos no concreto.

No caso de sistemas híbridos de CAA, com teor de cálcio intermediário, estudos relataram expansões maiores devido à RAA em comparação com o CP. Angulo-Ramírez et al., (2018), no entanto, observaram um desempenho superior das argamassas mistas em relação ao CP, embora ainda acima do limite estipulado pela ASTM C 1567. Assim, para sistemas híbridos, há consenso entre a maioria dos pesquisadores de que o risco de RAA é significativo e requer atenção.

A composição química da escória utilizada no desenvolvimento do CAA também influencia na ocorrência da RAA. Chen et al., (2002) compararam escórias com diferentes teores de óxidos e as classificaram de acordo com a relação $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$: se >1 é básica, se <1 é ácida e se igual a 1 é neutra. Concluíram que todas as escórias inibem a RAA, sendo a escória ácida a mais eficaz, como observado na Figura 5.

Figura 5: Relação do tipo de escória com a expansão causada pela RAA no ensaio de barras de argamassa.



FONTE: Chen et al. (2002).

A menor expansão causada RAA em cimentos álcali ativados (CAA) em comparação com o cimento Portland (CP) pode ser explicada pela participação dos álcalis na reação de hidratação do cimento, o que resulta na redução dos álcalis livres (Chen et al., 2002). Thomas (2011) associa esse efeito a uma menor relação entre cálcio e silício (Ca/Si) no silicato de cálcio hidratado (CSH) formado durante a reação, o que implica na necessidade de menor quantidade de álcalis para sua formação.

A compreensão dos componentes do cimento álcali ativado (CAA) e seu impacto no desempenho em relação à reação álcali-agregado (RAA) é essencial para orientar a seleção adequada de precursores e mitigar os efeitos adversos dessa reação. Apesar de

alguns estudos apontarem bons resultados quanto a expansão de CAA suscetível a RAA, isso não é uniforme e pode variar dependendo das condições e composições específicas.

2.3.4 Avaliação de RAA em CAA

Os métodos desenvolvidos para avaliar a reatividade dos agregados e a alcalinidade dos cimentos, como o método das barras de argamassa e os prismas de concreto, foram originalmente estabelecidos para sistemas de cimento Portland (CP). Entretanto, a aplicabilidade desses testes para os cimentos álcali ativados (CAA) tem sido objeto de questionamento por parte de diversos pesquisadores.

O método das barras de argamassa, embora muito utilizado devido à sua rapidez, já foi alvo de questionamentos quanto à confiabilidade de seus resultados, mesmo no caso do CP, devido às condições de exposição severas que não refletem fielmente as condições reais das estruturas (Golmakani; Hooton, 2019; Thomas et al., 2006; Wood, 2017). Essas desvantagens podem ser ainda mais significativas quando aplicadas a sistemas de CAA, pois a solução externa altamente alcalina pode inibir a reação dos álcalis presentes no CAA ou mesmo reagir com o próprio CAA, influenciando de forma significativa nos resultados e levando a erros (Shi et al., 2015).

Estudo realizado por Shi et al. (2015) comparou argamassa de CP e CAA em condições submersas em solução alcalina a 80 °C e em ambiente úmido a 80 °C. Sob condições submersas, as amostras de CAA apresentaram um potencial reativo menor do que as de CP, enquanto sob condições de ambiente úmido, o resultado foi inverso. Além disso, o efeito da temperatura pode levar a resultados contraditórios, pois influencia a hidratação do CAA e a formação de diferentes produtos. A alta temperatura também pode afetar a solubilidade e estabilidade desses produtos, alterando a solução nos poros do concreto de forma distinta em comparação com os concretos em condições de campo (Bakharev; Sanjayan; Cheng, 2002a; Huang et al., 2018).

Outra limitação do ensaio das barras de argamassa é o tempo de avaliação. Autores indicam que o tempo de hidratação do CAA é mais curto do que o do CP, o que pode resultar na retração do CAA e neutralizar os efeitos da expansão devido à RAA (Xie; Xiang;

Xi, 2003). Além disso, Fernández-Jiménez e Puertas (2002) observaram uma expansão retardada em argamassas a base de CAA após os 28 dias de ensaio normalmente empregados. Pesquisadores sugeriram estender a duração dos testes por pelo menos mais 6 meses para superar essa deficiência (Mahanama et al., 2019; Shi et al., 2015).

Por outro lado, o método de prismas de concreto mostrou-se mais confiável devido à sua maior similaridade com as estruturas reais, embora seu período de estudo (dois anos) dificulte sua aplicação prática. Estudos comparativos entre concretos com CAA e CP indicaram que o CAA apresentou maiores expansões do que o CP (Thomas et al., 2006; Williamson; Juenger, 2016).

Moraes et al. (2021) realizaram uma avaliação da expansão devido à RAA em concreto de cimento álcali ativado, utilizando um método acelerado normatizado pela NBR 15577-6 (2018). Esse método, que tem duração de 20 semanas e submete os corpos de prova a uma temperatura de 60°C com 95% de umidade, revelou uma retração ao longo de todo o período de teste, culminando com um comprimento 0,031% menor do que o inicial.

A avaliação da reatividade dos agregados e da alcalinidade dos cimentos álcali ativados (CAA) apresenta desafios significativos quando comparada aos métodos tradicionais desenvolvidos para cimento Portland (CP). Embora métodos como o das barras de argamassa e dos prismas de concreto ofereçam resultados importantes, suas limitações em condições de alta alcalinidade e temperatura, bem como a diferença nos tempos de hidratação e expansão dos CAA, destacam a necessidade de adaptações e novas abordagens.

2.4 MÉTODOS ACELERADOS DE AVALIAÇÃO DE RAA

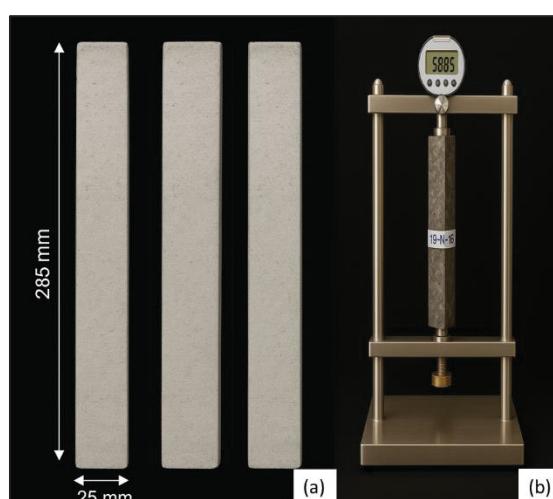
2.4.1 Expansão em barras de argamassa

O teste de barras de argamassa acelerado, conhecido pela sigla AMBT (accelerated mortar bar test), é frequentemente citado na literatura científica. No Brasil, este ensaio é regulamentado pela NBR 15577:2018 – parte 4. Esse método é um dos mais utilizados mundialmente para detectar expansões causadas pela reação álcali-agregado em períodos

curtos, variando entre 14 dias segundo a norma canadense e 16 a 30 dias de acordo com a norma brasileira. As condições extremas do teste, que incluem altas temperaturas (80°C) e imersão em solução de NaOH 1N, são pontos de crítica devido à possível variabilidade nos resultados.

As Figura 6a e Figura 6b demonstram, respectivamente, os corpos de prova de argamassa durante o teste de expansão por RAA e a medição de variação dimensional que é realizada durante o AMBT.

Figura 6: a) corpos de prova de argamassa para o ensaio de expansão, b) Ensaio de expansão de argamassa.



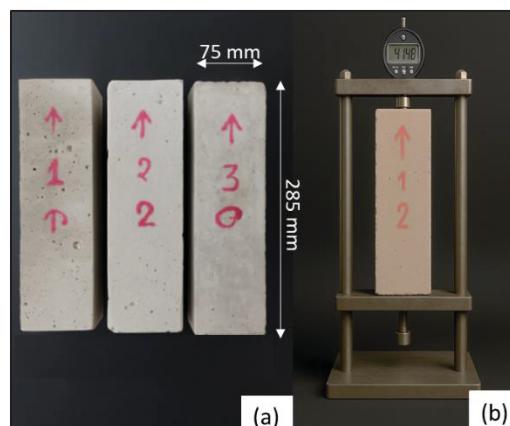
Muitos pesquisadores utilizam o AMBT para avaliar a reatividade de agregados, conforme destacado por estudos como os de Fournier e Bérubé, (2000), Thomas et al., (2006), Alaejos et al., (2014), e Golmakani e Hooton (2019). Eles apontam que o método pode induzir a resultados errôneos, seja por falsos-negativos — onde agregados potencialmente reativos são inicialmente considerados seguros —, ou por falsos-positivos — onde agregados adequados são erroneamente rejeitados.

Apesar dos esforços contínuos para melhorar a precisão do AMBT por pesquisadores como Sanchez et al., (2011), e Alaejos et al., (2014), o método ainda enfrenta críticas devido às condições severas que podem acelerar artificialmente as expansões por RAA, conforme relatado em diversos estudos (Golmakani; Hooton, 2019).

2.4.2 Expansão em prismas de concreto

O ensaio de prismas de concreto, também referido como Concrete Prism Test (CPT) em inglês, é visto como o mais confiável para analisar o comportamento de agregados em condições similares às de campo quanto à reação álcali-agregado. Esse teste envolve a medição da expansão de prismas de concreto sob condições controladas de alta umidade (95%) e temperatura de 38 °C. No entanto, sua aplicação exige um longo período de observação, um ano para testar a reatividade de agregados e dois anos para avaliar aditivos mitigadores da reação, conforme apontam Ideker et al., (2010). Devido à sua longa duração, muitos pesquisadores e empresas hesitam em adotá-lo, apesar de sua maior precisão em comparação ao teste AMBT (accelerated mortar bar test). A Figura 7a e a Figura 7b exemplificam, respectivamente, os prismas de concreto prontos para o teste e o processo de ensaio em si.

Figura 7: a) Corpos de prova de concreto para ensaio de expansão, b) Ensaio de expansão de prismas de concreto.



No Brasil, a norma NBR 15577-6 (2018) estabelece os procedimentos para avaliar a RAS em prismas de concreto. Essa norma permite analisar a reatividade potencial dos agregados, comparando concretos com cimento padrão e cimentos com adições de hidróxido de sódio em períodos de um e dois anos, incluindo a avaliação de adições suplementares.

Pesquisas foram realizadas para desenvolver uma versão acelerada do teste de prismas de concreto, conhecida como ACPT (Ideker et al., 2010; Sanchez et al., 2011; Lingard et al., 2013), que opera a uma temperatura de 60 °C. A norma brasileira NBR

15577-7 (2018) orienta a realização do ACPT sob 60 °C durante 140 dias para a avaliação de agregados e 180 dias para avaliação de cimento, mantendo a umidade acima de 95%.

Adicionalmente, Sanchez (2008) e Sanchez et al., (2011) exploraram uma alternativa acelerada para mitigar problemas de lixiviação observados no CPT. Este método, denominado teste brasileiro de prismas de concreto acelerado ou Accelerated Brazilian Concrete Prism Test (ABCPT), utiliza uma solução de NaOH em concentração igual ao teor de álcalis presente no cimento e a uma temperatura de 80°C, com os corpos de prova submersos por um período de quatro semanas. Os resultados deste método mostraram uma forte correlação de 89% com os do CPT. A Tabela 3 fornece um resumo das condições aplicadas nesses testes acelerados para a avaliação da RAA.

Tabela 3: Resumo das condições de teste dos métodos acelerados de avaliação da RAA discutidos na pesquisa.

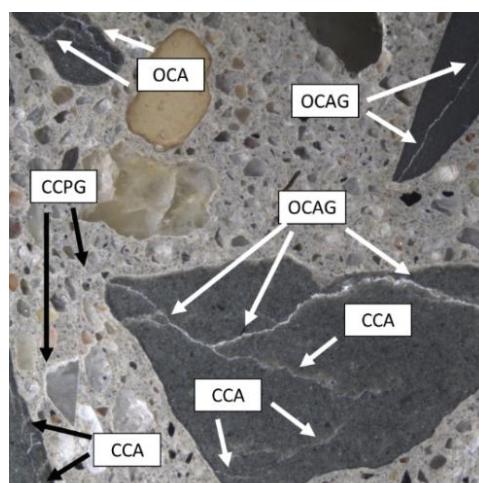
Ensaio	Condição umidade	Solução	Condição de Temperatura (°C)	Tempo de duração	Norma/Autor
Método acelerado das barras de argamassa (accelerated mortar bar test) (AMBT)	Imersa	Solução alcalina de 1N NaOH	80	30 dias	NBR 15577:2018 – parte 4 CSA A23.2-25A
Expansão em prismas de concreto (Concrete Prism Test) (CPT)	95%	Água	38	365 dias	NBR 15577-6 (2018)
Testes de prismas de concreto acelerado (Accelerated Concrete Prism Test) (ACPT)	95%	Água	60	140 dias	NBR 15577-7 (2018)
Teste brasileiro de prismas de concreto acelerado (Accelerated Brazilian Concrete Prism Test) (ABCPT)	Imerso	Solução alcalina de NaOH (concentração igual ao teor de álcalis do concreto)	80	30 dias	Sanchez (2008) e Sanchez et al., (2011)

2.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RAA POR ANÁLISE DE DANOS

2.5.1 *Damage Rating Index (DRI)*

O método do Índice de Avaliação de Danos, também conhecido por sua sigla em inglês, DRI (Damage Rating Index), emprega uma técnica petrográfica semi-quantitativa que faz uso de um estereomicroscópio, geralmente com uma ampliação entre 15 e 16x (Figura 8). Neste procedimento, deteriorações específicas das amostras são quantificadas em áreas marcadas de 1 cm x 1 cm na superfície polida da amostra, como descrito por Villenueve (2011). Esta técnica não só conta as fissuras presentes, mas também examina suas características petrográficas (Figura 8 e Tabela 4), aplicando fatores de ponderação para ajustar a influência de cada tipo de fissura nas características mecânicas do material, conforme detalhado na Tabela 4 (Sanchez et al., 2015a). O resultado do DRI é então normalizado para uma superfície de 100 cm² (Sanchez, 2014; Waidner, 2016; Martin et al., 2017).

Figura 8: Imagem da técnica de índice de classificação de danos ou *Damage Rating Index (DRI)* realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LaME-UFPR)



FONTE: (Frare et al., 2022)

Classificação dos tipos de danos encontrados na amostra de acordo com a Tabela 4. (CCA: Fissuras fechados no agregado, OCAG: Fissuras no agregado com presença de gel, CCPG: Fissura na pasta de cimento com presença de gel).

Tabela 4: Características ponderadas para análise de DRI

Características Petrográficas	Abreviação	Peso	Grupo
Fissuras fechadas no agregado	CCA	0,25	I
Fissuras abertas no agregado	OCA	2,00	II
Fissuras no agregado e com presença de gel	OCAG	2,00	II
Agregado desagregado	CAD	3,00	-
Partícula de agregado desagregada/estilhaçado	DAP	2,00	II
Fissuras na pasta de cimento	CCP	3,00	III
Fissuras na pasta de cimento e com presença de gel	CCPG	3,00	III

Classificação dos grupos:

Grupo I: fissuras fechadas (abertura $\leq 0,1$ mm) nas partículas de agregados graúdos ou na fração grossa das partículas de areia (1 a 5 mm) (CCA);

Grupo II: trincas abertas (abertura $\geq 0,1$ mm) nas partículas de agregados graúdos ou na fração grossa das partículas de areia (1 a 5mm), com ou sem produtos de reação (OCA + OCAG);

Grupo III: trincas na pasta de cimento, com ou sem produtos de reação (CCP + CCPG).

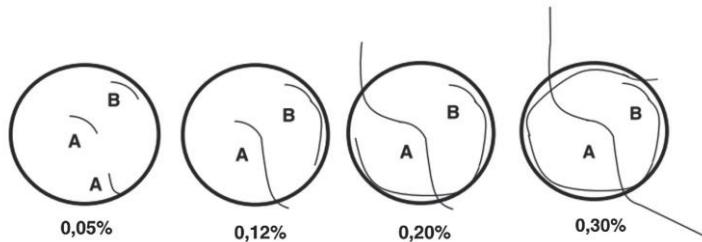
FONTE: (Sanchez et al., 2015) adaptado de (Villeneuve, 2011)

A metodologia classifica as fissuras em diferentes grupos. O grupo I mostra uma ampla variação na contagem de fissuras, que varia conforme o tipo de agregado usado, com números que crescem com o aumento da expansão do material. É importante ressaltar que o processo de britagem do agregado pode alterar esses números, já que a energia empregada pode criar pequenas fissuras dentro das partículas do agregado. Por outro lado, os grupos II e III apresentam fissuras abertas que tendem a se expandir em direção à zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Além disso, a densidade e a quantidade de fissuras por cm^2 tendem a aumentar à medida que a expansão das amostras de concreto se desenvolve (Sanchez et al., 2015a).

Com base em várias análises utilizando o DRI, Sanchez et al. (2015) desenvolveram um modelo que correlaciona a expansão do concreto ao desenvolvimento de fissuras causadas pela RAA, conforme ilustrado na Figura 9. No início da reação físico-química (com expansões do concreto inferiores a 0.05%), típicas fissuras induzidas pela RAA, dos tipos A ou B, são encontradas dentro das partículas do agregado reativo. À medida que a expansão alcança níveis moderados (em torno de 0.12%), novas fissuras surgem dentro das partículas reativas, enquanto as já existentes podem se estender através da zona de transição em direção à pasta de cimento. Em estágios de alta expansão (cerca de 0.20%), as fissuras formadas anteriormente nos agregados geralmente já se encontram propagadas na pasta de cimento. Nesse estágio avançado de deterioração, a "lei da mínima energia"

predomina, favorecendo a continuidade das fissuras existentes em detrimento do surgimento de novas. Finalmente, em expansões muito elevadas (0.30% ou mais), o padrão de fissuras se intensifica e há uma clara tendência de interconexão entre as fissuras em diferentes partículas de agregado, o que notavelmente reduz e afeta as propriedades mecânicas do concreto, particularmente sua resistência à compressão.

Figura 9: Modelo qualitativo do dano devido a RAA versus níveis de expansão



FONTE: (Sanchez et al., 2015a).

2.5.2 Stiffness Damage Test (SDT)

O conceito de *Stiffness Damage Test* (SDT) ou Teste de dano de rigidez, foi inicialmente desenvolvido a partir dos estudos de (Walsh, 1965), que observou uma relação entre a densidade de fissuras internas em amostras rochosas e suas respostas de tensão e deformação sob carga cíclica. Durante os anos 1990, Crouch e Wood (1990) lideraram pesquisas aplicando o SDT para avaliar concreto impactado pela reação álcali-agregado. Chrissip, Waldron e Wood (1993) e colaboradores recomendaram o uso de uma carga cíclica fixa (cinco ciclos) que variava de 0 a 5,5 MPa, com uma velocidade de aplicação de 0,10 MPa/s, e apontaram o módulo de elasticidade e a área de histerese (J/m^3) como indicadores eficazes dos danos causados pela RAA. Eles notaram que a aplicação deste método resultava em uma redução no módulo de elasticidade e um aumento na área de histerese devido à deformação plástica induzida pela carga cíclica (Smaoui et al., 2004).

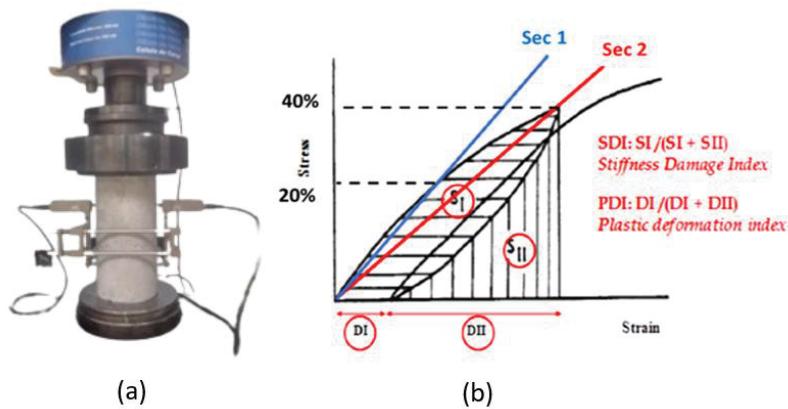
Pesquisas adicionais focaram em variáveis que afetam os resultados do SDT, incluindo diferentes velocidades de carga. Smaoui et al., (2004) avaliaram cargas máximas de 5, 10 e 15 MPa, identificando que a carga de 10 MPa fornecia os resultados mais consistentes. Sanchez et al., (2014), Sanchez et al., (2015), Sanchez, et al., (2017) examinaram a aplicação do SDT em diferentes composições de concreto e em amostras

retiradas de estruturas comprometidas pela RAA, descobrindo que cargas equivalentes a 40% da resistência do concreto aos 28 dias eram mais eficazes para avaliar os danos causados pela RAA.

Além disso Sanchez et al., (2016 e 2017) descobriram uma correlação significativa entre os testes SDT e DRI, uma vez que ambos medem de forma semelhante os danos provocados pela RAA e podem apresentar resultados complementares e consistentes em relação à expansão. Os dados do SDT revelam alterações nas propriedades mecânicas do concreto, demonstrando que o aumento das expansões pela RAA está associado ao crescimento das fissuras, o que reduz tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à tração do material (Sanchez et al., 2017).

Os procedimentos e resultados do ensaio de SDT podem ser visualizados na Figura 10a e Figura 10b. Essas figuras ilustram como os índices de Perda de Rígidez (SDI) e Deformação Plástica (PDI) são calculados, refletindo a relação entre a energia dissipada (SI) e a energia total aplicada (SI + SII), e entre a deformação plástica e a deformação total, respectivamente. Adicionalmente, são obtidos o módulo de elasticidade e o Índice de Não-linearidade (NLI) através deste ensaio.

Figura 10: a) realização do ensaio de SDT no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LaME-UFPR); b) comportamento tensão-deformação com carga 40% da resistência à compressão e 5 ciclos, para amostras de concreto afetadas pela RAA.



FONTE: (Frare et al., 2022) adaptado (Sanchez et al., 2017)

O SDI fornece uma medida quantitativa do dano no material, refletindo a capacidade do concreto de resistir a deformações sob carga; valores mais altos indicam maior dano. A Deformação Plástica (PDI), por sua vez, representa a deformação permanente que ocorre

após a remoção da carga, onde valores elevados sugerem que o concreto sofreu danos significativos, comprometendo sua capacidade de carga. A área de histerese representa a energia dissipada durante os ciclos de carga e descarga, e um aumento nessa área sugere que o material está apresentando um comportamento mais plástico e menos elástico. Isso significa que o concreto está perdendo sua capacidade de recuperar completamente sua forma original após a aplicação de carga, o que é um sinal de dano interno, como fissuras ou degradação do material. Portanto, uma área de histerese maior é frequentemente associada a um maior nível de deterioração e, consequentemente, a uma redução na integridade estrutural do concreto (Sanchez, 2014).

2.5.3 Ensaio de Cisalhamento direto

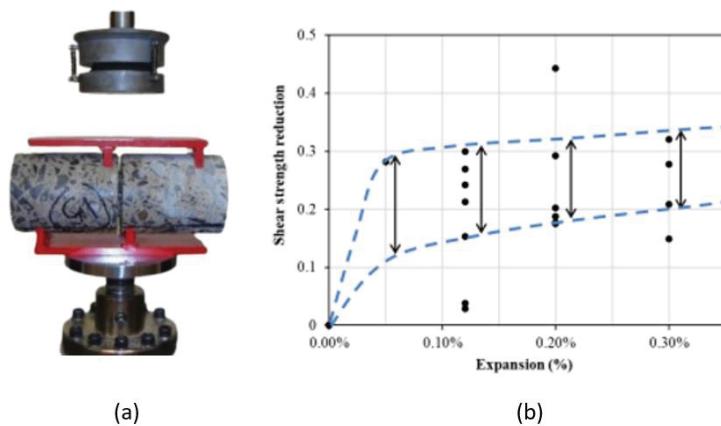
A resistência ao cisalhamento do concreto é uma propriedade influenciada pelas forças de tração e compressão. Quando fissurado, o concreto pode transferir forças de cisalhamento através de dois mecanismos principais: efeito pino e atrito de cisalhamento (Haskett et al., 2011). Ao longo dos anos, diversos métodos de ensaio foram desenvolvidos para avaliar a capacidade de cisalhamento direto e atrito de cisalhamento em concreto armado e não armado (Adams; Walrath, 1987). Barr e Hasso (1986) destacaram a amostra cilíndrica modificada (com entalhe duplo) como uma das mais promissoras para avaliar o cisalhamento direto em concreto simples.

O ensaio de cisalhamento direto tem como objetivo avaliar a resistência do concreto à transferência de forças cortantes entre superfícies e é particularmente útil para estudar os efeitos da RAA. Esse método permite identificar como as fissuras geradas pela RAA comprometem a capacidade do material de suportar tensões de cisalhamento, afetando o atrito entre os agregados e a integridade da pasta cimentícia. Valores reduzidos de resistência ao cisalhamento indicam maior deterioração causada pela RAA, fornecendo um indicador quantitativo do progresso da reação e dos danos estruturais (De Souza et al., 2019).

De Souza et al. (2019) avaliaram a expansão e os danos induzidos pela RAA na resistência ao cisalhamento direto do concreto afetado e desenvolveram uma configuração simples, porém confiável, para avaliar o progresso da RAA em laboratório (Figura 11a). Os

autores constataram que a RAA influencia significativamente a resistência ao cisalhamento direto do concreto afetado. Além disso, o estudo evidenciou que o impacto da RAA na resistência ao cisalhamento foi mais significativo para expansões baixas (0,05%) e moderadas (0,12%) (Figura 11b). A configuração de cisalhamento proposta mostrou ser uma ferramenta rápida e promissora para detectar expansão e danos induzidos por RAA em laboratório. No entanto, apenas amostras de laboratório afetadas por RAA fabricadas e monitoradas sob condições de expansão acelerada e livre foram testadas neste programa.

Figura 11: a) Setup e posicionamento da amostra cilíndrica de concreto para realização do ensaio de cisalhamento direto; b) Perda média de resistência ao cisalhamento do concreto em função da expansão causada pela RAA



FONTE: De Souza; Sanchez; De Grazia, (2019)

3 ANÁLISE DE REATIVIDADE DOS AGREGADOS

3.1 INTRODUÇÃO

Diversas estruturas de concreto armado construídas há muitos anos já foram diagnosticadas com RAA ou indícios da mesma. Porém sua avaliação torna-se complicada devido à falta de informações sobre proporções e tipos de materiais utilizadas na época. Assim, estudos que possam auxiliar na previsão de situações com possibilidade de ocorrência da RAA podem auxiliar na tomada de decisões e consequentemente melhorar a vida útil das estruturas.

Exemplos notáveis de medidas preventivas contra a RAA nas construções no Brasil incluem as barragens de Jupiá, Água Vermelha, Salto Osório, Tucuruí e Itaipu, onde foram utilizados materiais pozolânicos para mitigar a expansão causada por agregados reativos. A partir de 1985, a ocorrência de RAA foi identificada nas barragens de Moxotó e Joanes II, ambas na Região Nordeste, devido às condições favoráveis à reação e ao desconhecimento da natureza reativa dos agregados utilizados. Esse fenômeno motivou novas investigações e pesquisas (Battagin, 2016).

O interesse pela RAA aumentou após a queda do Edifício Areia Branca em 2004, levando à identificação dos primeiros casos de RAA em fundações de edifícios na região metropolitana do Grande Recife/PE. Em estudo recente (Hasparyk, 2022) documentou 35 casos de RAA em barragens e 8 em outras estruturas, como túneis, pontes e fundações, revelando a extensão do problema no Brasil. No entanto, o mapeamento das obras afetadas ainda é incipiente.

Quanto ao risco de ocorrência da RAA, a ABNT NBR 15577 classifica em quatro níveis de necessidade de ações preventivas: desnecessária, mínima, moderada e forte. Obras hidráulicas, estruturas em contato com água ou solo, e grandes construções devem seguir diretrizes preventivas fortes devido aos altos custos e dificuldades de manutenção. Ensaios são recomendados para comprovar a inocuidade dos agregados ou a mitigação da reação.

Esses ensaios são previstos na NBR 15577 (2018) e normas de outros países como ASTM C 1260 (2014), ASTM C 1293 (2018), CAN/CSA A-23. 2-25A (2014), CAN/CSA-A23.

2-14A (2014) UNE 146508 (2018) podem auxiliar a seleção de materiais para novas construções, evitando a ocorrência das manifestações patológicas em consequência da RAA.

A tecnologia de avaliação e prevenção da RAA no Brasil é dominada por centros de pesquisa ligados a empresas de energia, institutos públicos, universidades e laboratórios privados. Segundo a (ABCP, 2016), uma parcela significativa dos agregados testados no Brasil apresentou reatividade. Embora o número de análises realizadas venha crescendo, especialmente nos estados de São Paulo e Pernambuco, a maioria dos testes ainda se concentra no ensaio acelerado de barras de argamassa, com uma pequena porcentagem, em torno de 14%, de agregados testados em concreto (Battagin, 2016).

O teste acelerado das barras de argamassa (Accelerated Mortar Bars Test - AMBT), normatizado no Brasil pela NBR 15577:2008 – parte 4, é amplamente utilizado para a análise de reatividade dos agregados devido ao seu curto período de avaliação. No entanto, há discussões na literatura sobre suas condições de exposição, que são consideradas mais severas em comparação a situações reais de serviço. Estudos voltados para o aprimoramento dos métodos de ensaio têm buscado formas de torná-los mais representativos e confiáveis.

Uma pesquisa realizada por (Golmakani; Hooton, 2019), na qual foram analisados 13 agregados quanto à sua reatividade pelo método AMBT, identificou corretamente a reatividade de cinco deles quando comparados a outros testes. Os demais apresentaram resultados divergentes, incluindo casos de falsos-positivos e falsos-negativos, o que indica a necessidade de complementar a avaliação com outros métodos. Embora o AMBT seja amplamente utilizado devido à sua praticidade e rápida obtenção de resultados, existem discussões sobre suas condições de aplicação e sua representatividade em relação ao comportamento dos agregados ao longo do tempo (Fournier; Bérubé, 2000).

Buscando aperfeiçoar os métodos já padronizados, mantendo o atrativo de gerar resultados em 28 dias, Sanchez (2008) e Sanchez et al. (2011) desenvolveram o método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT), que utiliza a temperatura como forma de aceleração da reação e imersão em solução com o mesmo teor de álcalis do cimento. Os resultados obtidos com esse método apresentaram uma correlação de 89% com o

ensaio CPT (Concrete Prism Test), demonstrando potencial como alternativa na avaliação da reatividade dos agregados.

Uma abordagem complementar na análise da reatividade dos agregados é a petrografia, normatizada pela NBR 15577-3, que permite a identificação das fases minerais presentes nos agregados e seu potencial reatividade aos álcalis. Esse método, baseado na caracterização microestrutural das partículas, possibilita uma avaliação inicial qualitativa, auxiliando na seleção de materiais menos suscetíveis à RAA. No entanto, a petrografia isoladamente não quantifica a expansão ou a cinética da reação, sendo recomendada sua associação com ensaios laboratoriais que avaliem a expansão dos agregados.

Dentro do exposto, o objetivo desse capítulo é caracterizar 6 agregados disponíveis no estado do Paraná e um agregado do estado do Mato Grosso do Sul, para a escolha do agregado mais reativo a ser utilizado no desenvolvimento do programa experimental testando o cimento álcali ativado objeto deste estudo. Os métodos utilizados foram a análise petrográfica, AMBT, ABCPT e CPT, a fim de comparar os resultados obtidos e obter um diagnóstico mais preciso quanto ao potencial de RAA destes agregados.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2.1 Materiais

Para as análises de expansibilidade com relação à RAA dos agregados foi utilizado o cimento CPV-ARI, em substituição do cimento padrão (sem adições, conforme NBR 15577-4). O CPV foi escolhido por ser o cimento encontrado comercialmente no país e por apresentar o teor de alcali ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,72\%$), mais próximo do estabelecido pela norma 15577-4 (2018), que é de $0,9 \pm 0,1$, e próximo ao valor estipulado para o cimento padrão. Conforme prescrição da NBR15577-4, o mesmo precisou passar por um peneiramento na peneira 850 μm , a fim de remover os grumos.

As características físicas e químicas exigidas pela NBR 15577 (2018) estão indicadas na Tabela 5.

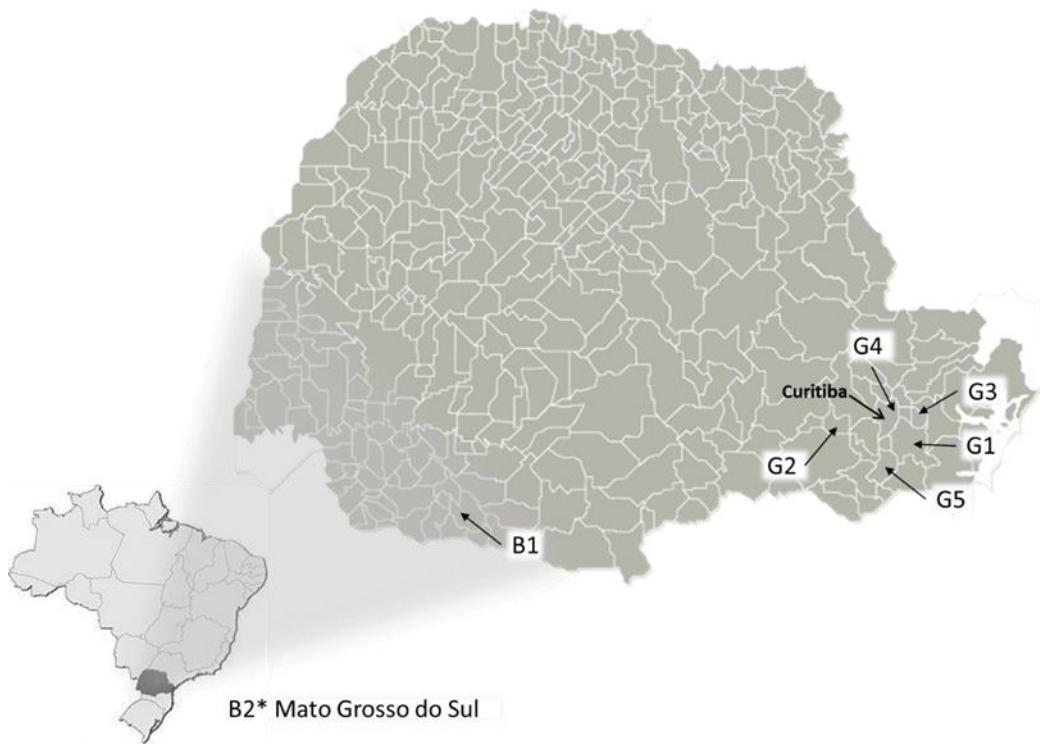
Tabela 5: Características físicas, químicas exigidas pela NBR 15577: 2018 para o cimento

		CPV ¹	Requisitos exigidos	Norma relacionada
Ensaios químicos	Al ₂ O ₃ (%)	4,3	-	-
	SiO ₂ (%)	18,18	-	-
	FeO ₃ (%)	2,91	-	-
	CaO (%)	61,52	-	-
	MgO (%)	2,35	≤ 6,5	NBR 16697: 2018
	SO ₃ (%)	3,08	≤ 4,5	NBR 16697: 2018
	P. F. (%)	6,06	≤ 6,5	NBR 16697: 2018
	Cal livre (%)	0,91	-	-
	R. I. (%)	1,21	≤ 3,5	NBR 16697: 2018
Resistência mecânica (MPa)	Expansão a quente (mm)	0,17	≤ 5	NBR 16697: 2018
	Início de pega (min)	203	≥ 60	NBR 16697: 2018
	Blaine (cm ² /g)	4600	4900±200	NBR 16372: 2015
	Finura (75µm) (%)	2,0	≤ 6,0	NBR 16697: 2018
Teor de álcalis	Na ₂ O _{eq}	0,72 (%)	0,9 ± 0,1	NBR 15577: 2018

¹Dados fornecidos pelo fabricante

Foram selecionados 6 agregados graúdos de diferentes locais no estado do Paraná e um agregado do estado do Mato Grosso do Sul, para análise de reatividade, nomeados de G1 a G5 para identificar os agregados oriundos de gnaisse e B1 a B2 os agregados de origem basáltica. Os agregados foram escolhidos devido a registros e testes preliminares onde os mesmos apresentavam potencial reatividade. A Figura 12 apresenta as localidades das jazidas onde foram coletadas as amostras para os ensaios.

Figura 12: Localização das jazidas no estado do Paraná - BR



Todos os agregados utilizados são de origem paranaense, exceto o agregado B2 que foi coletado no estado do Mato Grosso do Sul. Optou-se pela utilização de um agregado proveniente do estado do Mato Grosso do Sul devido à existência de evidências históricas de sua potencial reatividade, conforme estudos realizados durante a construção da Usina Hidrelétrica de Jupiá, nos quais foram identificados agregados da região como suscetíveis à reação álcali-agregado (RAS) (Gallo et al., 2007)

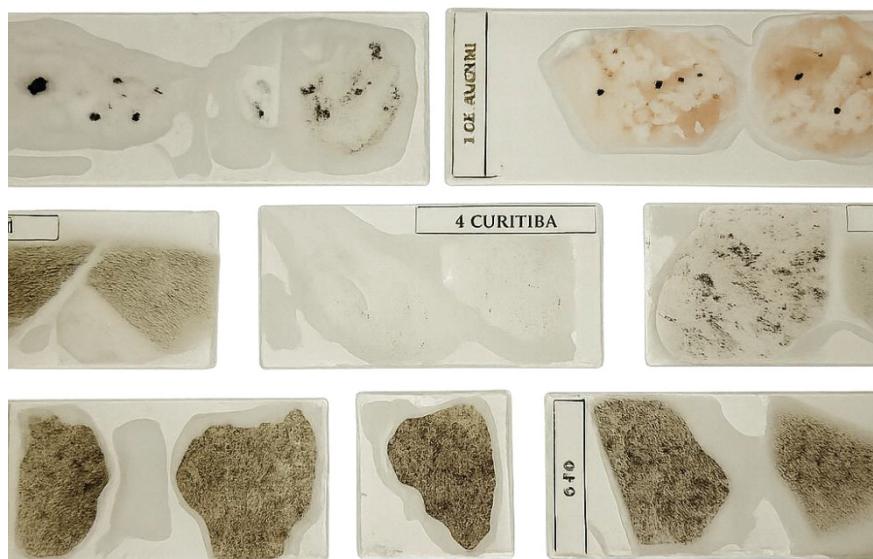
Foram realizados ensaios físicos no agregado graúdo seguindo normas técnicas específicas para sua caracterização. Entre os procedimentos adotados, incluem-se a verificação da massa específica (NBR NM 53:2009), a determinação da massa unitária solta e compactada (NBR NM 45:2006), a análise da absorção de água (NBR NM 53:2009) e a quantificação do teor de material pulverulento (NBR NM 46:2003). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Características físicas dos agregados

_tipo	Absorção (%) NM 53: 2009	Massa específica (g/cm³) NM 53: 2009	Massa unitária compacta seca (g/cm³) NM 45: 2006	Massa unitária solta seca (g/cm³) NM 45: 2006	Material pulverulento (%) NM 46: 2003
G1	Gnaisse	0,41	2,59	1,49	1,38
G2	Gnaisse	0,93	2,81	1,67	1,58
G3	Gnaisse	1,61	2,76	1,47	1,33
G4	Gnaisse	1,43	2,78	1,48	1,39
G5	Gnaisse	0,5	2,59	1,51	1,43
B1	Basalto	1,6	2,75	1,68	1,58
B2	Basalto	1,62	2,78	1,69	1,59

Foi realizada análises de petrografia no laboratório Geolab de Pernambuco, especializado para a preparação de lâminas delgadas de rocha polida (Figura 13). Nesse processo, uma película de aproximadamente 30 µm de espessura é aderida à superfície de uma lâmina de vidro com dimensões de 27x46x2 mm. Na confecção foi utilizada Alumina nas granas 180-1000 para desbaste e polimento, além de cola EpoxiGlass.

Figura 13: Imagens das lâminas delgadas de rocha polida para análise petrográfica



A descrição petrográfica foi realizada no mesmo laboratório, com o auxílio de microscópio petrográfico equipado com sistema de luz transmitida. As abreviaturas minerais aqui utilizadas têm como referência a lista de Whitney et al., (2010) recomendada pela International Union of Geological Sciences (IUGS). As propriedades dos minerais foram descritas seguindo as diretrizes da NBR 15577-3 (ABNT, 2018) com base no Banco de

dados do Museu de Minerais Heinz Ebert., (2017) e no Guia de Minerais Transparentes ao Microscópio Petrográfico (Frank, 2018).

3.2.2 Teste acelerado das barras de argamassa (AMBT)

A NBR 15577: 2018 parte 4 indica o traço a ser utilizado nas misturas das argamassas para a análise reativa dos agregados miúdos. Assim, a proporção utilizada foi 1: 2,25: 0,47 (cimento: agregado miúdo: relação água/aglomerante).

Os agregados foram coletados nas jazidas em granulometria correspondente a areia de britagem e após peneirados nas frações granulométricas requeridas pela norma conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Granulometria requerida do material para ensaio

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material	
Passante (mm)	Retido (mm)	%	G
4,75	2,36	10	99,0
2,36	1,18	25	247,5
1,18	0,60	25	247,5
0,60	0,30	25	247,5
0,30	0,15	15	148,5

FONTE: NBR 15577-4.

Os materiais foram misturados e posteriormente preparou-se 3 corpos de prova prismáticos, nas dimensões de 25 x 25 x 285 mm, os quais foram submetidos à câmara úmida por 24h, com umidade acima de 95% e temperatura controlada de $23^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C. Após a desmoldagem, as amostras foram submersas em água por 24h à uma temperatura de 80 °C, e em seguida imersos em solução de hidróxido de sódio (NaOH), à $80^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C por 30 dias.

As leituras de expansão foram realizadas utilizando um relógio comparador, antes da imersão na solução de NaOH (inicial) e 3 vezes por semana durante todo o período do ensaio. A expansão induzida foi medida comparando-se a medida inicial e a medida realizada ao longo do período de exposição.

3.2.3 Teste de prismas de concreto (CPT)

A NBR 15577-6: 2018 prescreve parâmetros de dosagem e mistura dos materiais a serem submetidos ao teste de expansão pelo método dos prismas de concreto (CPT). Dessa forma seguem requisitos:

- consumo de cimento de $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$)
- relação água/cimento (a/c) de 0,45
- volume de agregado graúdo, no estado compactado seco, $70 \pm 0,2\%$ do volume total do concreto.

O método de dosagem do concreto foi da ABCP/ACI (método de dosagem proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland adaptado da American Concrete Institute).

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos utilizados seguiu as prescrições da NBR 15577-6, a qual divide o total de agregados em 1/3 para cada granulometria: retidos na peneira 12,5 mm; passante na peneira 12,5 mm e retido na 9,5 mm e passante na peneira 9,5 mm e retida na 4,75 mm. A massa específica da areia padrão do IPT, empregada como agregado miúdo, foi de $2,62 \text{ g/cm}^3$. O agregado miúdo utilizado para a produção dos concretos foi a areia padronizada IPT, conforme estabelecido pela NBR 15577 parte 4 (2018).

A Tabela 8, apresenta o consumo de materiais por m^3 de concreto.

Tabela 8: Consumo de materiais em kg/m^3 de concreto

Agregado	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água
G1	420	699	1057	189
G2	420	792	1036	189
G3	420	792	1029	189
G4	420	670	1057	189
G5	420	759	1036	189
B1	420	759	1029	189
B2	420	703	1078	189

Foram misturados os materiais e produzidos 3 prismas de concreto para cada agregado nas dimensões de 75 x 75 x 285 mm. Conforme prescrito na norma, fez-se necessário adicionar NaOH na água de amassamento afim de atingir o equivalente alcalino ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) de 1,25%.

Ao findar a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à câmara úmida, com umidade de 95% e temperatura controlada de 23 °C, por 24h. Foi executada a medida do comprimento inicial e após isso os corpos de prova foram alocados em baldes com uma película de água no fundo para a garantia de umidade à 95%, e submetidos à temperatura de 38 °C, em uma sala climatizada, pelo período de um ano, nos quais foram realizadas medidas aos 7 dias e a cada mês.

3.2.4 Teste Brasileiro Acelerado em Prismas de Concreto (ABCPT)

O teste brasileiro acelerado em prismas de concreto (ABCPT) foi realizado com a produção de três prismas de concreto para cada agregado, nas dimensões de 75 x 75 x 285 mm. As proporções de dosagem seguiram o mesmo procedimento utilizado no método CPT. Após a moldagem, os corpos de prova foram acondicionados em câmara úmida por 24 horas. Em seguida, foi realizada a medida inicial, e os corpos de prova foram imersos em uma solução de NaOH a uma temperatura de 80 °C, por um período de 30 dias, com leituras semanais.

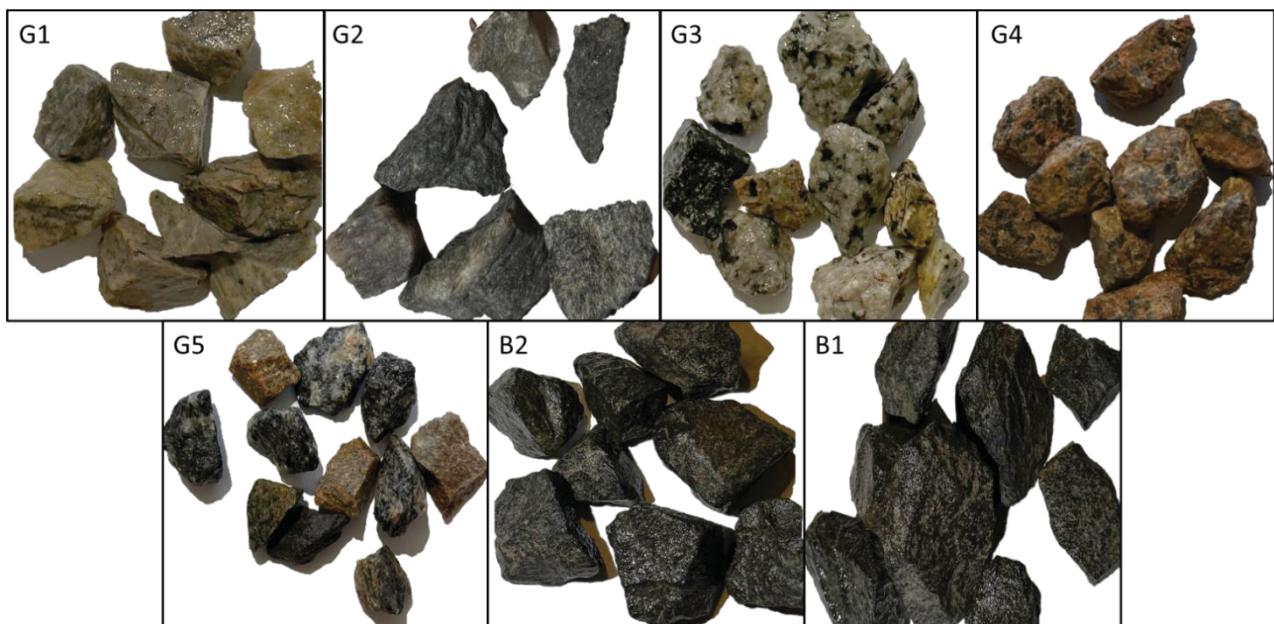
Conforme Sanchez (2008) e Sanchez, Kuperman e Helene (2011), o meio no qual os corpos de prova são imersos não deve apresentar difusão entre a solução de NaOH e o concreto. Assim, o ensaio ABCPT é acelerado unicamente pela temperatura. Para atender a essa exigência, a molaridade da solução de NaOH foi ajustada para ser equivalente à do meio interno do concreto. Dessa forma, adicionou-se NaOH até atingir 1,25%, conforme o equivalente alcalino do concreto. O método ABCPT foi utilizado com base nos estudos de Sanchez (2008) e Sanchez et al. (2011), que estabelecem que os limites para este ensaio são os mesmos aplicados ao método de prismas de concreto com duração de um a dois anos (CPT).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Análise petrográfica

Como a cinética da RAA depende do grau de cristalinidade, densidade e área específica interna e externa dos agregados, realizou-se uma investigação mais aprofundada desses grãos por meio do ensaio de petrografia, uma vez que agregados com menor cristalinidade, baixa densidade e elevada área específica tendem a apresentar maior reatividade com os álcalis do cimento (Figueira et al., 2019). A Figura 14, apresenta as amostras de brita selecionadas para a realização do ensaio.

Figura 14: Amostras de britas selecionadas para análise petrográfica



As amostras analisadas apresentaram variações na coloração, textura e estrutura mineralógica. O agregado G1 contém fragmentos de rocha rósea clara e granulometria muito fina, com foliação bem definida devido à milonitização (processo de alteração mineralógica), característica também observada no G2, que apresenta coloração cinza clara e granulometria fina.

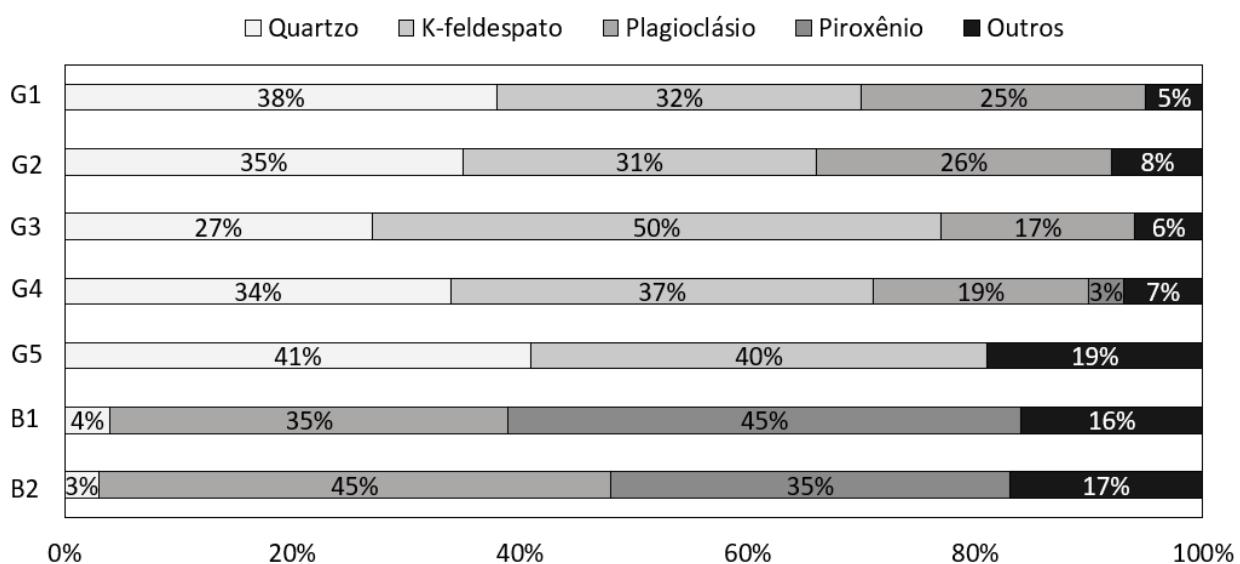
A amostra G3 é composta por fragmentos esbranquiçados com cristais equigranulares de granulometria média, estrutura maciça e presença de minerais opacos e biotita. O G4 contém fragmentos avermelhados-alaranjados com cristais grossos e inequigranulares de quartzo e feldspato, além de indícios de argilização. Já o G5 reúne

fragmentos de duas rochas distintas, uma acinzentada com cristais inequigranulares de granulometria média a grossa, com cristais que podem alcançar até 1 mm, e leve orientação, e outra avermelhada, de granulometria fina e cristais equigranulares.

Os agregados B1 e B2 possuem características semelhantes, compostos por fragmentos de rochas de tonalidade cinza escuro a preta, com estrutura holocrystalina isotrópica e textura afanítica de granulação fina.

A Figura 15 apresenta a porcentagem modal dos minerais estimada visualmente durante a análise petrográfica para os agregados G1, G2, G3, G4, G5, B1 e B2.

Figura 15: Porcentagem modal dos minerais dos agregados G1, G2, G3, G4, G5, B1 e B2



A avaliação petrográfica de agregados é conduzida a partir da observação de seções delgadas ao microscópio, um procedimento que deve ser executado por um especialista capacitado, conforme indicado pelas normas RILEM TC 191 (RILEM, 2016), NBR 15577-1 (ABNT, 2018), ASTM C295 (ASTM, 2008b) e BS 7943 (BIS, 2018). Contudo, tais normativas não determinam valores-limite específicos de minerais reativos que permitam classificar um agregado como nocivo sem a realização de testes complementares. A NBR 15577-3 (ABNT, 2018c), baseia-se na Canadian Standards Association A23.1-04 (CSA, 2014a), que especifica os principais minerais e tipos de rocha que devem ser reconhecidos na análise petrográfica devido à sua propensão à RAS, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9: Minerais e rochas suscetíveis à RAA

Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica metaestável e vidros vulcânicos		
Material Reativo	Rochas de Ocorrência	
	Rochas sedimentares	Rochas vulcânicas
Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico	Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito	Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riolito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítreia, além de alguns basaltos
Rochas potencialmente reativas contendo quartzo		
Material Reativo	Tipos de Rocha	
Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino. Quartzo macrogranular fraturado, e/ou deformado, podendo conter agregados de quartzo microcristalino no contato do grão (textura mortar)	Chert, veio de quartzo, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso e calcário com quartzo microgranular. Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino. Outras rochas que contenham quartzo granítico, granito, granito charnockítico ou criptocristalino, tais como: Rochas ígneas: indicativas de deformação ou recristalização que apresentem feições e fases metamórficas. Rochas sedimentares: grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso e filito. Rochas metamórficas: quartzito, mica xisto, xisto, filito, ardósia, rochas miloníticas e cataclásticas.	

Fonte: NBR 15577-3 (ABNT, 2018)

A classificação de um agregado como potencialmente inócuo ou reativo também pode ser feita com base nos valores máximos recomendados pela NBR 15577-3 (ABNT, 2018a). De acordo com essa norma, limites aceitáveis incluem 5% de quartzo microgranular ou deformado, 3% de calcedônia, 1% de cristobalita ou tridimita, 3% de vidro vulcânico e 0,5% de opala. Acima desses valores, os agregados são classificados como potencialmente reativos, mas a decisão final pode depender da experiência do profissional e das demais características observadas na amostra. No entanto, alguns países, como Alemanha, Dinamarca e França, consideram agregados potencialmente reativos quando a quantidade de minerais ricos em sílica amorfada ultrapassa 2% (Figueira et al., 2019). A Tabela 10 indica um resumo da mineralogia dos agregados e sua classificação quanto a reatividade.

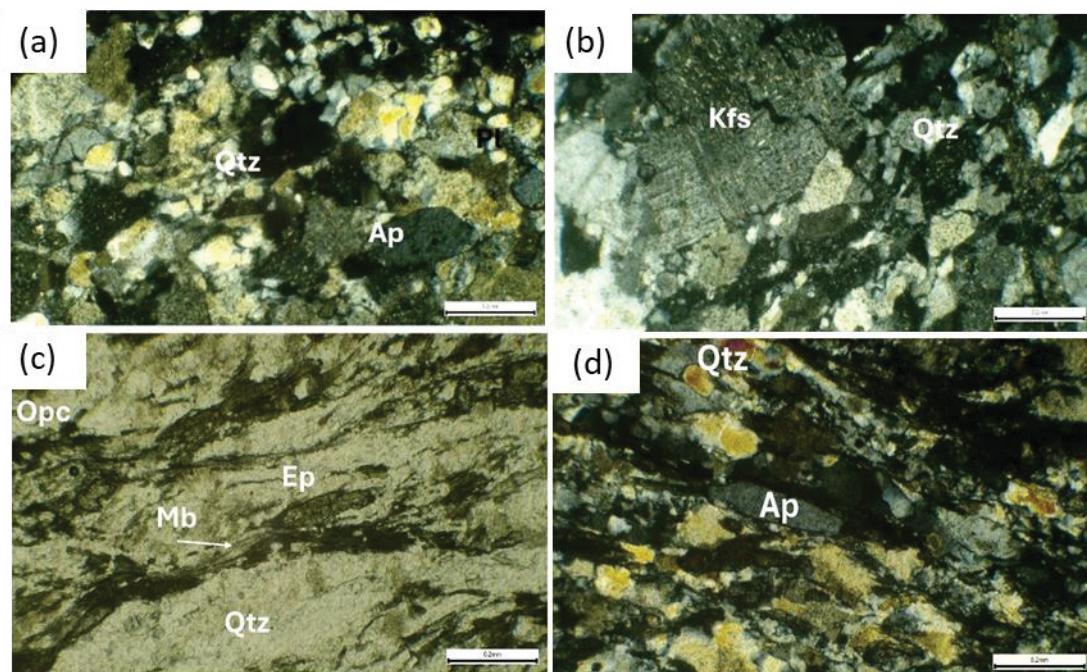
Tabela 10: Características petrográficas dos agregados e classificação quanto o potencial reativo

Agregado	Composição Mineralógica	Estrutura e Alteração	Normas/Referências - Limites	
			NBR 15577-3 (ABNT, 2018a)	RILEM TC 191 (RILEM, 2016); ASTM C295 (ASTM, 2008b) e BS 7943 (BIS, 2018)
G1	Quartzo, feldspato, opacos, epidoto e apatita	Estrutura milonítica, deformada, microfissuração intensa, granulação fina, 15% de quartzo microgranular	> 5% de quartzo microgranular ou deformado, 3% de calcedônia, 1% de cristobalita ou tridimita, 3% de vidro vulcânico e 0,5% de opala	> 2% de sílica amorfna Presença de minerais reativos e deformações estruturais
G2	Quartzo, feldspato, opacos, epidoto e apatita	Estrutura milonítica, deformada, microfissuração intensa, granulação fina, 15% de quartzo microgranular	Altamente reativo	Altamente reativo
G3	Quartzo, feldspato, anfibólio, biotita e opacos	Estrutura maciça, sem microfissuração, sem quartzo microgranular	Altamente reativo	Reativo
G4	Quartzo, feldspato, anfibólio, biotita e opacos	Estrutura maciça, sem microfissuração, sem quartzo microgranular	Inócuo	Inócuo
G5	Quartzo, feldspato, anfibólio, biotita e opacos	Hidrotermalização, argilização, cloritização, microfissuração intensa, 5% de quartzo microgranular	Potencialmente reativo	Potencialmente reativo
B1	Feldspato, piroxênio, sílica amorfna, celadonita	Granulação fina, 4% de sílica amorfna e 3% de vidro vulcânico	Inócuo	Potencialmente reativo
B2	Feldspato, piroxênio, sílica amorfna, celadonita	Granulação fina, 3% de sílica amorfna e 2% de vidro vulcânico	Inócuo	Potencialmente reativo

Os agregados G1, G2, G3, G4, G5, B1 e B2 apresentam diferenças significativas em sua mineralogia, estrutura, granulação e grau de alteração, características que influenciam diretamente sua suscetibilidade à RAA, como observado na Tabela 10.

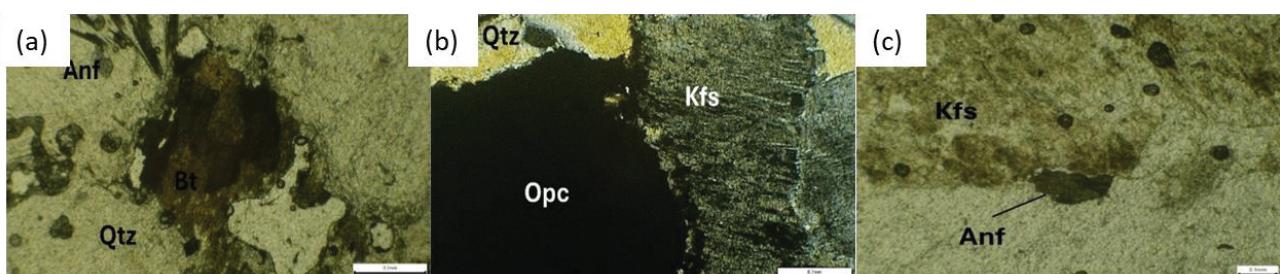
Os agregados G1 e G2 são compostos principalmente por quartzo (Qtz) e feldspato (Kfs) (Figura 16ab), com minerais subordinados como opacos (Opc), epidoto (Ep), apatita (Ap) e mica branca (Figura 16cd). Eles possuem uma estrutura milonítica ou deformada, que resulta de processos tectônicos intensos, promovendo microfissuração e recristalização do quartzo (Figura 16abc). Além disso, apresentam granulação fina e 15% de quartzo microgranular, um fator crítico para a reatividade. Essa combinação de estrutura deformada, granulação fina e alta presença de quartzo microgranular torna esses agregados potencialmente reativos, sendo os mais suscetíveis à RAA.

Figura 16: Amostra de rocha em lâmina apresentando (a-b) Agregado G1 - cristais de quartzo recristalizados com aspecto límpido (c) Agregado G2 - cristais de quartzo recristalizado, minerais opacos, mica branca e epidoto orientados seguindo a foliação da rocha (d) Agregado G2 - cristais de apatita e fitas de quartzo orientados seguindo a foliação da rocha.



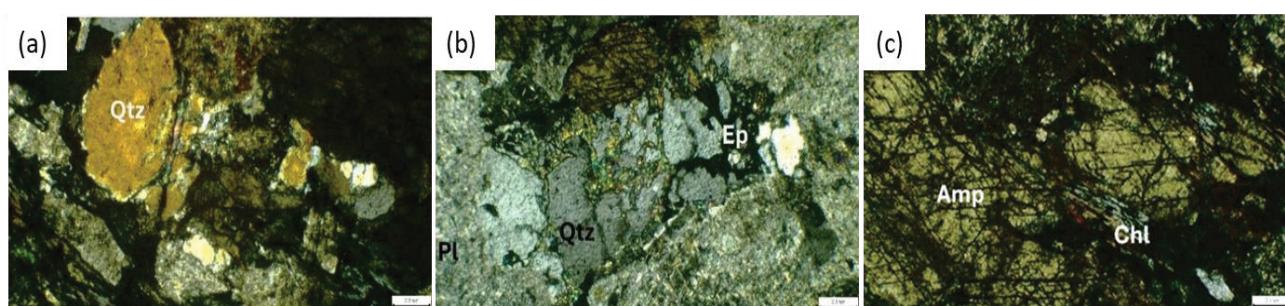
Os agregados G3 e G4, também compostos por quartzo (Qtz) e feldspato (Kfs), incluem minerais adicionais como anfibólito (Anf), biotita (Bt) e opacos (Opc) (Figura 17). No entanto, apresentam estrutura maciça, sem microfissuração visível e sem quartzo microgranular, reduzindo significativamente sua propensão à reação o que os classifica como inóculos segundo todas as normativas.

Figura 17: Amostra de rocha em lâmina apresentando (a) Agregado G3 - cristais de biotita associada com minerais opacos e anfibólito acicular (b) Agregado G3 - cristal de mineral opaco milimétrico em contato com grãos de quartzo e feldspato potássico (c) Agregado G4 - cristais de feldspato apresentando cristais de anfibólito.



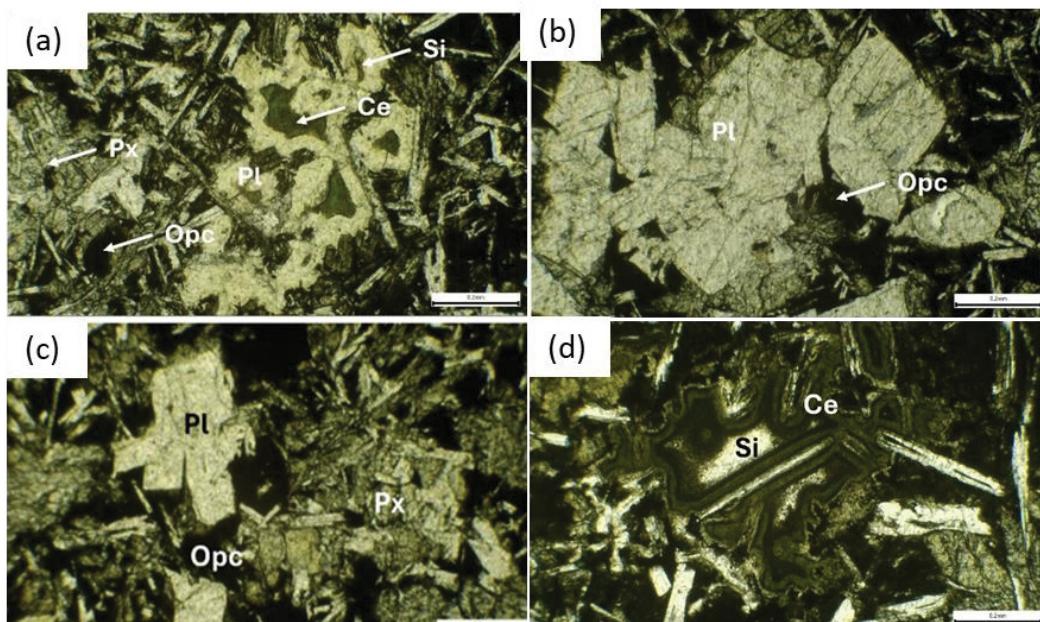
O G5, por sua vez, possui uma composição semelhante a G3 e G4, mas exibe um grau mais elevado de alteração hidrotermal, argilização e cloritização (Figura 18). Além disso, apresenta microfissuração intensa e 5% de quartzo microgranular, aumentando sua vulnerabilidade à RAA.

Figura 18: Amostra de rocha em lâmina apresentando o agregado G5 (a-b) cristais de quartzo recristalizados e fraturados preenchidos por epidoto (c) Fragmento de rocha apresentando cristais de anfibólito e clorita



Os agregados B1 e B2, rocha ígnea vulcânica equigranular, de granulação fina compostos por feldspato (Kfs) e piroxênio (Px), diferenciam-se dos demais pela presença de sílica amorfa (Qtz) e celadonita (Ce) (Figura 19). Contudo, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018a), B1 e B2 são considerados inócuos. O agregado B2 contém 3% de sílica amorfa e 2% de celadonita, enquanto o B1 possui 4% de sílica amorfa e 3% de celadonita, permanecendo dentro dos valores aceitáveis definidos pela norma brasileira. Apesar disso, a presença dessas fases amorfas ainda pode representar um fator de risco para a reatividade ao longo do tempo.

Figura 19: Fragmento de rocha apresentando (a-b) (a-b) cristais de sílica amorfa e celadonita associados a vesículas e cristais de plagioclásio bem definidos apresentando geminação (c) Agregado B2 - Cristais prismáticos de plagioclásio imersos aleatoriamente numa matriz mais fina e agregados de piroxênio com forma prismática e coloração castanho claro (d) Agregado B2 - grãos de celadonita e sílica amorfa associados a vesículas.



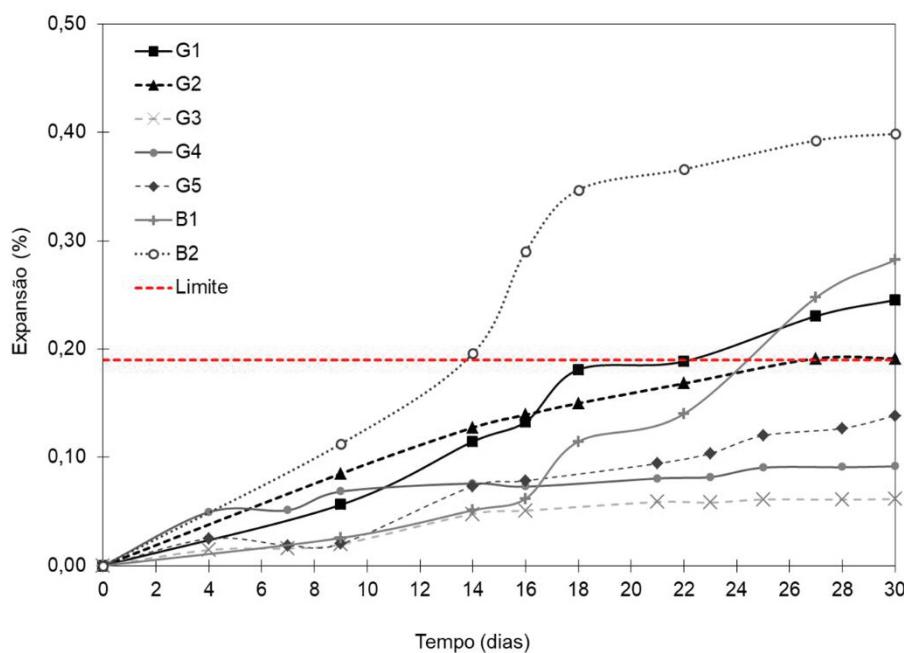
A suscetibilidade dos agregados à RAA está diretamente relacionada a algumas características fundamentais. A presença de quartzo microgranular, como ocorre nos agregados G1, G2 e G5, aumenta significativamente a reatividade, pois esse tipo de quartzo é mais instável e propenso à expansão. A microfissuração, observada principalmente em G1, G2 e G5, facilita a penetração da solução alcalina e acelera o ataque químico, promovendo maior degradação.

Ainda assim, pesquisas apontam que a simples presença de minerais reativos nos agregados não necessariamente resulta em expansões elevadas no concreto. Yang e Gao, (2022) não identificaram uma relação proporcional entre o teor de sílica reativa nos agregados e os níveis de expansão do concreto ao longo do tempo. Resultados semelhantes foram obtidos por Rolim (2010), que demonstrou que nem todos os minerais presentes na composição dos agregados são efetivamente capazes de desencadear a RAA. O estudo também evidenciou que fatores como a redução do tamanho médio dos grãos e o aumento da área superficial dos agregados favorecem a expansão, uma vez que elevam a disponibilidade do material reativo para interações químicas.

3.3.2 Análise de expansão

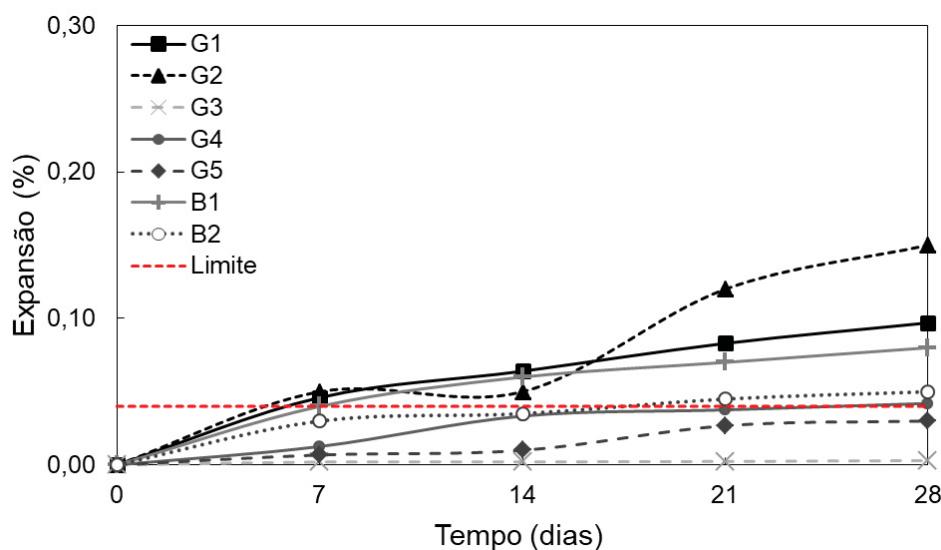
Os resultados do teste acelerado em barras de argamassa (AMBT), do teste brasileiro acelerado em prismas de concreto (ABCPT) e do teste de prismas de concreto (CPT) estão apresentados na Figura 20, Figura 21 e Figura 22.

Figura 20: Média das expansões das argamassas ao longo do tempo pelo método AMBT da NBR 15577: 2018 parte 4.



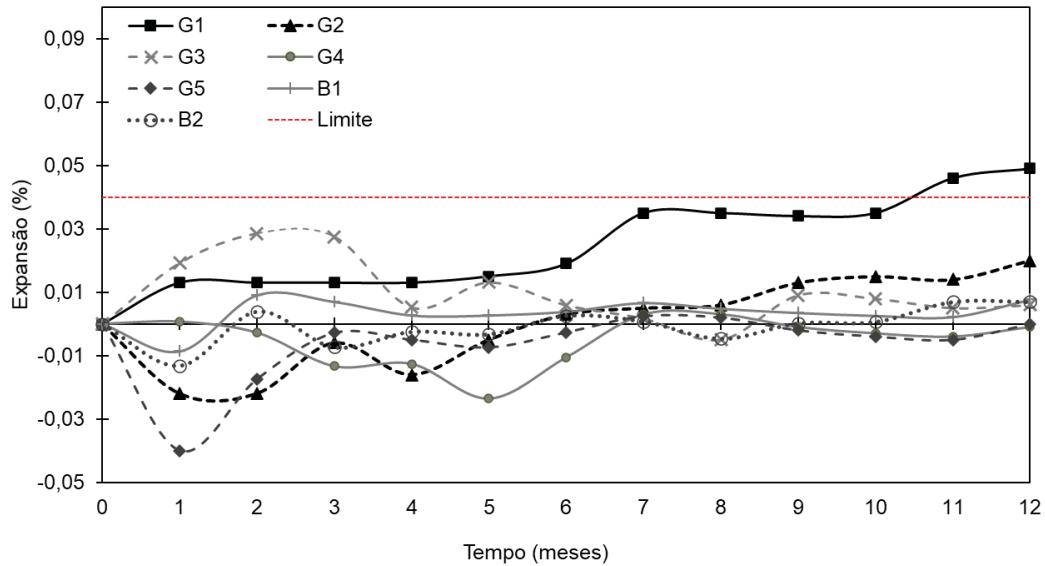
*Resultados dos agregados G1, G2, B1 e B2 (Langaro, 2023).

Figura 21: Média das expansões dos concretos ao longo do tempo de teste ABCPT de acordo com o procedimento de Sanchez (2008) e Sanchez, Kuperman, Helene (2011)



*Resultados dos agregados G1, G2, B1 e B2 (Langaro, 2023).

Figura 22: Média das expansões dos concretos ao longo do tempo de teste CPT de acordo com a NBR 15577:2018 parte 6



*Resultados dos agregados G1, G2, B1 e B2 (Langaro, 2023).

O agregado é considerado não reativo ou inóculo quando a expansão no ensaio de barras de argamassa não ultrapassa 0,19% aos 30 dias, como prescrito na NBR 15577-1. Já em ensaio realizado em prismas de concreto o limite indicado é até 0,04% ao final de 365 dias.

Quando o agregado se classifica como reativo, ou seja, ultrapassa os limites estabelecidos pela norma, ele pode ainda ser chamado de potencialmente reativo grau R1 quando se encontram na faixa de expansão de 0,19% a 0,40% em barras de argamassa, e de 0,04% a 0,012% para o concreto.

O agregado B2 no teste de barras de argamassa, foi o que apresentou uma curva de expansão mais acentuada, indicando em torno de 0,402% no limite da classificação. Já quando o mesmo agregado foi submetido aos ensaios de prismas de concreto, o mesmo apresentou um potencial reativo inferior a outros três agregados, o G1, G2 e B1.

No caso dos resultados do ensaio ABCPT, Figura 21, o agregado que se apresentou mais reativo foi o agregado G2, o qual atingiu valores de expansão no limite estabelecido pela norma no ensaio de barras de argamassa, porém em menor intensidade que os agregados B1, B2 e G1.

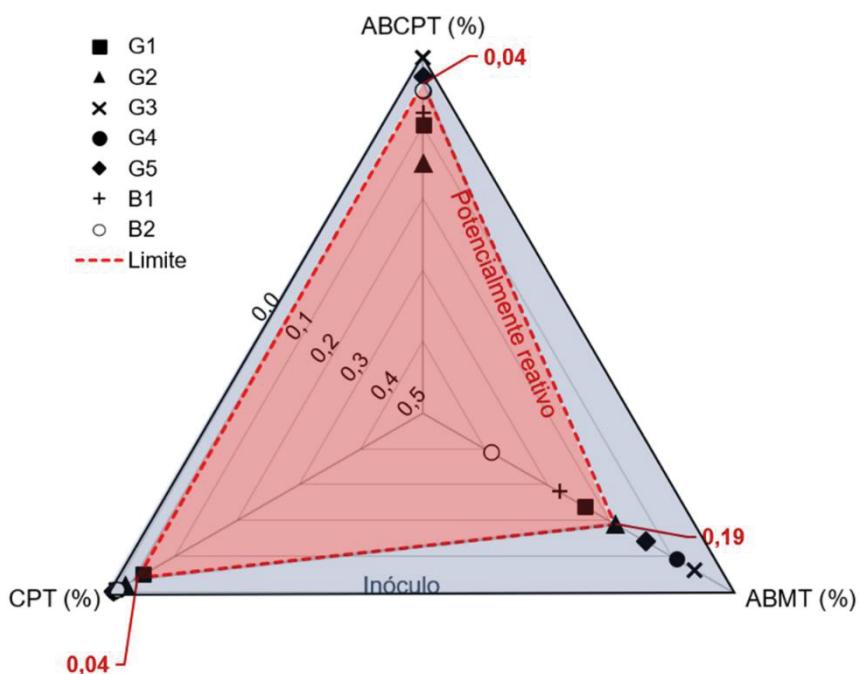
O agregado G1 apresentou potencial reativo para ambos os testes com concreto apresentando-se menos reativo que B1 e B2 para o ensaio de AMBT e menos reativo que G2 para o método de ABCPT e os demais agregados não apresentaram reatividade.

Para o teste CPT (Figura 22) o agregado G1 foi o que se apresentou mais reativo atingindo ao final do período de testes 0,049% de expansão, acima do limite estabelecido pela norma de 0,04%. O agregado G2, B1 e B2 que apresentaram comportamento reativo para os testes AMBT e ABCPT, não ultrapassaram o limite de expansão para o CPT, sendo então classificados como não reativos.

Os demais agragdos, G3, G4 e G5, apresentaram expansões inferiores aos limites estipulados por norma em todas as as análises (ABMT, ABCPT e CPT), assim foram caracterizados como inóculos.

A Figura 23 apresenta um esquema comparativo das análises de expansão ABMT, ABCPT e CPT para os agregados.

Figura 23: Limite de caracterização com agregado reativo comparativo dos resultados de expansão (ABMT, ABCPT e CPT) para os agregados



Comparando os resultados no ensaio de AMBT e ABCPT pode se constatar quais os agregados que apresentam expansões acima do limite estabelecido em cada método de ensaio, assim classificando os agregados G1, B1 e B2 como potencialmente reativos. Apesar

de essa comparação facilitar a classificação faz-se necessário a realização de outro ensaio com prismas de concreto para poder classificá-los corretamente, pois a confiabilidade do método AMBT é questionada por diversos autores (Thomas et al., 2006; Alaejos et al., 2014; Golmakani; Hooton, 2019), por apresentar resultados falso positivos.

Comparando os métodos de prismas de concreto, nota-se que os agregados, G1, G2, B1 e B2 que anteriormente foram classificados como potencialmente reativos pelo comparativo entre os métodos AMBT e ABCPT, quando submetidos ao ensaio CPT, classificaram-se como inóculos. É fácil notar que nesse caso o único agregado que se manteve acima dos limites estabelecidos por norma tanto para o método ABCPT quanto para o CPT, foi o G1, o mesmo que anteriormente já havia sido classificado como potencialmente reativo.

Um aspecto relevante a ser destacado é a classificação dos basaltos como potencialmente reativos nos ensaios AMBT e ABCPT, apesar de, em condições reais de campo, a ocorrência da reação ser pouco provável. Esse resultado contrasta com sua classificação petrográfica, pois, embora seja considerado inócuo segundo a NBR 15577-3 (ABNT, 2018), o basalto apresenta uma quantidade de sílica amorfa disponível suficiente para ser classificado como potencialmente reativo e até reativo conforme os critérios adotados por França, Alemanha e Dinamarca (Figueira et al., 2019), bem como pelas normativas internacionais RILEM TC 191 (RILEM, 2016), ASTM C295 (ASTM, 2008b) e BS 7943 (BIS, 2018). Porém, Hasparyk (2022) ressalta que não há registros de manifestações de Reatividade Álcali-Sílica (RAS) em obras brasileiras que utilizam agregados de basalto, o que reforça a necessidade de um melhor entendimento sobre a aplicabilidade dos ensaios laboratoriais na avaliação desse tipo de material.

A Tabela 11 apresenta um resumo da classificação os agregados estudados de acordo com os ensaios realizados.

Tabela 11: Classificação dos agregados quanto os ensaios de expansão realizados.

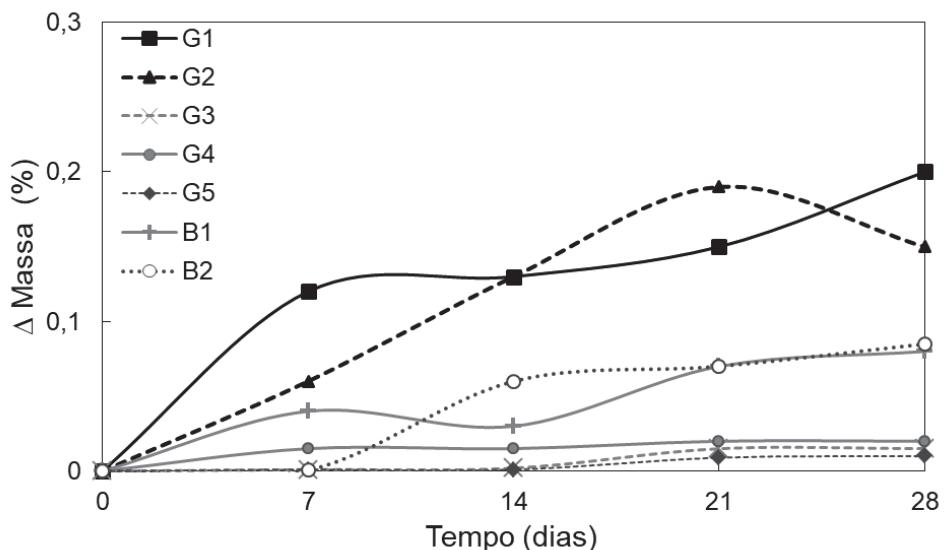
Agregado	AMBТ ¹	ABCPT ²	CPT ¹
G1	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
G2	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Inóculo
G3	Inóculo	Inóculo	Inóculo
G4	Inóculo	Inóculo	Inóculo
G5	Inóculo	Inóculo	Inóculo
B1	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Inóculo
B2	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Inóculo

¹ NBR 15577 (2018)

² Sanchez (2008), Sanchez, Kuperman e Helene (2011)

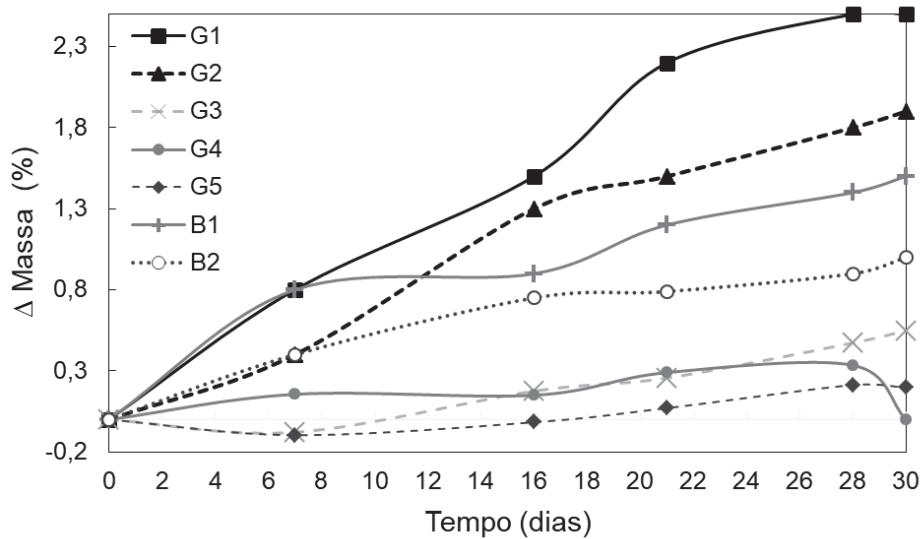
A Figura 24, Figura 25 e Figura 26 apresentam as variações de massa das amostras durante o ensaio de ABMT e ABCPT, ao longo da realização dos ensaios.

Figura 24: Variação de massa das amostras submetidas ao ensaio AMBT.



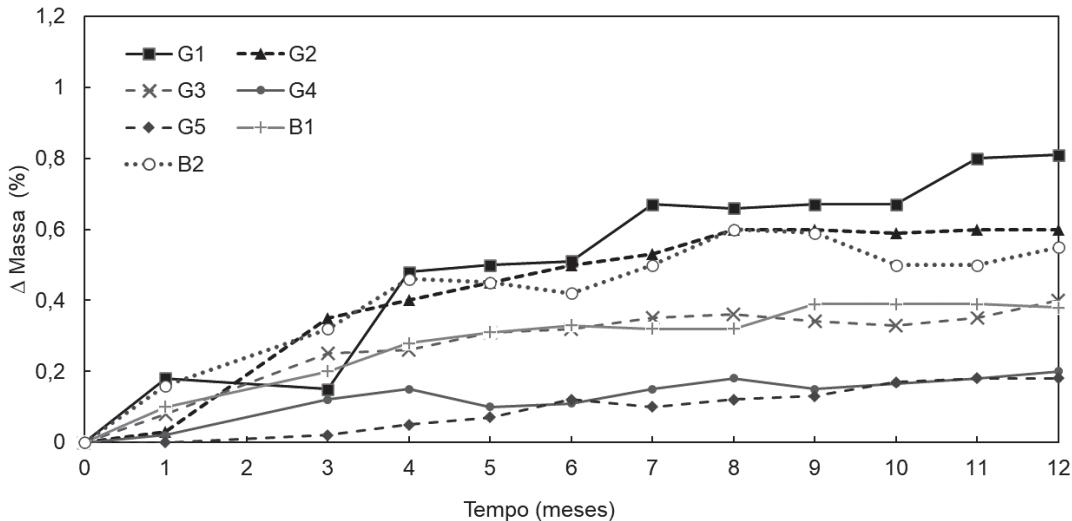
*Resultados dos agregados G1, G2, B1 e B2 (Langaro, 2023).

Figura 25: Variação de massa das amostras submetidas ao ensaio ABCPT



*Resultados dos agregados G1, G2, B1 e B2 (Langaro, 2023).

Figura 26: Variação de massa das amostras submetidas ao ensaio CPT



*Resultados dos agregados G1, G2, B1 e B2 (Langaro, 2023).

Observa-se na Figura 24, Figura 25 e Figura 26 que os agregados G1 e G2 foram os que apresentaram variação de massa durante o período de realização dos ensaios de ABMT e ABCPT.s

Os ganhos de massa durante o ensaio de concreto (ABCPT) seguiram a mesma tendência dos agregados que apresentaram maior expansão, podendo estar relacionado com a formação de produtos expansivos de RAA.

Por outro lado, no caso do ensaio em argamassa (ABMT), o ganho de massa não seguiu a mesma tendência do comportamento da expansão, como é o caso do agregado G1 que obteve menor expansão média quando comparados com os outros agregados. Deve-se destacar que o ganho de massa inicial pode estar relacionado a absorção de água.

Durante a realização dos ensaios em concreto de longa duração (CPT), foi observada a ocorrência de lixiviação nos concretos com agregados de gnaisse. Lixiviação em concretos com ocorrência de RAA refere-se ao processo pelo qual soluções alcalinas percolam pelo concreto, dissolvendo e removendo íons solúveis. Esse fenômeno pode influenciar a expansão e o grau de deterioração do concreto, afetando a avaliação da reatividade dos agregados. A lixiviação é importante na interpretação dos resultados dos testes de RAA, pois pode alterar a concentração de álcalis e outros componentes químicos no concreto (Rivard et al., 2003; Sanchez, 2014; Costa; Mangialardi; Paolini, 2017). Além disso, a lixiviação tende a ser influenciada pelas condições de exposição, como temperatura e umidade, bem como pelo tamanho do corpo de prova (Lingard et al., 2013; Costa; Mangialardi; Paolini, 2017).

3.3.3 Discussão geral

A análise dos resultados obtidos evidencia diferenças marcantes no comportamento dos agregados em função de sua mineralogia e microestrutura, refletindo-se diretamente nas respostas dos distintos métodos de ensaio. Os basaltos B1 e B2 apresentaram expansões elevadas no AMBT e no ABCPT, mas se mantiveram estáveis no CPT. Esse comportamento está associado à presença de sílica amorfa e vidro vulcânico, fases com elevada solubilidade em meio altamente alcalino e sob temperatura elevada, condições que aceleram a cinética de dissolução e favorecem a formação rápida do gel reativo. No AMBT, em particular, a moagem do agregado até a faixa de areia aumenta a superfície de contato e intensifica a taxa de reação, o que explica a resposta mais severa desses basaltos nesse ensaio.

Por outro lado, o gnaisse microrrolado G1 apresentou reatividade significativa em todos os métodos, ultrapassando o limite de 0,04% no CPT. Esse resultado decorre da combinação de quartzo microgranular, deformado e intensamente microfissurado, que aumenta substancialmente a área de contato interna e cria caminhos preferenciais para o

transporte de umidade e íons alcalinos. Tais características permitem que a reação ocorra mesmo em condições menos agressivas, como no CPT a 38 °C, em que a difusão é mais lenta e o potencial químico é limitado à alcalinidade interna do concreto. Além disso, observou-se em concretos com gnaisse a ocorrência de lixiviação, que pode modificar o balanço de álcalis no sistema, sem, contudo, impedir a evolução da reação no agregado mais suscetível.

Essas diferenças também explicam a inversão no ranking de expansividade entre os métodos. Enquanto o AMBT e o ABCPT supervalorizam os basaltos com sílica amorfa devido à combinação de alta temperatura, elevado pH e maior área específica exposta, o CPT revela de forma mais fidedigna o risco em condições de serviço, destacando o gnaisse deformado como o agregado mais crítico. Nesse contexto, a dissolução da sílica amorfa nos basaltos ocorre de maneira rápida, mas limitada às condições de aceleração; já o quartzo microgranular deformado do gnaisse, embora dissolva-se mais lentamente, mantém uma reatividade contínua ao longo do tempo, sustentada por sua microestrutura. Assim, a análise integrada dos resultados demonstra que G1 apresenta risco de expansão lenta e progressiva em campo, exigindo medidas mitigadoras, enquanto B1 e B2, apesar de reativos em ensaios acelerados, mostraram comportamento inócuo no CPT, indicando risco reduzido em condições reais de exposição.

De forma geral, os resultados confirmam que a avaliação da reatividade de agregados não pode se basear apenas em um método isolado, sendo essencial considerar a mineralogia, a morfologia e a microestrutura dos grãos, bem como os mecanismos de transporte, dissolução e equilíbrio termodinâmico do sistema. Nesse sentido, os agregados G3 e G4 mostraram-se inócuos em todos os ensaios, configurando-se como opções seguras para uso em concreto, enquanto G5, embora tenha apresentado potencial de reatividade em análises petrográficas, não exibiu expansões significativas e pode ser considerado viável sob especificações conservadoras. Já o gnaisse G1 deve ser evitado em obras sem a adoção de medidas de mitigação, reforçando a importância de se compreender não apenas a composição mineralógica, mas também a história de deformação e a microestrutura dos agregados.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da aplicação dos métodos de ensaio de expansão AMBT, ABCPT e CPT, foi possível identificar a reatividade dos agregados deste experimento.

- O agregado G1 foi o único classificado como potencialmente reativo em todos os ensaios, indicando maior risco de reatividade em concretos expostos a condições favoráveis.
- Os agregados G2, B1 e B2 apresentaram reatividade nos testes AMBT e ABCPT, mas foram classificados como inócuos no teste CPT. Este resultado gera um alerta sobre o uso do ensaio AMBT e ABCPT para classificar o agregado quanto a RAA, pois resultam em classificações falso-positivas. Com os 7 agregados do experimento, conclui-se que dos 4 agregados que ultrapassam os limites no ensaio AMBT, apenas 25% teve confirmação de ser reativo no ensaio CPT.
- Os agregados G3, G4 e G5, apresentaram expansões inferiores aos limites normatizados e assim foram classificados como inóculos.
- O ensaio AMBT mostrou limitações, pois identificou alguns agregados como reativos quando os ensaios em concreto (CPT) indicaram comportamento inócuo. Isso reforça a importância de validar os resultados desse método com ensaios mais representativos.
- A análise petrográfica revelou que os agregados G1 e G2 possuem estrutura milonítica e alta porcentagem de quartzo microgranular, fatores que contribuem para a reatividade.
- A presença de sílica amorfa nos basaltos (B1 e B2) sugere um potencial reativo segundo normas internacionais, mas na prática, não existem casos de ocorrência da RAA em basaltos no Brasil.
- Os testes confirmaram que a combinação de diferentes métodos de ensaio é essencial para uma caracterização confiável da reatividade dos agregados, garantindo a durabilidade e a segurança das estruturas de concreto.

Assim, destaca-se a importância da utilização de testes associados para a caracterização de agregados quanto a sua reatividade, visando obter maior confiabilidade nas avaliações sobre a tendência de um agregado gerar reação álcali-agregado em condições de campo.

4 DESENVOLVIMENTO DAS PROPORÇÕES DE MISTURA DO CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO

4.1 INTRODUÇÃO

A dissociação do CO₂ do calcário (CaCO₃) é responsável por 90% das emissões de gases poluentes na atmosfera decorrentes da clinquerização, principal processo de produção do cimento Portland. Considerando a totalidade de atividades envolvidas, estima-se que para cada tonelada de cimento Portland produzido, cerca de uma tonelada de dióxido de carbono é liberado na atmosfera, totalizando 8% das emissões mundiais de CO₂ (Terán-Cuadrado et al., 2024).

A fim de mitigar os efeitos poluentes causados pela indústria cimenteira, medidas como adição de materiais pozolânicos ao clínquer têm tomado proporção maior nas últimas décadas. Neste contexto, a busca por materiais que possuam propriedades satisfatórias que possam substituir parcialmente o cimento gerou uma gama de pesquisas e desenvolvimento na área. Assim, tem-se observado que materiais como escória de alto forno, fosfogesso, cinzas e caulim apresentam-se como uma alternativa com potencial de obtenção de compósitos com características benéficas relacionadas ao aumento de resistência mecânica e durabilidade das estruturas (Langaro, 2020; Aiken et al., 2021; Frare et al., 2024a).

Além das pesquisas relacionadas às adições ao cimento Portland, a busca por materiais cimentícios com impacto ambiental reduzido vem tornando-se frequente. Nesse contexto, surgem os cimentos verdes, ou seja, cimentos livres de clínquer, como os álcaldiativados (CAA) e os geopolímeros (Langaro et al., 2017; Aiken et al., 2021).

Os cimentos álcaldi-ativados (CAA's) são desenvolvidos a partir de matérias primas ricas em óxido de cálcio (CaO) como a escória de alto forno, em sílica (SiO₂), como a cinza volante, e em alumina (Al₂O₃), como o metacaulim, que quando ativados por uma solução alcalina geram como principal produto o gel CSH. Os geopolímeros, no entanto, são considerados uma subdivisão dentro dos CAA's, que utilizam matérias primas compostas por Al₂O₃ e SiO₂, como metacaulim e cinzas e formam os aluminossilicatos hidratados (Islam et al., 2025).

Algumas pesquisas concentram-se principalmente na avaliação das propriedades de materiais aglomerantes compostos por escória de alto forno (De Filippis; Prud'homme; Meille, 2021a;), cinzas volantes (De Filippis; Prud'homme; Meille, 2021a; Elie et al., 2021) e metacaulim (Elie et al., 2021; Pelisser et al., 2021), destacando o potencial de desenvolvimento desse material para a construção civil (Frare; Luz, 2020; Xue; Zhang; Wang, 2021). Estudos relacionados aos cimentos de baixo impacto ambiental vêm aumentando devido à elevada resistência mecânica(Rashad, 2013), durabilidade de longo prazo (Beltrame, 2020; Nasir et al., 2020; Xue; Zhang; Wang, 2021), resistência a ácidos (Duxon, 2007; Pacheco-Torgal et al., 2012) resistência ao fogo (Komnistsas; Zaharaki, 2007) e baixa condutividade térmica (Duxon, 2007).

Diversas pesquisas correlacionam a composição química e características físicas de escórias e cinzas (Ben Haha, 2012; Langaro et al., 2017) com os teores e tipos de ativadores (Aydin; Baradan, 2012; Langaro et al., 2017, 2020; Lima et al., 2022), e com os processos de calcinação (Barata; Angélica, 2012) de materiais para a composição de cimentos álcali-ativados e geopoliméricos.

Assim, o presente capítulo tem como objetivo relacionar as composições químicas dos percursos com a resistência mecânica para desenvolver dosagens de CAA, que serão utilizadas em outra etapa do programa experimental desta tese focada na reação álcali agregado.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.2.1 Materiais

Neste programa experimental foram usados: escória de alto forno, caulim e sílica da cinza da casca de arroz. A Figura 27 apresenta uma amostra de cada um dos materiais usados nesta pesquisa. Foi empregada escória (E) de alto forno, que passou por um processo de secagem em estufa a 105⁰C por um período de 24h e posteriormente foram trituradas em moinho de bolas por 2h. A sílica da cinza da casca de arroz (CCA) é um produto comercial produzido por um sistema de combustão via leito fluidizado, de coloração escura, conforme Figura 27b. O caulim (C) é um produto comercial de coloração rosa claro, que não passou pelo processo de calcinação, fornecido por uma empresa nacional. As

amostras de CCA e as de C apresentam um índice de pozolanicidade maior que 75%, e, portanto, se classificaram como pozolanas de acordo com a NBR 5752 (2014), ensaio de índice de desempenho de material pozolânico com cimento Portland.

A Tabela 12 mostra a massa específica (NBR NM 23), superfície específica (NBR NM 76) e a caracterização química dos materiais, realizada a partir do ensaio de espectroscopia por Fluorescência de Raios – X.

Figura 27: Materiais empregados. (A) Escória, (b) Cinza da casca de arroz, (c) Caulim



Tabela 12: Caracterização química e física da escória (E), cinza da casca de arroz (CCA) e metacaulim (C).

(%)	E	CCA	C
SiO ₂	38,1	93,7	65,69
CaO	37,0	0,5	0,01
Al ₂ O ₃	13,9	0,1	17,10
MgO	6,2	0,3	0,78
Fe ₂ O ₃	1,3	<0,1	7,15
MnO	1,1	0,4	0,02
TiO ₂	0,8	-	0,99
SO ₃	0,1	<0,1	-
K ₂ O	-	1,5	2,71
P ₂ O ₅	-	0,4	0,05
Cl	-	0,1	-
ρ (g/cm ³)	2,85	2,02	2,6
Superfície específica (Blaine) (m ² /kg)	436,12	974,93	1024,77

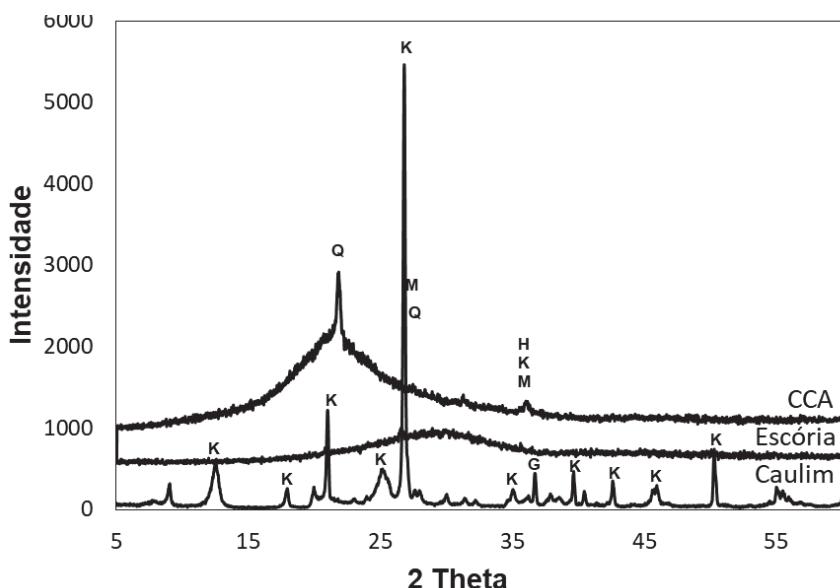
Deve-se destacar na Tabela 12 que a escória apresentou em sua composição CaO, SiO₂, Al₂O₃ e MgO. Por sua vez, o caulim apresentou maior quantidade de componentes como sílica e alumina e a CCA apresentou mais de 90% de SiO₂.

De acordo com a NBR 15894-1 (2010), está especificado para uso de metacaulim em cimento Portland, que o teor de sílica deve estar compreendido entre 44% e 65%, o teor de alumina dever estar entre 32% e 46% e a soma dos componentes CaO e MgO deve ser inferior a 1,5%.

A NBR 5752 (2014), que trata os requisitos para materiais pozolânicos, indica que a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 seja maior que 70% do total da sua composição química. Os dois materiais, C e a CCA, cumprem os requisitos químicos especificados. Também se contatou que a finura do C foi de 1024 m^2/Kg , a CCA se apresentou um pouco mais fina (974,93 m^2/kg) e a escória apresentou uma finura em torno de 436,12 m^2/kg , usuais para cimento Portland.

A Figura 28 apresenta as curvas das análises de difração por Raios – X (DRX) dos materiais. A escória apresenta-se como amorfa, ou seja, sem picos característicos nos difratogramas que indica ausência de um arranjo ordenado de átomos. A cinza da casca de arroz (CCA) apresentou um halo amorfó característico de materiais pozolânicos, além de pico de SiO_2 (Q). O DRX do caulin apresenta principalmente o material caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) com picos principais em $12,24^\circ$ e $24,76^\circ$, o pico identificado como (G) localizado a $36,94^\circ$ corresponde ao mineral goethita (FeO(OH)).

Figura 28: Difratogramas dos materiais



H – Hematita (Fe_2O_3), K – Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), M – Muscovita, Q – Quartzo (SiO_2), G-Goethita (FeO(OH)).

A Figura 29 mostra as curvas obtidas por granulometria a laser das partículas e a Tabela 13 mostra o tamanho das partículas de cada material retido acumulado em 50 e 90%.

Figura 29: Granulometria a laser dos materiais E – Escória, CCA – Cinza da casca de arroz e C – Caulim

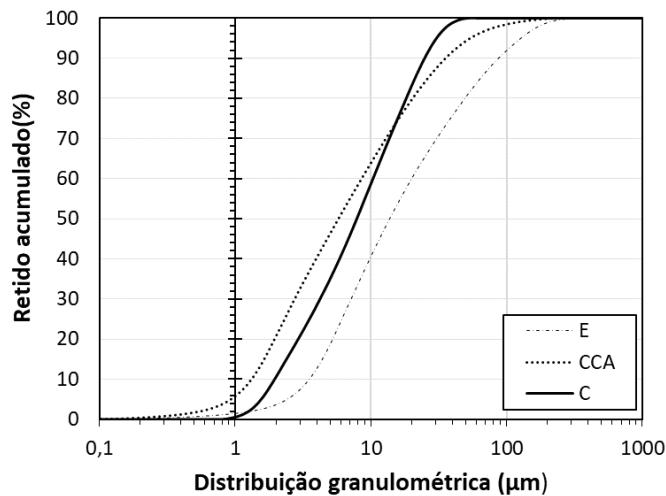


Tabela 13: Percentual retido acumulado (50% e 90%) dos materiais E – Escória, CCA – Cinza da casca de arroz e C - Caulim

% Retida Acumulada	Escória	CCA	C
50%	6,13	14,59	10,69
90%	23,89	63,70	43,07

O ativador alcalino definido para a utilização nesse trabalho foi o hidróxido de sódio (NaOH) já definido através de estudos anteriores apresentados por Langaro et al., (2020), encontrado comercialmente, de alta pureza (99% de pureza).

4.2.2 Métodos

4.2.2.1 Definição das composições

A definição das composições dos CAA's a serem utilizados se deu através de estudos anteriormente realizados por Langaro et al., (2020), onde foram elaboradas

amostras de CAA's compostos unicamente de escória de alto forno e 5% de ativador alcalino. Sendo assim, essa proporção de mistura foi utilizada como referência para a produção das pastas.

As composições utilizadas são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Composições utilizadas para a confecção das pastas

Traço	E (%)	CCA (%)	C (%)	Ativador (NaOH) (%)	Relação Água/Aglomerates
E	100	0	0	5	0,4
ECA	90	10	0	5	0,4
ECC	90	5	5	5	0,4
EC	90	0	10	5	0,4

4.2.2.2 Preparação das pastas

Para os ensaios de resistência à compressão moldou-se corpos de prova com pasta, com relação a/c de 0,4 e dimensão de 30 x 30 x 30 mm, com diluição do ativador em água.

O processo de mistura consistiu em adicionar o ativador à água e agitar até sua completa dissolução. Como essa reação é exotérmica, a solução foi deixada em repouso até atingir a temperatura ambiente. Em seguida, foi incorporada aos materiais previamente homogeneizados, com mistura manual por 1 minuto.

Após a mistura, os corpos de prova ficaram armazenados em câmara úmida (95 ± 3 % de umidade) à temperatura de 23 ± 3 °C. Ao atingir 48 horas de idade, os mesmos foram desmoldados e mantidos nas mesmas condições de cura citada no início do parágrafo.

4.2.2.3 Caracterização das pastas

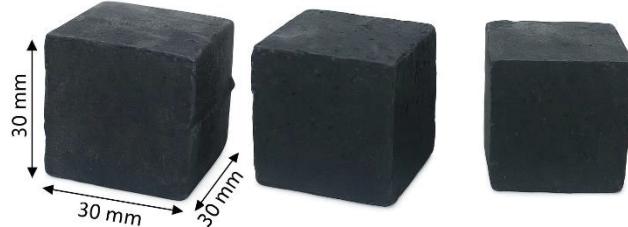
- Resistência à compressão

Para os ensaios de resistência à compressão utilizou-se um maquina universal de ensaios mecânicos da marca EMIC (DL-30000, EMIC, Brasil) servocontroladora, disponível

no laboratório de materiais da UTFPR – Campus Pato Branco, com taxa de aplicação de carga de 1mm/min.

Confeccionou-se 3 corpos de prova (Figura 30) para cada idade de rompimento: 7, 28 e 91 dias.

Figura 30: Corpos de prova para a realização do ensaio de compressão.



- Calorimetria de condução isotérmica

Para a avaliação de calorimetria foram confeccionadas as pastas de massa total de 40g de material com as mesmas composições anteriormente citadas seguindo-se o mesmo processo de mistura. As pastas foram inseridas no calorímetro Calmetrix, modelo I-Cal 2000 HPC, que opera com até duas amostras simultaneamente. Elas foram monitoradas por 7 dias à 23°C. O ensaio visa obter a curva de calor de hidratação e a taxa de calor liberado das pastas a fim de identificar a cinética das reações de hidratação do CAA.

4.2.2.4 Avaliação da microestrutura

-Processo de interrupção de hidratação e preparo das amostras

Todas as amostras que foram submetidas aos ensaios de avaliação da microestrutura passaram pelo processo de interrupção de hidratação.

Quando as amostras atingiram as idades de ensaio, elas foram fraturadas em pequenas lascas de aproximadamente um centímetro e colocadas submersas em acetona por 2h. Após esse período, a acetona foi retirada por meio de filtro buchner acoplado a uma

bomba a vácuo. Além disso, as amostras foram ainda submetidas à temperatura de 40 °C por 30 min, para completa evaporação da acetona. Esse processo se faz necessário para cessar a hidratação do cimento a partir da troca de meios, método já definido em estudos anteriores (Langaro et al., 2020).

Para as análises de DRX e TG, as amostras foram moídas, com a ajuda de um cadinho e um pistilo e passadas na peneira 150 µm, as mesmas ficaram armazenadas em pequenos recipientes fechados, para evitar o contato com o ar até o ensaio.

- Difratometria de raios – X (DRX)

O ensaio de espectroscopia por difração de raios – X foi realizado na UTFPR – Campus Pato branco, por meio do equipamento da marca Panalytical, modelo EMPYREAN. As amostras foram avaliadas de acordo com o comprimento de onda 1,54 Å, ângulo de varredura de 5° – 70° (2θ), passo de 0,02° a cada 10 segundos, na idade de 7 e de 28 dias. Os resultados foram avaliados de forma a identificar os produtos formados a partir da hidratação do CAA.

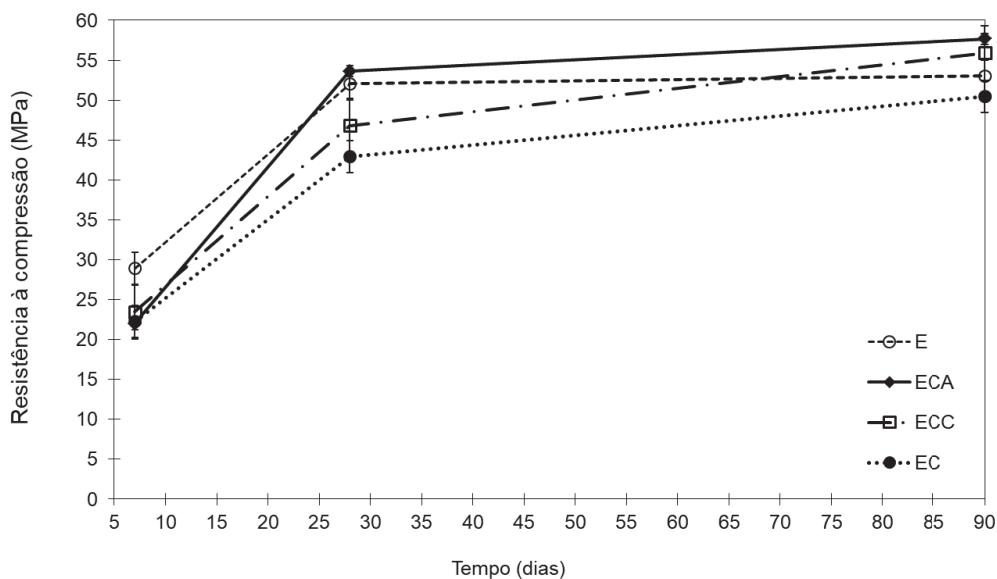
- Análise termogravimétrica (TG)

A análise térmica foi realizada na Central de Análises da Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR), Campus Pato Branco, utilizando um equipamento da marca TA Instruments, modelo SDT Q600 para análise termogravimétrica (TG) e derivada da termogravimétrica (DTG). As amostras de aproximadamente 5mg, para o ensaio são colocadas em um cadinho de alumina e submetidas as seguintes condições de ensaio, faixa de aquecimento de 30 °C a 900 °C, Fluxo de aquecimento de 10° C min⁻¹; atmosfera inerte – Nitrogênio; Fluxo de 100mL min⁻¹ e idades de ensaio de 7 e de 28 dias. A análise termogravimétrica baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física ou química em função do tempo ou da temperatura. Assim, a partir desses dados será possível identificar os produtos da reação a partir da faixa de temperatura do qual os mesmos se transformam.

4.3 RESULTADOS

A Figura 31 apresenta os resultados de resistência à compressão das pastas de cimento álcali ativados.

Figura 31: Resistência à compressão do CAA



De acordo com os ensaios de resistência à compressão realizados em pastas de cimento álcali ativado, observa-se que aos 7 dias todas as composições apresentaram valores de resistência maiores que 20 MPa, sendo que todos obtiveram um acréscimo de resistência entre 7 e 28 dias.

Nota-se que a pasta ECA a qual continha 10% de CCA, apresentou um ganho de resistência menor aos 7 dias que as demais composições, porém alcançou aproximadamente 55 MPa aos 28 dias. Já as amostras que continham caulim na sua composição apresentaram um ganho de resistência menor aos 28 dias, porém ainda assim alcançaram 40 MPa.

A Figura 32 e Figura 33 apresentam os resultados obtidos a partir do ensaio de calorimetria.

Figura 32: Taxa de calor liberado nos CAA's com Escória (E), Escória e CCA (ECA), Escória, cinza e caulim (ECC) e Escória e caulim (EC).

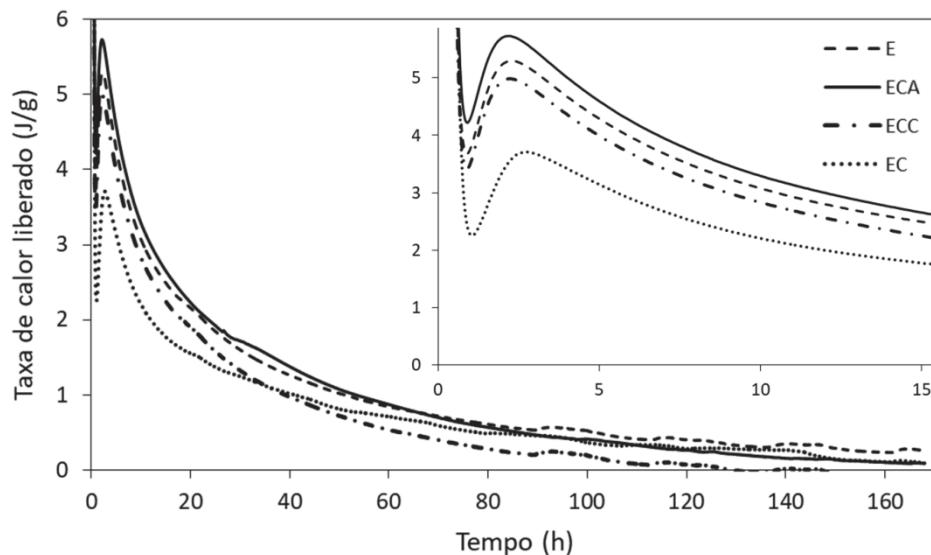
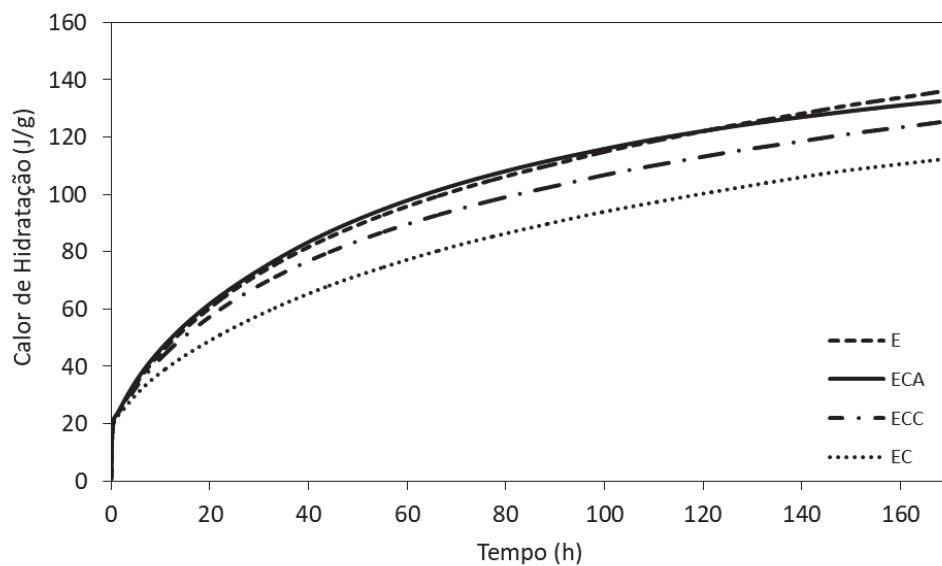


Figura 33: Calor de hidratação nos CAA's com Escória (E), Escória e CCA (ECA), Escória, cinza e caulim (ECC) e Escória e caulim (EC).



Nota-se que todas as amostras apresentam comportamentos similares com dois picos exotérmicos. Os processos de hidratação dos CAA's podem ser divididos em cinco etapas devido aos seus componentes ativos semelhantes ao cimento: a fase exotérmica rápida, a fase dormente com baixa taxa exotérmica, a fase de aceleração da hidratação, a fase de desaceleração da hidratação e a fase de hidratação estágio estável (Sun; Chen, 2019).

Conforme mostrado na Figura 32, a curva de taxa exotérmica de todas as amostras quase está coincidindo durante o estágio exotérmico rápido (o primeiro pico). No entanto, pode-se observar que a taxa exotérmica da curva ECA é maior que as curvas E, ECC e EC ao final do estágio exotérmico rápido e em todo estágio dormente. Os menores valores de taxa são observados para a curva EC, em torno de 2,36 J/g. O primeiro pico no sistema de cimento está relacionado à dissolução das partículas e à reação da fase de alumínio (Sun; Chen, 2019).

O estágio de aceleração dos CAA's aparece em torno de uma hora e atinge seu pico mais alto em torno de duas horas. Após 2h, a hidratação das amostras entra no estágio de desaceleração, terminando em aproximadamente 20 h. Nota-se ainda que a área do segundo pico é significativamente menor para a amostra EC. O aparecimento do segundo pico está relacionado à formação de géis devido à hidratação do silicato de cálcio. A menor formação de silicato de cálcio na escória leva a uma área menor do segundo pico exotérmico.

Nota-se que todas as amostras apresentaram curvas de calor de hidratação (Figura 33) próximas. Observa-se que ainda as amostras E e ECA foram as que apresentaram maior calor liberado, comprovando os ganhos de resistência maiores. Assim como a amostra EC apresentou menor calor de hidratação e consequentemente menor resistência mecânica.

As análise de DRX realizadas nas amostras de cimento hidratado são apresentadas na Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

Figura 34: Difratrogramas das amostras de CAA, composto por escória (E), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.

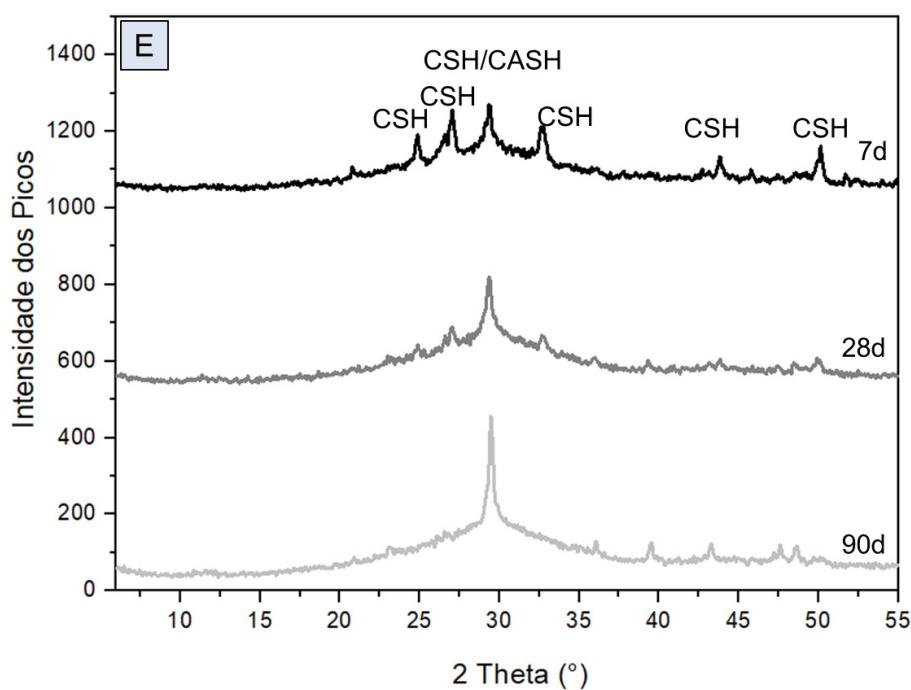


Figura 35: Difratrogramas das amostras de CAA, composto por escória e cinza da casca de arroz (ECA), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.

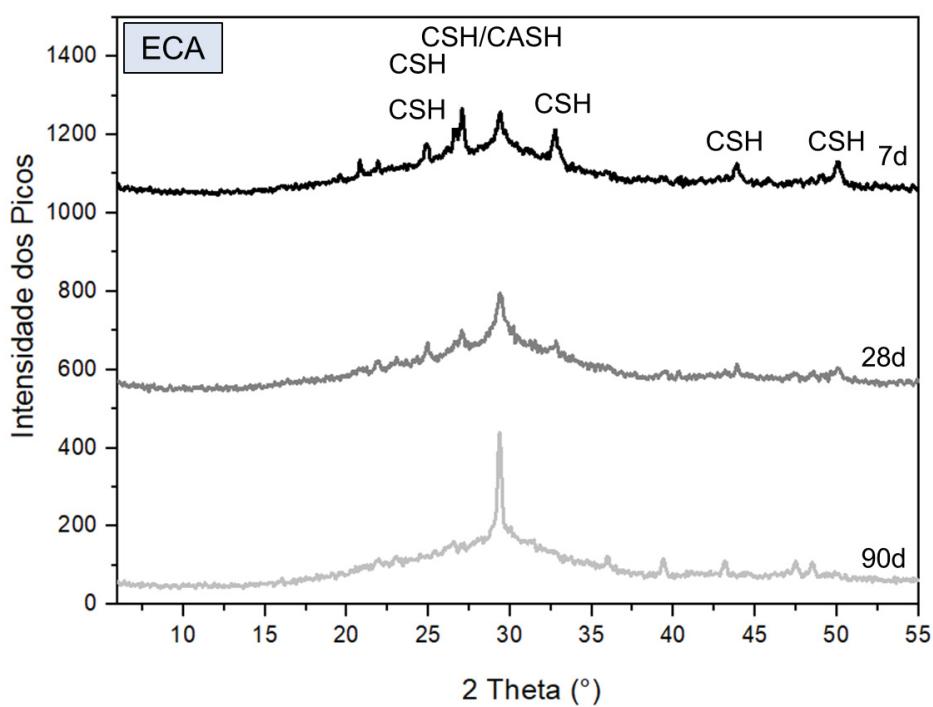


Figura 36: Difractogramas das amostras de CAA, composto por escória, conza da casca de arroz e caulim (ECC), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.

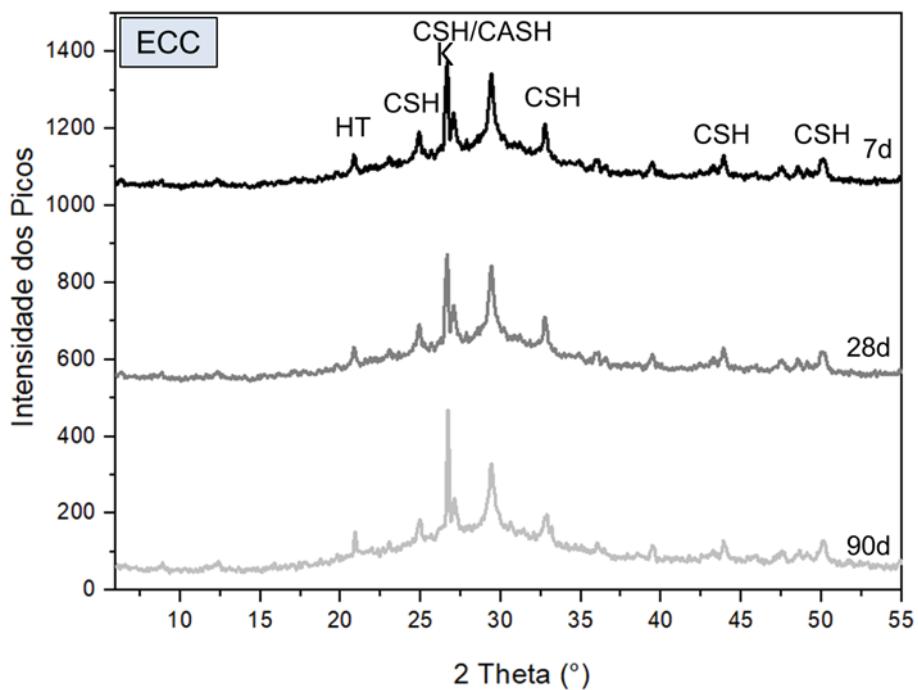
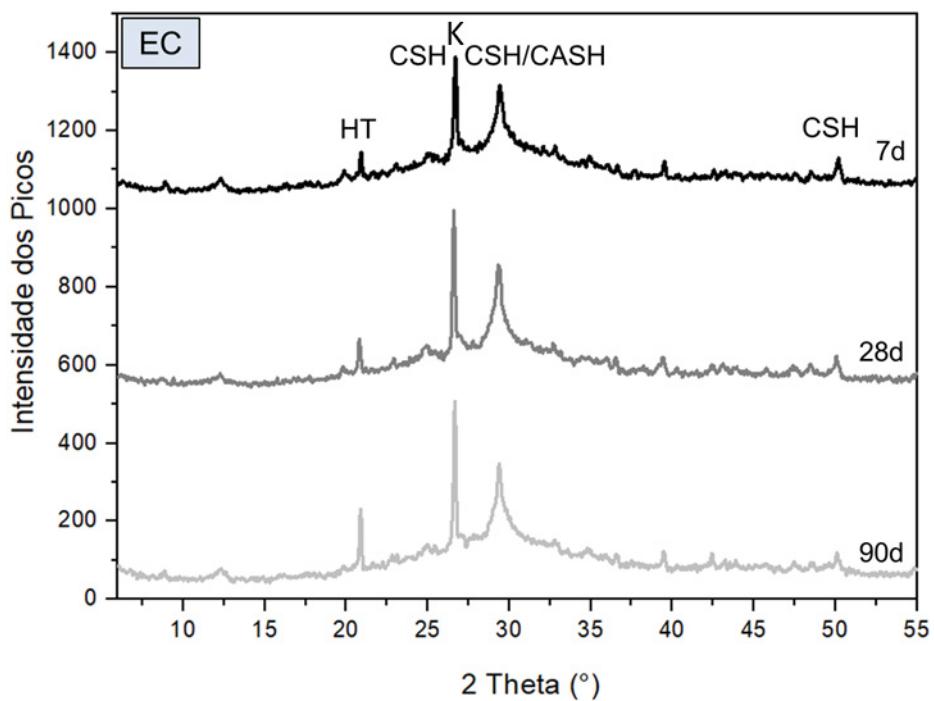


Figura 37: Difractogramas das amostras de CAA, composto por escória e caulim (EC), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação.



A partir dos dados de difração de raios X (DRX) das pastas endurecidas dos cimentos estudados (Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37), observa-se a formação

de picos na faixa de 28-31° 2θ, em todas as amostras, isso indica a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH), produto comumente encontrado na hidratação de cimentos álcali atvados conforme descrito por Frare et al., (2024); Garcia-Lodeiro et al., (2011); Puertas et al., (2011). Além disso, a intensificação desses picos ao longo do tempo sugere um aumento na formação dos géis, resultando em maiores ganhos de resistência mecânica, validando os resultados dos testes de compressão.

De acordo com a bibliografia, amostras de DRX que apresentam um caráter mais amorfó, com picos mais largos e menor quantidade de picos de CSH, tendem a desenvolver maior resistência mecânica. Essas características foram observadas nas composições E e ECA (Taylor, 1997; Frare et al., 2024a).

As amostras de ECC e EC, apresentaram ainda um pico de hidrotalcita (HT) entre 20-25° 2θ. Essa formação está relacionada com a quantidade de alumina presente na composição do caulin (Chen; Brouwers, 2007; Gruskovnjak, 2008; Frare et al., 2024a).

Na Figura 38,

Figura 39, Figura 40 e Figura 41, são apresentados os resultados das análises de TG/DTG, das pastas de cimento hidratadas, para as idades de 7, 28 e 91 dias.

Figura 38: Resultado da análise de TG/DTG nas amostras de CAA, composto por escória (E), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação

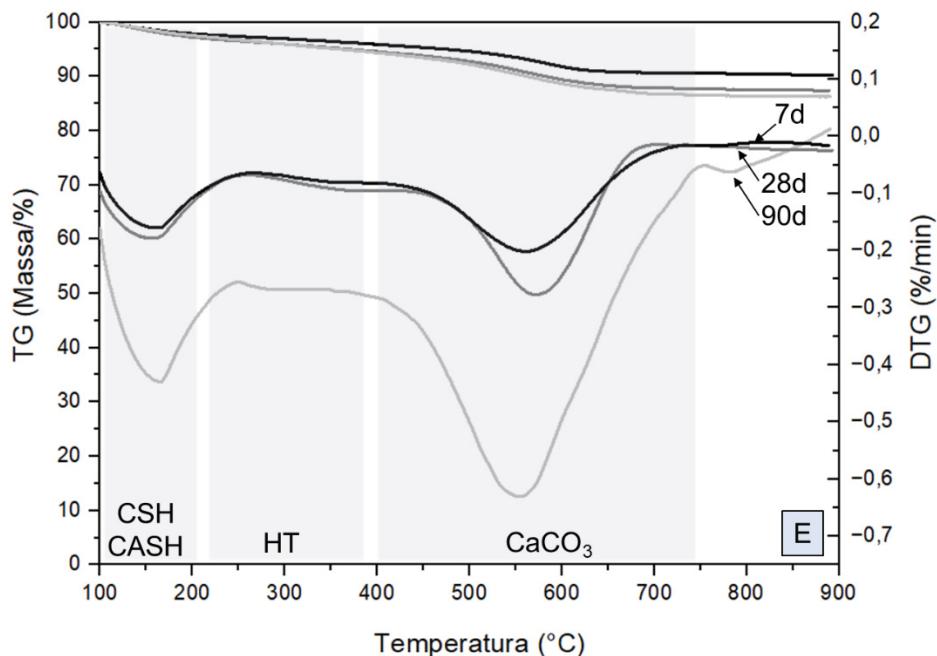


Figura 39: Resultado da análise de TG/DTG nas amostras de CAA, composto por escória e cinza da casca de arroz (ECA), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação

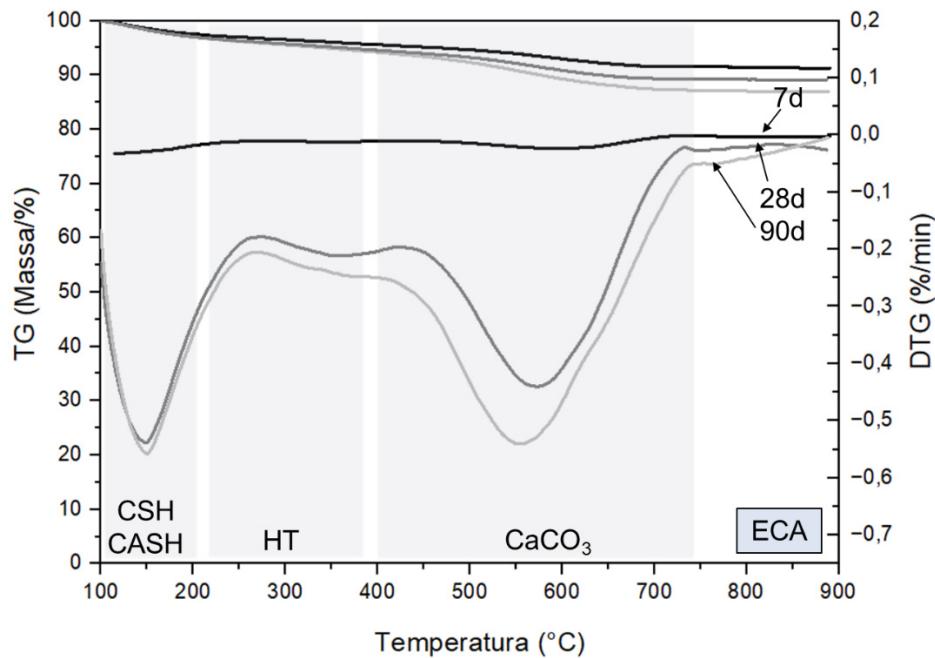


Figura 40: Resultado da análise de TG/DTG nas amostras de CAA, composto por escória, cinza da casca de arroz e caulim (ECC), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação

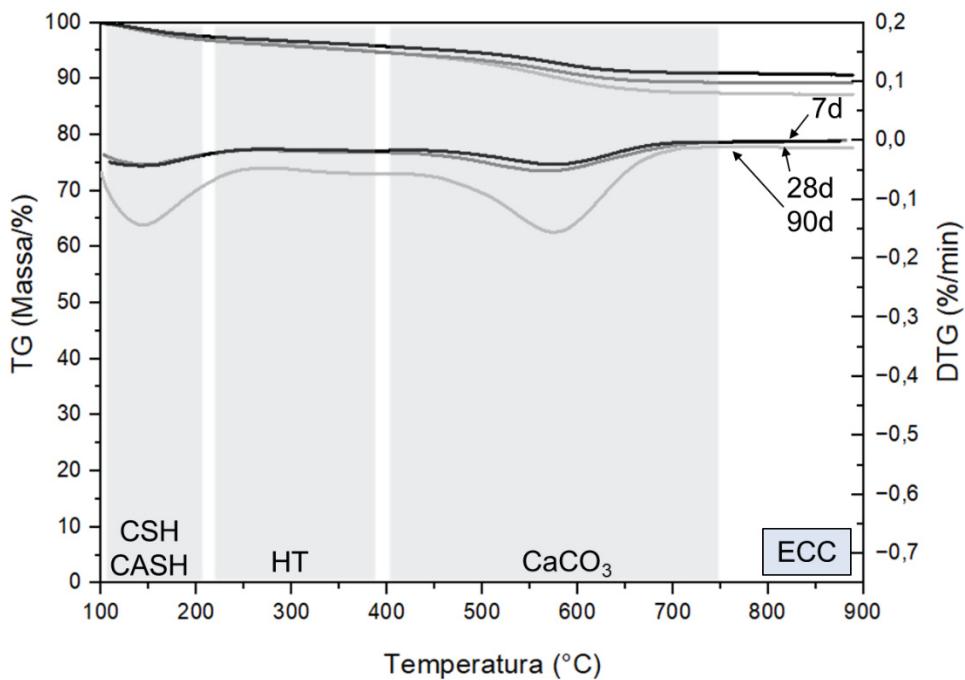
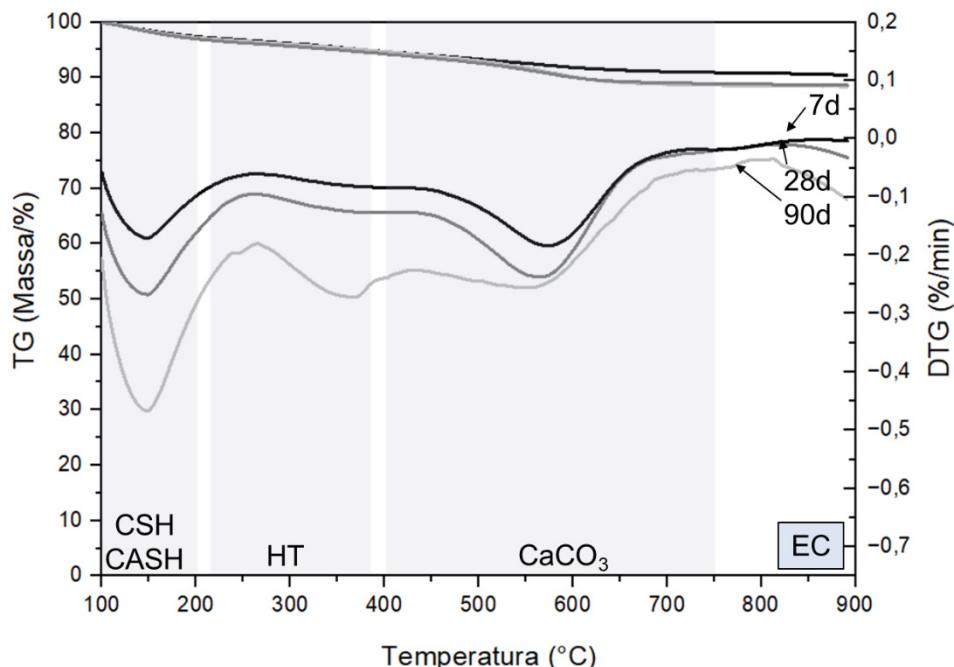
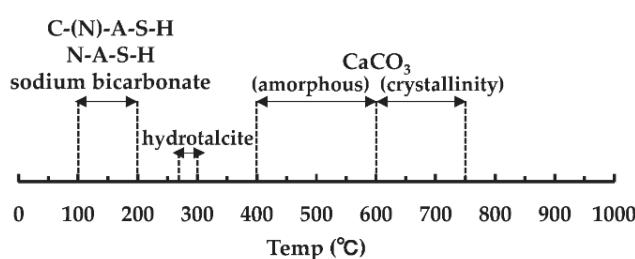


Figura 41: Resultado da análise de TG/DTG nas amostras de CAA, composto por escória e caulim (EC), nas idades de 7, 28 e 90 dias de hidratação



A Figura 42 elaborada por Yamazaki et al., (2021) apresenta as faixas de temperatura dos compostos formados na hidratação de CAAs.

Figura 42: Temperatura de decomposição de hidratos e carbonatos em TG/DTG.



FONTE: (Nedeljković; Li; Ye, 2018).

Assim como indicado por Nedeljkovic et al., (2018) na Figura 42, em todas as amostras de CAA analisadas foi possível identificar os picos relacionados a decomposição dos géis CSH/CASH, entre 100–200 °C. Isso confirma os produtos de hidratação encontrados nas análises de DRX. Além disso, pode-se constatar que a quantidade de decomposição de CSH/CASH encontrada em E e ECA são maiores que em ECC e EC, o que implica nos maiores ganhos de resistência à compressão para as respectivas amostras. Ao longo do tempo, também ouve um aumento dos picos da decomposição de CSH/CASH,

o que também comprova os resultados encontrados nas análises de DRX e resistência mecânica.

Da mesma forma que os autores Nedeljkovic et al., (2018) e Yamazaki et al., (2021) foi constatado na amostra de EC um pico de decomposição de entre 270–300 °C, que se refere a hidrotalcita e pode ser relacionada a presença de alumina no caulin assim como observado na análise de DRX.

Além disso, na faixa de temperatura de 400–600 °C, foi observado a decomposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) (Nedeljković et al., 2018; Yamazaki et al., 2021). A carbonatação, ou formação de carbonato de cálcio, em amostras de cimento ativado alcalinamente ocorre devido à reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar, resultando na formação de carbonatos. Essa reação é facilitada pela porosidade do material, que permite a penetração do CO_2 (Chi; Huang; Yang, 2002). Puertas et al., (2011) mostraram que, ao utilizar hidróxido de sódio como ativador alcalino, a resistência à compressão aumentou pela carbonatação. No entanto, a carbonatação pode alterar a estrutura do gel de aluminosilicato, reduzir a alcalinidade e formar microfissuras, comprometendo a integridade e a resistência do cimento (Li; Farzadnia; Shi, 2017; Song et al., 2014). A literatura existente resume que a composição de cada ligante e o uso de diferentes ativadores alcalinos exibem variadas alterações físicas e químicas na carbonatação sob condições de alto CO_2 (Yamazaki et al., 2021). Esse efeito pode ter ocorrido nas amostras em questão devido ao longo período de espera para análise (aproximadamente um ano), causado pela indisponibilidade do equipamento. Portanto, a presença de carbonato de cálcio não pode ser correlacionada com ganhos ou perdas de resistência.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo teve como objetivo relacionar as propriedades químicas dos precursores com a resistência mecânica, a fim de desenvolver dosagens de CAA para aplicação em etapas subsequentes do programa experimental desta tese. A partir dos ensaios realizados, os principais achados foram:

- Todas as composições apresentaram resistência superior a 20 MPa aos 7 dias, indicando um bom desempenho inicial dos CAA's.
- A composição ECA, contendo 10% de cinza da casca de arroz (CCA), apresentou um desenvolvimento inicial mais lento, mas atingiu aproximadamente 55 MPa aos 28 dias, superando as demais formulações.
- As composições que continham caulin (ECC e EC) tiveram um desempenho inferior em resistência mecânica aos 28 dias, alcançando cerca de 40 MPa. Isso pode estar associado à presença de hidrotalcita, que pode reduzir a formação de CSH/CASH, responsáveis pelo ganho de resistência.
- Todas as amostras apresentaram um padrão de hidratação semelhante, caracterizado por dois picos exotérmicos, refletindo os diferentes estágios de hidratação dos CAA's.
- A amostra ECA apresentou a maior taxa exotérmica ao final do estágio rápido e durante o estágio dormente, indicando uma reação mais intensa, o que pode ter contribuído para seu maior ganho de resistência mecânica ao longo do tempo.
- A amostra EC apresentou a menor taxa de calor liberado, indicando um menor grau de hidratação, o que se refletiu em seus menores valores de resistência mecânica em relação às demais composições.
- Em todas as amostras, observou-se a formação de CSH (silicato de cálcio hidratado) e CASH (aluminossilicato de cálcio hidratado), os principais produtos de hidratação responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica.
- O aumento da intensidade dos picos ao longo do tempo indicou uma progressiva formação desses produtos, corroborando os ganhos de resistência mecânica observados nos ensaios de compressão.
- As análises confirmaram a decomposição dos produtos de hidratação entre 100 e 200°C, correspondendo à presença de CSH/CASH, alinhando-se com os resultados das análises de DRX.

- As amostras E e ECA apresentaram maior quantidade desses produtos, justificando seus maiores valores de resistência mecânica em comparação com ECC e EC.
- A presença de carbonato de cálcio foi identificada entre 400 e 600°C, possivelmente resultante da carbonatação das amostras durante o longo período de armazenamento antes da análise. No entanto, esse fator não pode ser diretamente correlacionado com ganhos ou perdas de resistência, pois a carbonatação pode tanto fortalecer quanto comprometer a integridade da matriz cimentícia, dependendo das condições de exposição.
- A composição química dos precursores influencia diretamente o desenvolvimento da resistência mecânica, sendo a escória e a CCA mais favoráveis para a formação de CSH/CASH do que o caulim, que gerou produtos secundários como hidrotalcita.

Dessa forma, os resultados deste capítulo fornecem subsídios para a seleção das dosagens de CAA a serem empregadas nos estudos subsequentes e reforçam a viabilidade dos cimentos álcali ativados como alternativa ao cimento Portland, destacando sua capacidade de atingir resistências satisfatórias e sua evolução ao longo do tempo.

5 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO EM CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS

5.1 INTRODUÇÃO

O concreto com cimento Portland (CP) é amplamente empregado na construção civil por sua versatilidade, bom desempenho e baixo custo (Ahmed; Mohammed; Mohammed, 2022). Entretanto, a durabilidade é um aspecto crucial, pois está condicionada às condições de exposição ao longo do tempo, não sendo uma propriedade intrínseca do material (Zhang et al., 2017; Chica; Alzate, 2018; Aguirre-Guerrero; Robayo-Salazar; Mejía de Gutiérrez, 2021).

Diante dos impactos ambientais associados à produção do CP, os materiais ativados por álcalis (MAAs) têm se consolidado como alternativas sustentáveis. Os cimentos álcali-ativados (CAAs), formulados a partir de ativadores e precursores ricos em aluminossilicatos, formam géis com propriedades semelhantes às do CP, oferecendo desempenho técnico aliado à redução de impactos ambientais (Duxson et al., 2005; Naqi; Jang, 2019; Zhang et al., 2021).

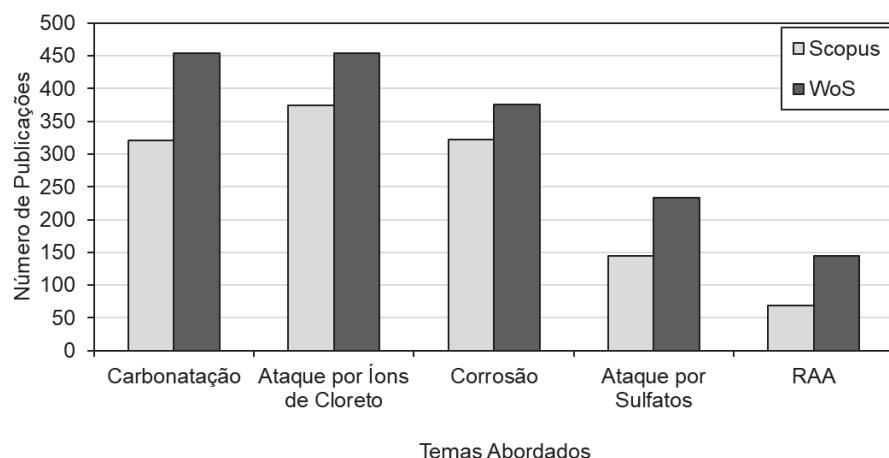
Diversas investigações realizadas ao longo dos anos têm demonstrado que os materiais ativados por álcalis (MAAs) podem apresentar desempenho equivalente ou até superior quando comparados aos materiais de cimento Portland convencionais(Duxson et al., 2007; Wongsa et al., 2018). Por exemplo, observou-se que os CAAs fabricados com escória como precursor exibem resistência a fenômenos como congelamento-descongelamento, ação ácida e exposição a sulfatos, atribuída à ausência de portlandita e à presença de relações Ca/Si mais baixas no gel C-S-H presente em sua microestrutura. Por outro lado, o CP revela deficiências nas características microestruturais mencionadas (François; Laurens; Deby, 2018; Aguirre-Guerrero; Robayo-Salazar; Mejía de Gutiérrez, 2021; Zhang et al., 2021). Entretanto, é importante destacar que certos tipos de CAAs demonstram baixa tenacidade à fratura, exibindo comportamento quase frágil (Adesina, 2020; Awoyera; Adesina, 2019). Outras pesquisas indicam problemas relacionados à retração plástica (Ballekere Kumarappa; Peethamparan; Ngami, 2018; Li et al., 2019a, 2019b) e eflorescência (Najafi Kani; Allahverdi; Provis, 2012).

Apesar de apresentar bons indicadores, estudos voltados à durabilidade de CAA ainda são minorias e de suma importância para que o mesmo possa se tornar um produto

confiável e aceito no mercado. Além disso, em comparação com os materiais de cimento Portland convencionais, há uma lacuna significativa no conhecimento referente a testes acelerados e desempenho de longo prazo em termos de durabilidade dos materiais ativados por álcalis (MAAs) (Šimonová et al., 2021).

A fim de contextualizar esta lacuna, a Figura 43 apresenta os resultados de uma revisão sistemática conduzida em duas bases de dados, "Web of Science" e "Scopus", utilizando diferentes combinações de palavras-chave, como "activated alkali cement" e "alkali aggregate reaction", "activated alkali cement" e "carbonation", "activated alkali cement" e "sulfate attack", "activated alkali cement" e "chlorides", "activated alkali cement" e "corrosion". Essa análise indica a quantidade de trabalhos relacionados à durabilidade dos CAAs, em todo o espaço temporal contido em cada base de dados. A pesquisa foi realizada no dia 27 de janeiro de 2025.

Figura 43: Número de publicações relacionadas à durabilidade dos CAAs nas bases de dados Web of Science e Scopus



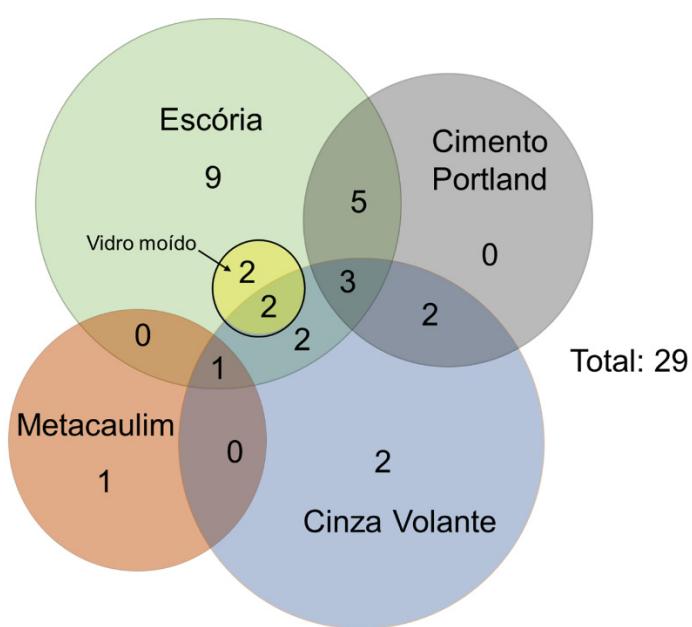
A Figura 43 destaca estudos sobre diversas propriedades de durabilidade dos CAAs, incluindo resistência à carbonatação, ataque por íons de cloreto e sulfatos, corrosão e RAA, esta última sendo um fenômeno de degradação causado pela interação entre os álcalis do cimento e a sílica reativa dos agregados. Contudo, observa-se que a quantidade de pesquisas focadas em RAA é significativamente menor em comparação com outros temas de durabilidade.

Os estudos relacionados a RAA em CAAs são contraditórios e seus resultados dividem-se em três grupos. O primeiro onde os sistemas de CAAs não apresentam a RAA (Talling; Brandstetr, 1989; Davidovits, 2005; Moraes et al., 2021). O segundo onde observa-

se uma expansão por RAA, porém significativamente menor em comparação com o CP (Fernandez-Jimenez; García-Lodeiro; Palomo, 2007; Puertas et al., 2009), e o terceiro grupo onde tem-se expansão por RAA superior ao CP (Krivenko, 2014; Tänzer; Jin; Stephan, 2017).

Outra busca realizada nas mesmas bases de dados citada anteriormente, correlacionava as palavras chaves “*activated alkali cement*” e “*alkali aggregate reaction*”, nessa análise verificou-se artigos a partir de 2015, com 2 citações ou mais e excluíram-se artigos de revisão bibliográfica e artigos que se encontravam repetidos, totalizando 29 artigos, e a partir disso analisou-se os percursos utilizados na composição dos CAAs testados quanto a RAA. A Figura 44 apresenta os resultados dessa busca.

Figura 44: Percursos testados quanto a RAA em CAA encontradas nos artigos das bases de dados Web of Science e Scopus a partir de 2015 com duas ou mais citações



Estudos sobre o desenvolvimento de Cimentos Álcali Ativados (CAA) destacam a escória como o precursor mais utilizado devido à sua alta concentração de cálcio e à formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), semelhante ao produto de hidratação do cimento Portland (Nath e Kumar, 2013; De Filippis et al., 2021; Yan et al., 2021). Isso explica a predominância de pesquisas relacionadas à RAA envolvendo escória. Estudos como os de Shi et al. (2015) e Fernández-Jiménez e Puertas (2002) mostraram que argamassas à base de escória ativada apresentam menor expansão por RAA em ambientes submersos em solução de NaOH quando comparadas ao cimento Portland, mas resultados contrários podem ocorrer em condições de alta umidade relativa (95%).

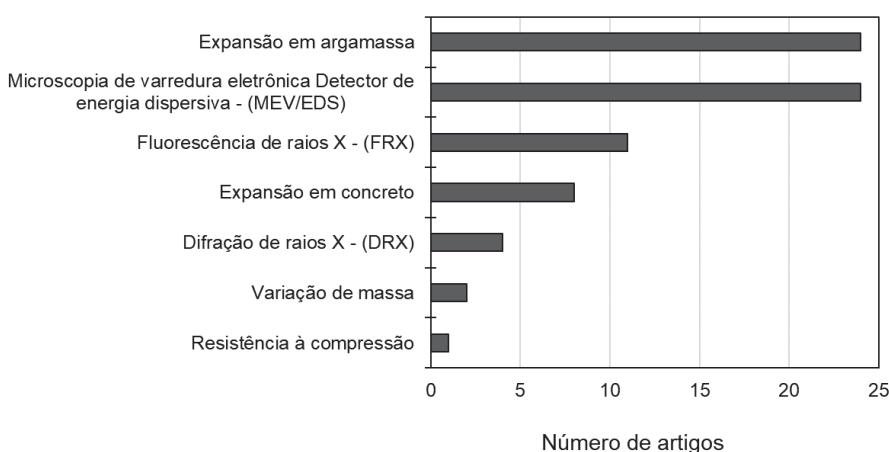
Pesquisas com cimento Portland são frequentemente usadas como referência para comparar o desempenho da RAA em CAA e (Donatello E Cheeseman, 2013; Angulo-Ramírez Et Al., 2018) enquanto materiais como cinza volante, metacaulim e vidro moído são analisados por seu potencial mitigador da reação (Davidovits, 2005; Fernandez-Jimenez et al., 2007). Sistemas de CAA que combinam escória, cinza volante e metacaulim apresentam teor intermediário de cálcio, sendo tecnologicamente viáveis para construções modernas (Shi et al., 2011). Em contraste, precursores com menos cálcio e mais alumínio e sílica, como cinza volante e metacaulim, demonstram menor suscetibilidade à RAA, com risco significativamente reduzido(Wang; Noguchi, 2020).

Davidovits (2005) mostrou que argamassas de cinzas volantes ativadas apresentam baixíssima expansão mesmo em altas concentrações de álcalis. Cyr e Pouhet, (2015) observaram que argamassas de CAA com metacaulim apresentaram menor expansão do que as de cimento Portland, com análise MEV/EDS indicando que o gel formado não era expansivo. Contudo, Fernández-Jiménez et al. (2007) constataram que argamassas de cinzas volantes ativadas por silicato de sódio podem exceder os limites de expansão para RAA.

Assim, matérias com teores menores de cálcio e com presença de sílica e alumina mitigaram a reação de expansão, não sendo consideradas como reativas (Shi et al., 2011). No entanto, o mecanismo de reação deste sistema é muito complicado devido à coexistência de géis NASH e CASH (Shi et al., 2011).

Uma limitação importante na avaliação da RAA em CAAs é o uso de métodos originalmente desenvolvidos para o cimento Portland. Analisando os mesmos artigos selecionados anteriormente nas mesmas bases de dados, observa-se as técnicas de avaliação utilizadas em estudos sobre CAA, conforme apresentado na Figura 45.

Figura 45: Métodos de avaliação da RAA em CAA encontradas nos artigos das bases de dados Web of Science e Scopus em todo espaço temporal com duas ou mais citações



A Figura 45 mostra a existência de estudos utilizando sete métodos avaliativos distintos, sendo que o mais utilizado é o método acelerado das barras de argamassa (AMBT), seguido pelo método dos prismas de concreto e suas variações. Destaca-se ainda alguns métodos de avaliação de microestrutura de forma suplementar, DRX, MEV, EDS. E deve-se observar que nenhum estudo utilizou o método de avaliação de danos por fissuração (SDT).

O método acelerado de barras de argamassa (AMBT) é amplamente utilizado em estudos relacionados ao cimento Portland devido à sua rapidez e praticidade, mas tem sido criticado por suas condições severas de exposição, que podem comprometer a confiabilidade dos resultados (Golmakani; Hooton, 2019).

O método dos prismas de concreto (CPT) também é utilizado nos estudos de RAA em CAA por ser um método normatizado para o CP, e por tornar-se uma forma de confirmação dos resultados obtidos na AMBT (Mahanama, 2019; Shi, 2015).

As técnicas de fluorescência de raios X (FRX) permite identificar os teores de álcalis e sílica nos materiais, auxiliando na análise do potencial reativo dos agregados e da disponibilidade de álcalis no sistema. Já a DRX possibilita detectar fases cristalinas e alterações minerais causadas pela RAA. Embora os produtos da reação sejam geralmente amorfos, e difíceis de identificar diretamente por DRX, a técnica fornece indícios indiretos da RAA, contribuindo para a caracterização dos materiais e para o entendimento do processo reativo.

Talling e Brandstetr, (1989), em seu estudo observaram que cerca de 80% de álcalis foram consumidos durante a hidratação impossibilitando a ocorrência da RAA em concretos de CAAs. Por outro lado, Gifford e Gillott (1996) indicam que a RAA em concretos produzidos a partir de CAAs apresentaram uma expansão menor que o CP, porém ainda deletério para as estruturas. Além disso, Tänzer *et al.* (2017) testaram uma série de concretos com teores de ativadores diferentes e constataram que em alguns casos a expansão do CAA foi maior que o CP. Essa contradição pode ser devido ao efeito diferente dos métodos de teste, ligantes, ativadores e agregados na expansão por RAA no sistema CAA.

Embora os métodos de avaliação convencionais tenham sido desenvolvidos para concretos com cimento Portland (CP), sua aplicação direta aos cimentos álcali-ativados (CAAs) pode ser inadequada, uma vez que os CAAs apresentam processos de hidratação distintos, produtos de reação diferentes e microestruturas específicas, que influenciam o desempenho e a resposta aos ensaios de durabilidade e resistência (Awoyer et al., 2022).

Dessa forma, este capítulo tem como objetivo avaliar a suscetibilidade de diferentes composições de CAAs à RAA, empregando uma variedade de métodos de teste, e investigar a influência da composição química e das condições de exposição nos resultados obtidos.

5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.2.1 Materiais

Os cimentos álcali-ativados (CAA) utilizados foram desenvolvidos no capítulo 4. Os cimentos álcali-ativados utilizados possuem diferentes composições. O cimento E é composto exclusivamente por escória granulada de alto-forno, enquanto os outros são formulados com combinações de escória, cinza da casca de arroz e caulim. O cimento ECA contém 90% de escória e 10% de cinza da casca de arroz. O cimento ECC apresenta 90% de escória, 5% de cinza da casca de arroz e 5% de caulim. Já o cimento EC é formado por 90% de escória e 10% de caulim, conforme Tabela 15.

Tabela 15: Composição dos cimentos álcali ativados

Traço	E (%)	CCA (%)	C (%)	Ativador (NaOH) (%)
E	100	0	0	5
ECA	90	10	0	5
ECC	90	5	5	5
EC	90	0	10	5

Além dos cimentos álcali-ativados, foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI, conforme especificado pela ABNT (2018), para fins de comparação. A caracterização físico-química do CPV foi fornecida diretamente pelo fabricante.

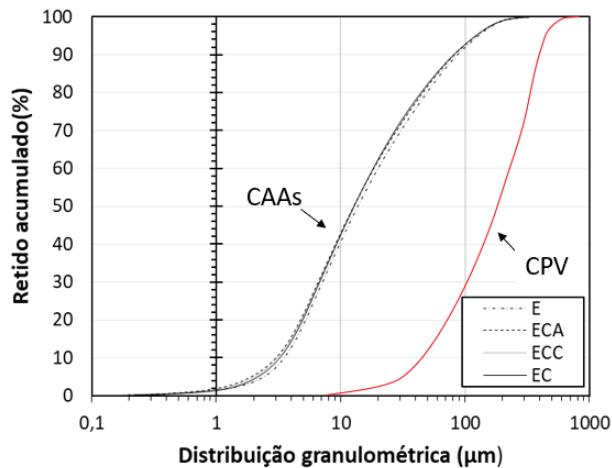
Foram realizados ensaios para determinar a massa específica dos aglomerantes, conforme a norma NBR NM 23:2000, e a superfície específica, seguindo a NBR 16372:2015. A Tabela 16 apresenta a composição química e as características físicas dos CAAs, obtidas a partir da caracterização de seus precursores, bem como as do cimento Portland CPV.

Tabela 16: Caracterização química dos cimentos utilizados para análise da RAA

(%)	E	EC	ECA	ECC	CPV
CaO	37,0	33,3	33,4	33,3	61,5
SiO ₂	38,1	40,9	43,7	42,3	18,2
Al ₂ O ₃	13,9	14,2	12,5	13,4	4,3
MgO	6,2	5,7	5,6	5,6	2,4
SO ₃	0,1	0,1	0,1	0,1	3,1
MnO	1,1	1,0	1,0	1,0	-
Fe ₂ O ₃	1,3	1,9	1,2	1,5	2,9
TiO ₂	0,8	0,8	0,7	0,8	-
K ₂ O	-	0,3	0,2	0,2	0,68
NaO ₂	-	-	-	-	0,12
P ₂ O ₅	-	0,0	0,0	0,0	-
Cl	-	-	0,0	0,0	-
ρ (g/cm ³)	2,9	2,8	2,8	2,8	3,1
Superfície específica (m ² /kg)	436,1	495,0	490,0	492,5	440,0

A Figura 46 apresenta as curvas obtidas por granulometria a laser dos cimentos utilizados, enquanto a Tabela 17 exibe os tamanhos das partículas retidas acumuladas em 50% e 90%.

Figura 46: Distribuição granulométrica dos cimentos utilizados para análise da RAA



Observa-se que a distribuição granulométrica dos cimentos álcali ativados é contínua e que todos se encontram na mesma faixa granulométrica, já o CPV apresenta uma granulometria um pouco maior.

Tabela 17: Tamanhos das partículas retidas acumuladas em 50% e 90%

% Retida Acumulada	E	ECA	EC	ECC	CPV
50%	6,13	6,98	6,59	6,78	12,30
90%	23,89	27,87	25,81	26,84	36,01

O agregado graúdo, classificado como potencialmente reativo, foi coletado em uma saibreira de gnaisse situada no município de São José dos Pinhais, Paraná (Figura 47). O gnaisse é uma rocha metamórfica resultante da transformação de rochas pré-existentes sob condições de alta temperatura e/ou pressão. Essas modificações podem alterar sua microestrutura, aumentando a suscetibilidade à RAA (NETO, 2022).

Figura 47: Localização da saibreira onde foi coletado o agregado graúdo



A saibreira onde foi coletado o agregado graúdo está localizada sobre uma falha geológica entre o Complexo Atuba e a Bacia Guabirotuba. O Complexo Atuba é composto por gnaises e anfibólitos, enquanto a Bacia Guabirotuba é caracterizada por rochas graníticas. O agregado passou por uma série de ensaios físicos para determinar suas propriedades, incluindo massa específica (NBR NM 53:2009), massa unitária solta e compactada (NM 45:2006), absorção (NBR NM 53: 2009) e material pulverulento (NM 46: 2003). Os resultados desses ensaios estão apresentados na Tabela 18.

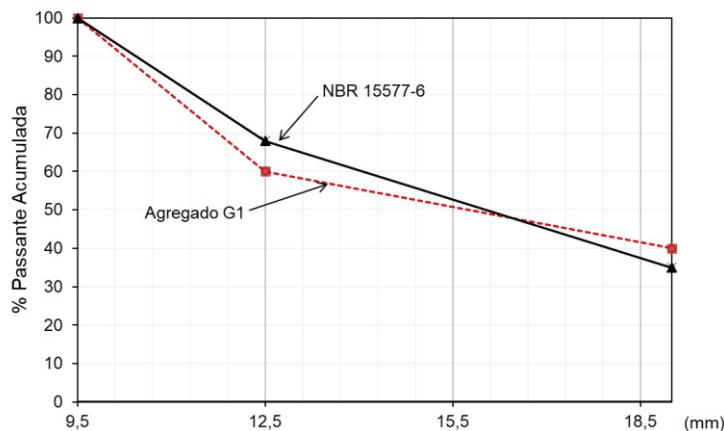
Tabela 18: Caracterização física do agregado graúdo utilizado

_tipo	Absorção (%) NM 53: 2009	Massa específica (g/cm³) NM 53: 2009	Massa unitária compacta seca (g/cm³) NM 45: 2006	Massa unitária solta seca (g/cm³) NM 45: 2006	Material pulverulento (%) NM 46: 2003
G1	0,41	2,59	1,49	1,38	0,34

Para a moldagem dos corpos de prova de concreto utilizou-se a composição de 60% de brita 1 e 40% de brita 0, do agregado G1. Dessa forma obteve-se uma distribuição granulométrica próxima a estipulada pela NBR 15577-5 (ABNT, 2018). A Figura 48 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo utilizado em comparação com a curva especificada em norma.

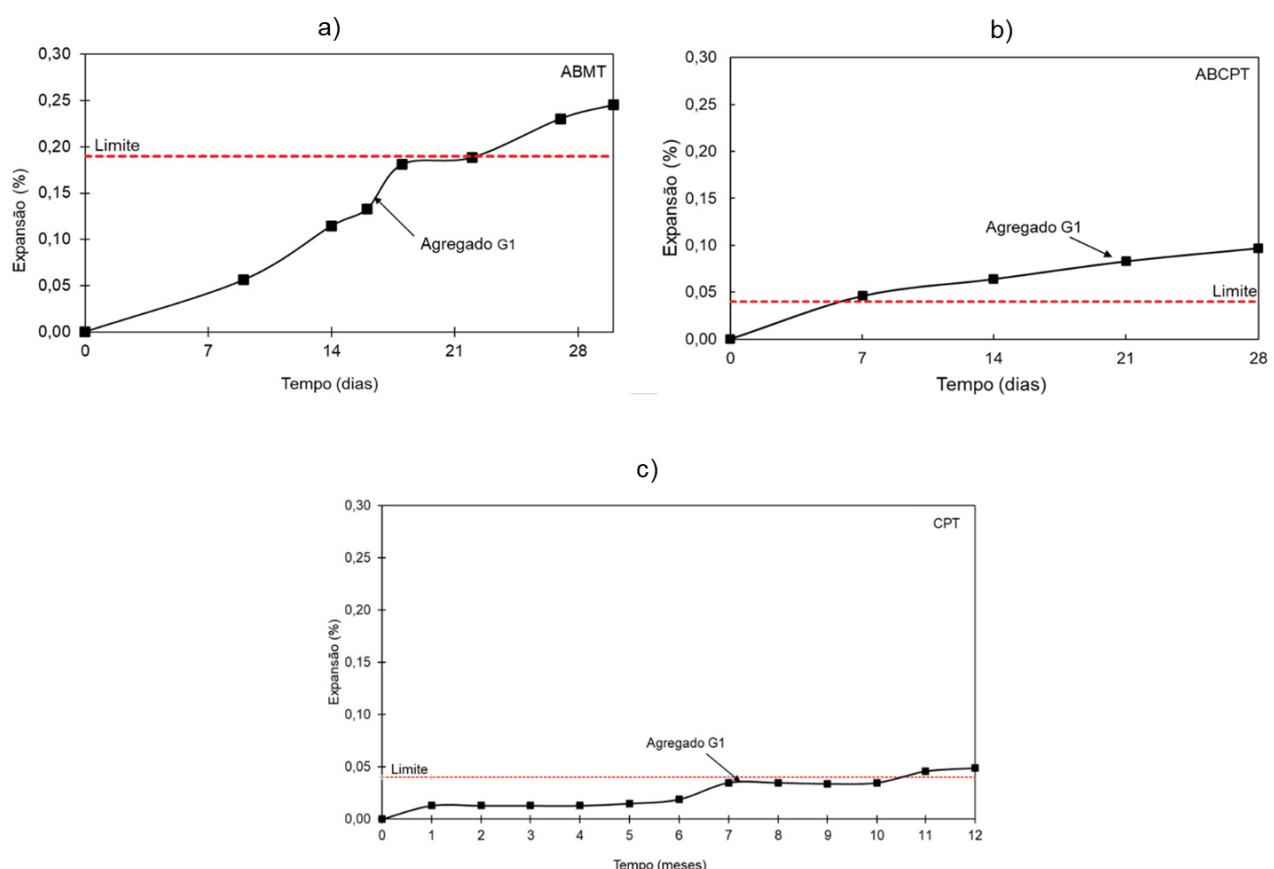
A reatividade do agregado foi avaliada por meio de três métodos: o ensaio acelerado de barras de argamassa (ABMT), conforme a NBR 15577-4:2008; o ensaio brasileiro acelerado de prismas de concreto (ABCPT), segundo Sanchez (2008); e o ensaio convencional de prismas de concreto (CPT), conforme descrito na NBR 15577-6:2018.

Figura 48: Curva granulométrica do agregado utilizado a partir da composição de 60% de brita 1 e 40% de brita 0



A Figura 49 apresenta os dados de expansão obtidos pelo ensaio ABMT, CPT e ABCPT.

Figura 49: Resultados de expansão obtidos a) AMBT, b) ABCPT e c) CPT.



O agregado G1 foi classificado como potencialmente reativo com base nos resultados dos ensaios realizados. No ensaio de barras de argamassa, alcançou uma expansão de 0,24% aos 28 dias, excedendo o limite estabelecido de 0,19%. Nos ensaios de prismas de concreto, apresentou expansões de 0,097% no ABCPT e 0,05% no CPT, ambos também superiores aos limites normativos de 0,04% para esses métodos.

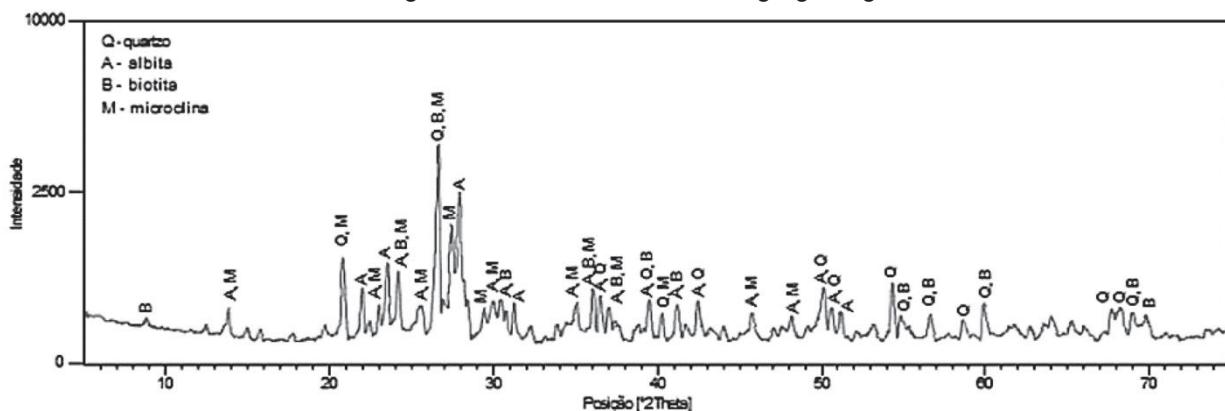
A composição química do agregado foi analisada utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF) (Panalytical, modelo Axios Max) (Tabela 19). Paralelamente, a análise mineralógica foi realizada em amostras pulverizadas por meio de difratômetro de raios X (DRX) (Shimadzu Co., modelo XRD-7000), operando a 30 kV e 30 mA (Figura 50).

Tabela 19: Composição química do agregado graúdo

(%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	ρ (g/cm ³)
Agregado G1	1,2	72,0	15,4	0,3	0,8	0,1	3,4	2,6

A análise da composição química do agregado graúdo revelou um elevado teor de sílica e potássio, elementos que têm potencial para favorecer o desenvolvimento da reação álcali-sílica (RAS). Embora os álcalis do cimento Portland e o sódio adicionado à mistura estejam disponíveis para reagir de forma imediata, os álcalis presentes no agregado não são reativos no início do processo porque estão quimicamente ligados à estrutura dos minerais, como feldspatos e vidros vulcânicos, e apresentam baixa solubilidade inicial. Sua liberação ocorre de forma lenta, à medida que a solução alcalina do concreto penetra nos agregados e promove a dissolução gradual dessas fases minerais. Esse processo depende do tempo, do pH elevado da solução intersticial e da interação contínua com a matriz do concreto, tornando os álcalis dos agregados uma fonte secundária e tardia para a reação álcali-agregado. Mas, esses elementos podem contribuir para a continuidade da reação em idades mais avançadas.

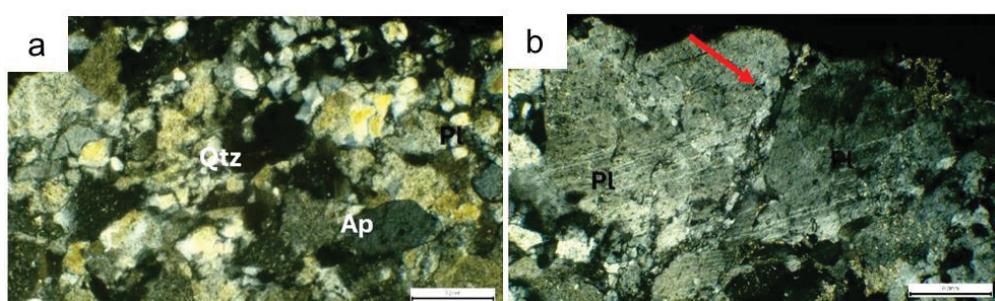
Figura 50: Análise de DRX do agregado graúdo



O difratograma de raios X (Figura 50) revelou a presença das fases minerais quartzo, albita, biotita e microclina, todas comuns em agregados de origem ígnea ou metamórfica. Dentre essas fases, destaca-se o quartzo, que pode apresentar comportamento reativo à solução alcalina dos poros, especialmente quando se encontra em forma microcristalina, deformada ou com defeitos estruturais. A albita e a microclina, embora apresentem reatividade direta limitada, são feldspatos que podem atuar como fontes secundárias de álcalis, contribuindo gradualmente para a elevação da alcalinidade do sistema e favorecendo a progressão da reação álcali-agregado (RAA). Já a biotita, por sua vez, tende a sofrer degradação em ambiente alcalino, o que pode facilitar a penetração da solução nos agregados e expor fases potencialmente reativas. Dessa forma, a composição mineralógica observada indica um potencial de reatividade moderado a elevado, especialmente em ambientes úmidos e com disponibilidade contínua de álcalis.

A análise petrográfica revelou intensa recristalização do quartzo (Figura 51a), presença de plagioclásio alterado e fraturas preenchidas por epidoto (Figura 51b), fatores que indicam alto potencial reativo frente à RAA.

Figura 51: Amostra de rocha em lâmina apresentando (a) cristais de quartzo recristalizados (b) intensa alteração do plagioclásio. Em vermelho tem-se fraturas preenchidas.



Para a dosagem do concreto foi utilizada areia natural como agregado miúdo, a qual foi caracterizada quanto a sua granulometria, massa específica, módulo de finura, absorção e expansão por RAA pelo método AMBT - NBR 15577-4 (Tabela 20, Figura 52 e Figura 53).

Tabela 20: Caracterização de agregado miúdo

Massa específica (g/cm ³)	2,60
Absorção (%)	5,76
Módulo de finura (mm)	2,27

Figura 52: Curva granulométrica do agregado miúdo

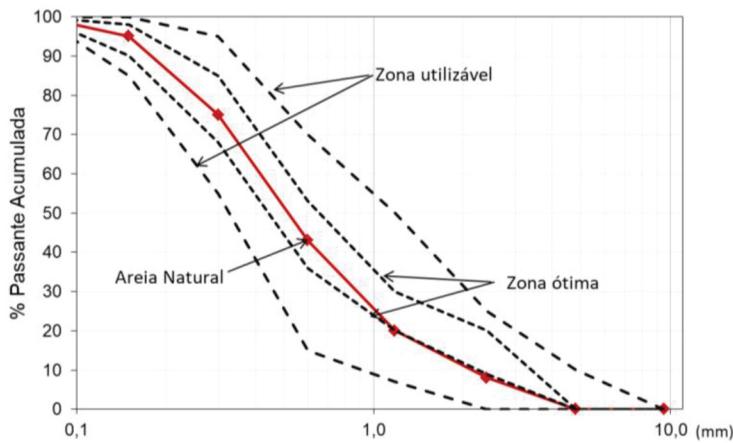
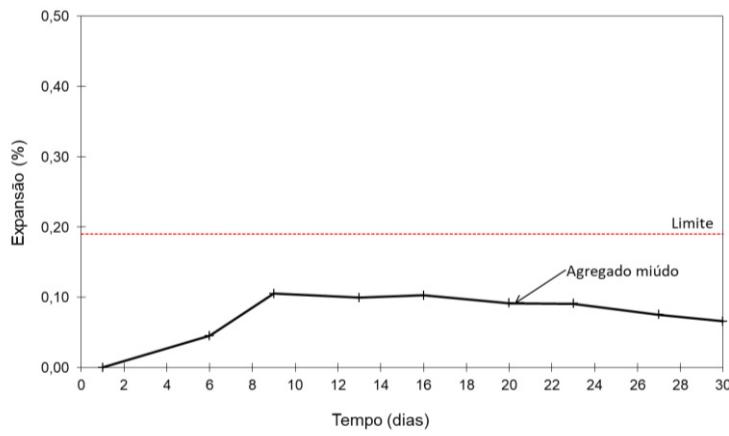


Figura 53: Expansão do agregado miúdo pelo método AMBT - NBR 15577-4

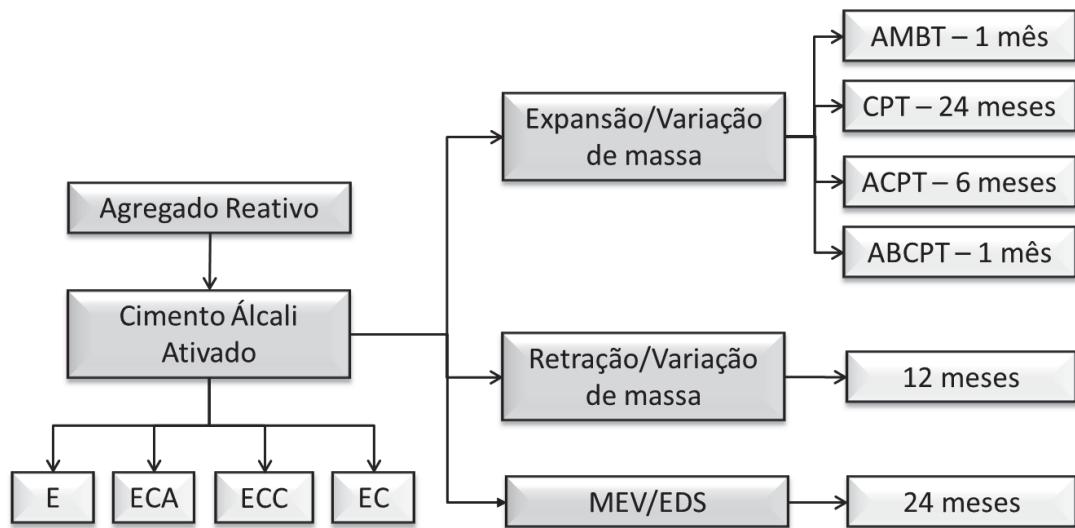


A areia foi classificada como areia média devido ao seu módulo de finura atender a zona ótima especificada pela NBR 7211 (2009). E os resultados de expansão classificam a areia como inócuas de acordo com o limite estabelecido pela norma 15577 (2018).

5.2.2 Métodos

A Figura 54 mostra o esquema desenvolvido com os parâmetros de moldagem e ensaios.

Figura 54: Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova



Os corpos de prova foram desmoldados após 24h da moldagem, seguindo-se o procedimento de cura indicado para cada avaliação.

5.2.2.1 Teste acelerado das barras de argamassa (AMBT)

A NBR 15577: 2018 parte 4 indica a proporção de mistura a ser utilizada nas argamassas para a análise de propensão a ocorrência de RAA do agregado miúdo ou agregado graúdo cominuído. Assim, a proporção utilizada foi 1: 2,25: 0,47 (cimento: agregado miúdo: relação água/aglomerante).

Os agregados foram inicialmente peneirados nas frações granulométricas requeridas pela NBR 15577: 2014 parte 4, conforme Tabela 21.

Tabela 21: Faixas granulométricas indicadas pela NBR 15577-4 (2014)

Faixa	Peneiras (mm)	Percentual (%)
F1	4,75 – 2,36 mm	10% ± 1%
F2	2,36 – 1,18 mm	25% ± 1%
F3	1,18 – 0,600 mm	25% ± 1%
F4	0,600 – 0,300 mm	25% ± 1%
F5	0,300 – 0,150 mm	15% ± 1%

Fonte: adaptado de NBR 15577-4 (2014)

Os materiais foram misturados e posteriormente preparou-se 3 corpos de prova prismáticos, nas dimensões de 25 x 25 x 285 mm, os quais foram submetidos à câmara com umidade de 95% por 24 h à uma temperatura aproximada de 23 °C. Após a desmoldagem, as amostras foram submersas em água por 24 h à uma temperatura de 80 °C, e em seguida imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 1,25%, à 80 °C por 28 dias.

As leituras de expansão foram realizadas antes da imersão na solução de NaOH (inicial) e 3 vezes na semana durante todo o período do ensaio.

5.2.2.2 Método de dosagem do concreto para os ensaios de expansão em prismas

A proporção de mistura de concreto utilizada para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios CPT, ABCPT, ACPT, DRI e SDT, seguiu as especificações da norma NBR 15577-6 (2018), adotando-se o método ABCP/ACI para o cálculo da dosagem. Essa proporção foi definida como 1:1,48:2,78:0,45 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: relação a/c), com um consumo de cimento de 420 kg/m³, conforme estabelecido pela norma.

Para ajustar o equivalente alcalino (Na_2Oeq) à concentração de 1,25% da massa de cimento, foi necessário calcular a quantidade de álcalis presente no cimento. O teor de Na_2Oeq foi inicialmente determinado pela Equação 3, o valor de Na_2Oeq é obtido pela conversão estequiométrica de NaOH para Na_2O , utilizando a relação 0,77 (baseada nas massas molares de Na_2O e NaOH), conforme indicado no estudo de (Moraes et al., 2021).

$$Na_2O_{eq}(NaOH) (\%) = 0,77NaOH (\%)$$

Equação 3

Fez-se então a média ponderada entre os teores equivalentes e os teores de escória e ativador, de acordo com a Equação 4:

$$Na_2O_{eq}(\%) = \frac{(Na_2O_{eq}CAAxCAA(\%)) + (Na_2O_{eq}NaOHxNaOH(\%))}{CAA (\%) + NaOH(\%)} \quad \text{Equação 4}$$

Os equivalentes alcalinos para os cimentos Portland foram obtidos a partir de relatórios de ensaio da fabricante. A Tabela 22 apresenta os teores alcalinos equivalentes para os cimentos utilizados.

Tabela 22: Teor de álcali no CAA (E, ECA, ECC e EC) e no CPV

Cimento	Na ₂ O _{eq} (%)
E	3,85
ECA	3,85
ECC	3,85
EC	3,85
CP V*	0,71
Limite recomendado por BÉRUBÉ (2002)	0,60

* Fonte: Cimento ITAMBÉ (2022).

Como o cálculo de (Na₂O_{eq}) para o cimento álcali ativado foi maior do que 1,25%, conforme o indicado pela Tabela 22, não se acrescentou NaOH na mistura, mantendo-se somente o teor de álcalis presente no cimento.

5.2.2.3 Métodos de avaliação do concreto

Análise de expansão e retração linear

O procedimento de dosagem dos concretos foi o mesmo para todos os ensaios de expansão em prismas de concreto (ACPT, ABCPT, CPT e retração).

Ao findar a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à câmara com umidade de 95% por 24h. Foi realizada a medição inicial e, em seguida, os corpos de prova foram submetidos a temperatura de 38 $^{\circ}\text{C}$, com umidade de 95%, pelo período de dois anos, ao qual foram realizadas medidas aos 7 dias e a cada mês. Essas condições de exposição e leitura de expansão são relacionadas ao método CPT, seguindo as recomendações da 15577-6: 2018.

Seguindo as recomendações da NBR 15577-7 (2018), foram produzidos 3 corpos de prova com dimensões de 75 x 75 x 285 mm, para a avaliação do cimento álcali-ativado pelo método de prismas de concreto acelerado (ACPT). As dosagens seguiram-se o mesmo procedimento do método CPT e após o período de cura inicial em câmara úmida por 24h, realizou-se a desmoldagem e medição inicial. O período de avaliação se deu por seis meses, já que se tratava da análise de materiais cimentantes, com medições mensais, sob uma condição de umidade acima de 95% e temperatura de 60 $^{\circ}$.

Para o teste brasileiro acelerado em prismas de concreto (ABCPT) também foram produzidos 3 primas de concreto para cada cimento, nas dimensões de 75 x 75 x 285 mm. Como se trata de cimento álcali ativado, onde o equivalente alcalino ultrapassa o valor 1,25%, manteve-se o teor já existente. Ao findar a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à câmara úmida por 24 h. Executou-se a medida inicial e depois os corpos de prova foram imersos em solução de NaOH em temperatura de 80 $^{\circ}\text{C}$, por um período de 30 dias, com leituras semanais.

De acordo com Sanchez (2008) e Sanchez, Kuperman, Helene (2011), o meio ao qual os corpos de prova estão não deve sofrer difusão entre a solução de NaOH e o concreto. Assim, o ensaio ABCPT é acelerado somente pela temperatura. Dessa forma, a solução de NaOH deve ter molaridade igual à do meio interno, dessa forma adicionou-se NaOH até atingir 3,85%, por se tratar de CAA. O teste acelerado de prismas de concreto (ABCPT) foi utilizado baseado nos estudos de Sanchez (2008), Sanchez *et al.*, (2011), onde os mesmos determinam que os limites desse método (ABCPT) são os mesmos para o ensaio de prismas de concreto no método de um a dois anos (CPT).

Foram ainda confeccionados 3 corpos de prova prismáticos de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm para o desenvolvimento do ensaio de retração por secagem, conforme a NBR 15823:2010, tem como objetivo medir a variação dimensional de corpos de prova de concreto devido à

perda de água durante a secagem. Após moldagem e cura úmida dos corpos de prova, estes são desmoldados e deixados para secar em ambiente com temperatura controlada (23°C) e umidade relativa entre 50% e 60%. A primeira medição se dá nas primeiras 24 horas e após foi realizada periodicamente, a cada 30 dias.

As medições de expansão foram realizadas com o auxílio de um micrômetro externo digital acoplado a um pôrtico metálico. Antes de cada leitura, os corpos de prova foram retirados de exposição para estabilização com o ambiente de temperatura controlada de 23°C por 18 ± 2 horas. Após as medições, os corpos de prova foram realocados no recipiente, invertendo sua posição em relação ao armazenamento anterior, e retornaram às condições de ensaio. As medições ocorreram após a desmoldagem e nas idades indicadas na Figura 54. A expansão induzida (Δ_l (%)) foi medida comparando-se a medida inicial (l_0) e a medida realizada ao longo do período de exposição (l_f) e calculada a partir da Equação 5.

$$\Delta_l(\%) = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0 + 285} \right) \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

5.2.2.4 Analise de microestrutura

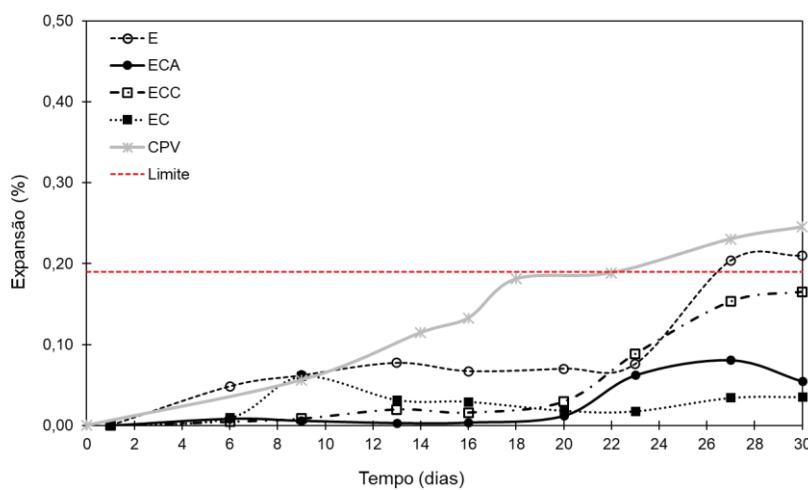
Após 24 meses de monitoramento da RAA em corpos de prova mantidos a uma temperatura de 40°C e umidade relativa de 95%, foram conduzidos ensaios adicionais na microestrutura para verificar a ocorrência da reação no concreto. Para isso, amostras foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura - MEV (Zeiss, modelo EVO MA15). As amostras foram previamente fraturadas e secas em estufa a 50°C . Em seguida, esses fragmentos foram fixados em suportes metálicos (stubs) com o auxílio de fita dupla face de carbono e recobertos com fita de cobre, que auxiliou no processo de deposição de ouro durante a etapa de metalização. Não foram aplicados procedimentos de embutimento, polimento ou ataque químico nas amostras. Para investigar a composição química do gel e dos demais elementos presentes, foi realizada uma análise de composição química utilizando espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS).

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Análises de expansão

A Figura 55 apresenta os resultados do ensaio de barras de argamassa (AMBT) segundo a NBR 15577: 2018 para os cimentos álcali ativados E, EC, ECA e ECC e com o CPV ARI.

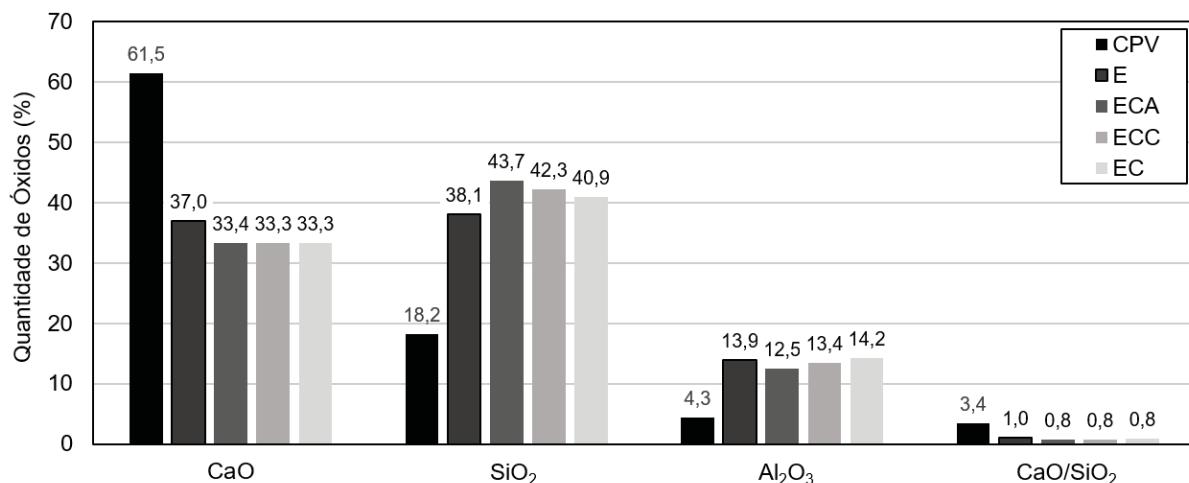
Figura 55: Ensaio de barras de argamassa para os cimentos álcali ativados E, EC, ECA e ECC e para CPV.



A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de AMBT, observa-se que em relação ao CPV todas as composições de cimento alcali ativado mostraram-se menos expansivas. Porém, a composição composta apenas por escória de alto forno (E), ainda assim, superou os limites estabelecidos pela NBR 15477: 2018 parte 4, de 0,19% de expansão. Esse resultado também foi confirmado por autores como Angulo-Ramirez et al., (2018), Fernández-Jiménez; Puertas (2002), Shi (2015), Shi et al., (2015), que estudaram a RAA pelo método da AMBT nas argamassas de escória ativada por álcali em ambientes submersos e apresentaram expansão menor que a de cimento Portland, porém ainda com comportamento reativo.

A Figura 56 apresenta os teores de óxidos nas composições de CAA e CPV e a relação CaO/SiO₂.

Figura 56: Teores de óxidos e relação CaO/SiO₂ presentes nas composições de CAA e CPV.



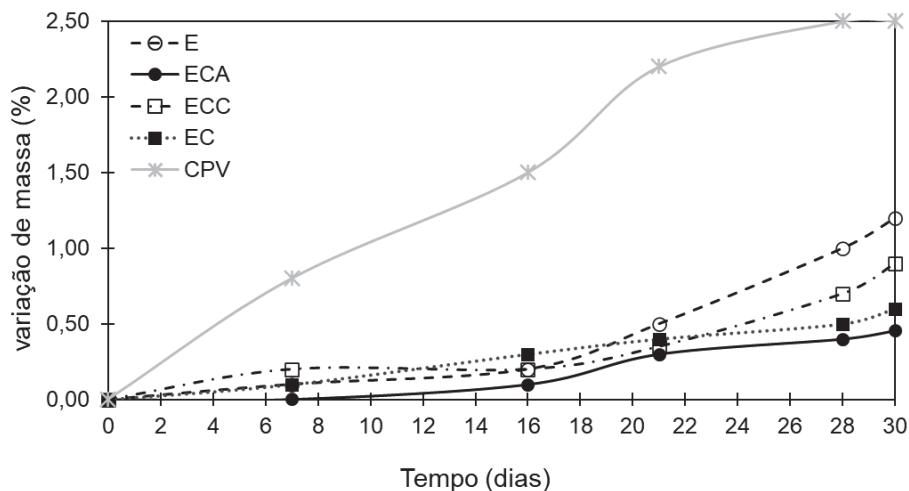
Observa-se na Figura 56 que as amostras com maior relação CaO/SiO₂ apresentaram maiores índices de expansão. Especificamente, as amostras CP V e E, com relações de 3,4 e 1,0 respectivamente, ultrapassaram os limites de expansão estipulados pela norma, ao passo que as amostras ECA, ECC e EC, com relação de 0,8, não apresentaram expansões expressivas. Embora essa correlação seja evidente nos dados experimentais, ela não permite, por si só, afirmar causalidade entre os teores de CaO/SiO₂ e a reatividade. No entanto, estudos como os de Rajabipour et al. (2015) e Thomas et al. (2006) apontam que a presença de cálcio pode influenciar a formação do gel da reação álcali-sílica (ASR), tornando-o mais higroscópico e expansivo. Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que teores mais elevados de CaO/SiO₂ podem favorecer a formação de produtos expansivos.

O comportamento menos reativo dos CAAs pode ser atribuído aos géis CASH e (C,N)-ASH formados nesses materiais, que apresentam relações Ca/Si mais baixas do que o gel C-S-H, produto semelhante a hidratação do cimento Portland (Cyr; Pouhet, 2015; Shi et al., 2015a; You-zhi et al., 2002). Além disso, a dissolução da sílica reativa da escória e do agregado em contato com o ativador alcalino (silicato de sódio + NaOH) contribui para a formação de mais produtos de hidratação e para uma maior adesão entre a pasta e o agregado, evitando assim a formação de gel expansivo e diminuindo seu potencial nocivo (Wang et al., 2010).

Por outro lado, a Figura 55 mostra que as composições de CAA com materiais adicionais, como a cinza da casca de arroz (CCA) e o caulim (C), percursos com maiores teores de SiO_2 e Al_2O_3 respectivamente, mitigaram a reação de expansão, não sendo consideradas como reativas. Esse tipo de composição é conhecido como um sistema híbrido, ou seja uma junção de um sistema de alto teor de cálcio e o sistema de baixo teor de cálcio. No entanto, o mecanismo de reação deste sistema é muito complicado devido à coexistência de géis NASH e CASH. Resultados já observados por Wang e Noguchi (2020) que indicam que em contraste com o sistema de alto teor de cálcio, outros percursos contendo alto teor de alumínio e menos cálcio, como cinza volante e metacaulim, tiveram melhor desempenho no aspecto de RAA, e a maioria dos pesquisadores concluiu que o risco de RAA no sistema de baixo cálcio é muito baixo. Assim como Bakharev, Sanjayan, Cheng (2001a), Tänzer; Jin, Stephan (2017) indicam que para sistemas de alto teor de cálcio, a vulnerabilidade da RAA é maior, o que favorece o início da reação e estes autores recomendam um período de testes acima de 28 dias.

A Figura 57, apresenta a variação de massa das barras de argamassa durante a realização do ensaio de ABMT.

Figura 57: Variação de massa das argamassas submetidas ao ensaio ABMT



Através da análise do percentual de variação da massa durante o ensaio de ABMT, também é possível observar que aquelas composições que mais se expandiram também foram as que mais ganharam massa. Esse resultado pode ser atribuído à absorção da solução com a qual as amostras se encontravam inicialmente submersas. O uso de materiais suplementares como a CCA e o caulim podem contribuir com o refinamento da

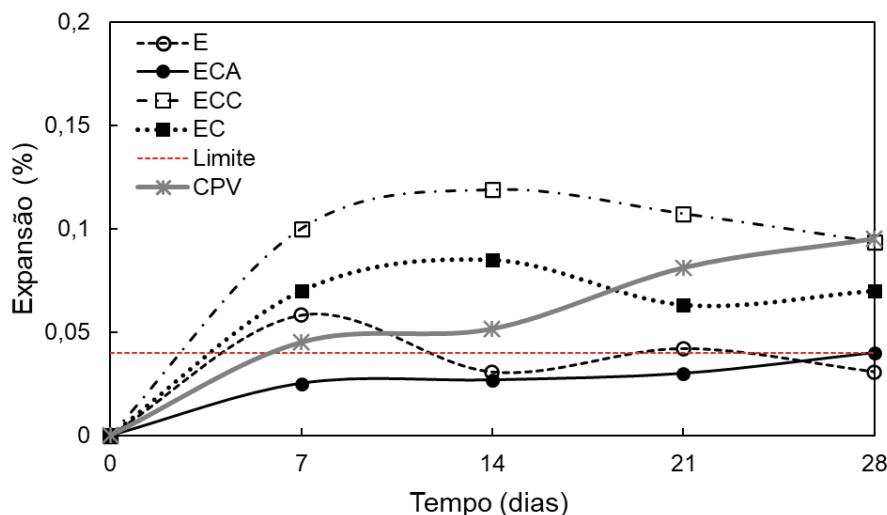
estrutura porosa, que ocorre durante o processo de hidratação, o que reduz a absorção de solução, melhorando o desempenho das argamassas contra mecanismos de degradação. Além disso, a adição de CAA e C aumenta a formação de géis CSH/CASH, e consequentemente a densidade do material (Hoppe Filho, 2008).

O ensaio de ABMT é o mais utilizado para avaliar RAA em CAA no mundo todo, as vantagens relacionadas ao curto período de avaliação já são conhecidas. Porém, o mesmo é normatizado apenas para o CP e mesmo assim os questionamentos relacionados a sua severa condição de exposição das amostras colocam em risco confiabilidade dos resultados apresentados(Golmakani; Hooton, 2019; Thomas et al., 2006; Wood, 2017). No caso do CP V, utilizado como referência, o teor alcalino do mesmo é de 0,71 %, o que é menor que o teor alcalino da solução (1,25%) o qual foi exposto pelo período de análise. Tanto a temperatura elevada, quanto a solução altamente alcalina, tem como objetivo acelerar o processo de deterioração das argamassas sujeitas a RAA no CP. Assim, as mesmas podem apresentar valores de expansão mais expressivos, que não condizem com a realidade, gerando falsos-positivos, conforme já constatado por diversos autores (Thomas et al., 2006; Sanchez et al., 2007; Alaejos et al., 2014; Golmakani; Hooton, 2016). Para o CAA, a solução externa altamente alcalina pode inibir a reação dos álcalis presentes no cimento ou mesmo reagir com o próprio CAA, influenciando de forma significativa nos resultados e levando a erros (Shi et al., 2015).

O ensaio de ABCPT foi desenvolvido por Sanchez (2008), e Sanchez, Kuperman e Helene (2011), com o objetivo de reduzir os problemas decorrentes de lixiviação que existem no método CPT e buscar um equilíbrio entre o ambiente interno (corpo de prova) e o externo (solução na qual os corpos de prova ficam imersos), ou seja, utilizar-se uma solução com teor de NaOH igual ao teor de álcali do cimento a ser avaliado. Acelerando o processo de deterioração dos concretos sujeitos a RAA apenas pela temperatura elevada de 80°C, sendo executado por um período de quatro semanas, ou seja pelo mesmo período de avaliação do ensaio de ABMT.

Na Figura 58, apresentam-se os resultados do Teste Brasileiro de Prismas de Concreto Acelerado (ABCPT) (Sanchez, 2008), aplicado para avaliação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA).

Figura 58: Expansão em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA) no Teste Brasileiro de Prismas de Concreto Acelerado (ABCPT)



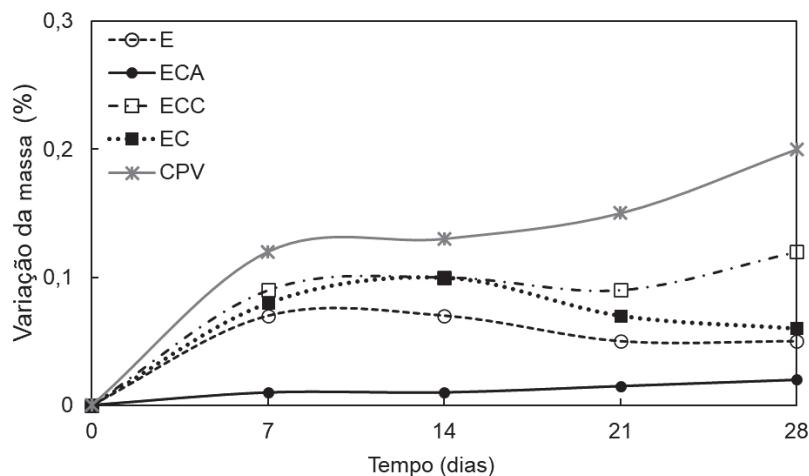
Analisando os Cimentos Alcali Ativados (CAA) submetidos ao ensaio ABCPT, verificou-se que todas as amostras apresentaram uma expansão inicial significativa, exceto a ECA que permaneceu abaixo do limite de 0,04% estabelecido pelo ensaio. As amostras E, ECC e EC superaram o valor de expansão apresentado pelo CP V aos 7 dias. Ao término do período de estudo de 28 dias, observou-se que os CAAs E e ECA mantiveram-se dentro do limite estabelecido, enquanto as amostras EC e ECC registraram expansões entre 0,04% e 0,11%, sendo, portanto, classificadas como cimentos propensos à deterioração por RAA. A amostra de CP V alcançou uma expansão de 0,1% ao final do ensaio, equiparando-se à amostra ECC e excedendo as demais amostras de CAA analisadas.

Comparando os resultados de expansão obtidos no ensaio de ABMT e ABCPT, percebe-se que houve uma variação relacionada às amostras mais expansivas. No ensaio de barras de argamassa, o cimento E foi o que apresentou maior expansão, superando o valor limite de 0,19% ao final do período de análise, enquanto as outras amostras mantiveram-se abaixo do limite de expansão estipulado. A segunda amostra que apresentou maior expansão no ensaio de ABMT foi o ECC, justamente a que apresentou maiores valores de expansão pelo ensaio ABCPT, seguido pelo cimento EC. Esses resultados podem indicar que apesar da adição de materiais ricos em sílica e alumina, o que reduziria o teor de Ca no sistema e alteraria as características do gel hidratado dos CAAs, isso não mitigou os efeitos da RAA. Apesar disso, as amostras de E e ECA apresentaram uma expansão menor que as demais no ensaio de ABCPT, mantendo-se dentro do limite estipulado pelo ensaio. Assim, da mesma forma que na análise anterior os resultados mantêm-se dentro do analisado por Gifford, Gilott (1996) e Shi (2015) que a

reação álcali-agregado ocorre menos em sistemas de escória álcali-ativada do que em sistemas à base de cimento Portland.

A Figura 59, apresenta a variação de massa nas amostras de concreto de CAA submetidas ao ensaio de avaliação de RAA, ABCPT.

Figura 59: Variação de massa dos prismas de concreto submetido ao ensaio de ABCPT



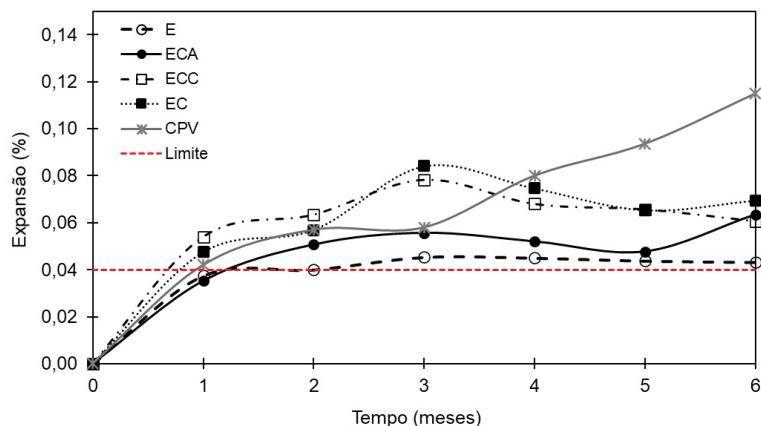
No que diz respeito à variação de massa nas amostras submetidas ao ensaio ABCPT, observou-se que o ganho de massa acompanhou o mesmo padrão das expansões registradas. A amostra ECC apresentou o maior aumento de massa, com cerca de 0,12%, seguida pela EC, com 0,07%. As amostras E e ECA registraram aumentos menores, de 0,05% e 0,03%, respectivamente, ao final do período de análise.

Esse comportamento contrasta com os resultados do ensaio AMBT. Nele, as amostras com maior ganho de massa foram aquelas que continham materiais suplementares, como CCA e C. Inicialmente, esse resultado foi atribuído ao possível refinamento dos poros e à consequente redução da absorção da solução, o que indicaria melhor desempenho frente à RAA.

No entanto, no ensaio ABCPT, esse ganho de massa pode ter outro significado. Ele pode estar relacionado a um maior acúmulo de produtos expansivos associados à reação álcali-agregado, indicando um possível avanço da deterioração.

A Figura 60, apresenta os resultados de expansão de concretos para as amostras de CAA e CPV submetidos a análise de deterioração por RAA pelo método ACPT, NBR 15577-7 (2018).

Figura 60: Expansão em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA) para o ensaio ACPT



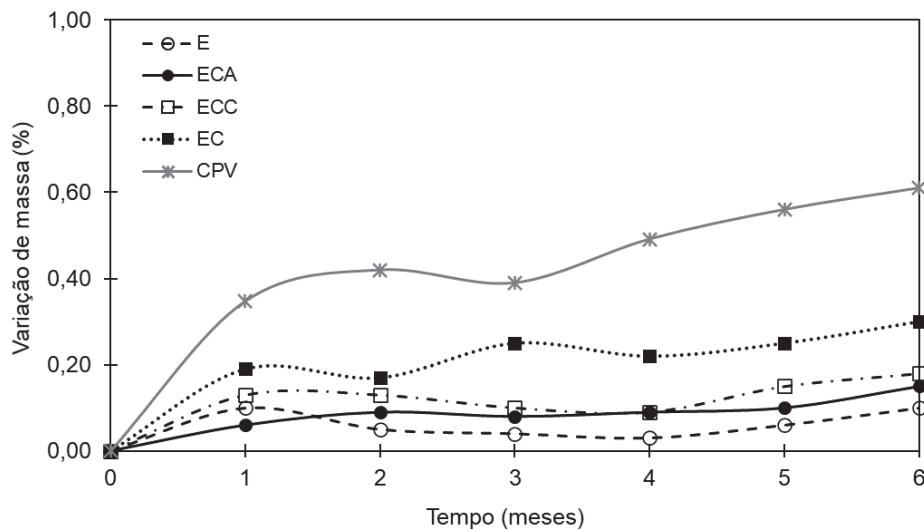
Seguindo os procedimentos normatizados pela NBR 155777 (2018), pode-se notar que todas as amostras testadas apresentaram expansão maior que o valor limite estipulado após seis meses de avaliação. Observa-se ainda que, nesse caso, a amostra de CAA que apresentou maior expansão ao final do período de ensaio, foi o EC com aproximadamente 0,075% e a que apresentou menor expansão foi E com 0,042% de variação no comprimento. Além disso, ao final de dois meses de ensaio todas as amostras testadas já haviam ultrapassado o valor limite estipulado para o ensaio, resultado parecido com o encontrado por Bakharev, Sanjayan e Cheng (2001a) onde as amostras de CAA atingiram 0,04% de expansão após 100 dias de ensaio acelerado em concretos.

Já Moraes et al., (2021), constataram que as amostras de concreto com CAA e agregado graúdo de origem basáltica, com equivalente alcalino de 3,75%, não apresentaram tendência de expansão após 100 dias de ensaio acelerado em concretos, essa controvérsia pode estar relacionada as diferenças relacionadas ao tipo de agregado, já que no presente estudo se tratava de rochas de gnaisse.

Da mesma forma que nas análises de ABMT e ABCPT nota-se que o desempenho do CAA quanto a RAA nas condições de umidade do 95% e temperatura de 60⁰ foram melhores quando comparadas o CP V, o que já foi constatado por outros autores (Angulo-Ramírez; Mejía De Gutiérrez; Medeiros, 2018; Shi, 2015).

A Figura 61, apresenta os resultados de variação de massa em concretos para as amostras de CAA e CP V submetidos a análise de deterioração por RAA pelo método ACPT, NBR 15577-7 (2018).

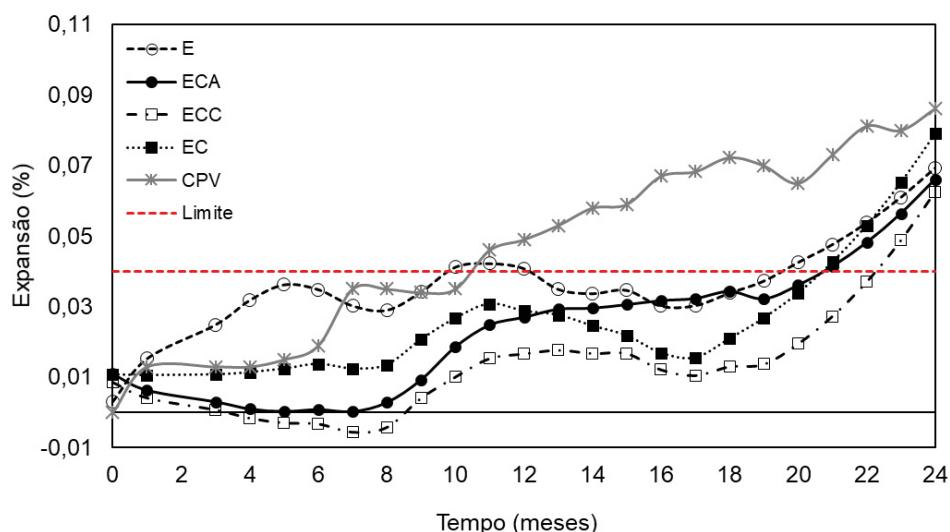
Figura 61: Variação de massa dos prismas de concreto submetidos ao ensaio ACPT



Considerando as variações de massa ao longo do ensaio ACPT, nota-se que as amostras de CAA apresentaram um ganho de massa menor que o CP V, resultado consistente com o desempenho de expansão por RAA observado no ensaio. As amostras de CAA com maior (EC) e menor (E) expansão foram as mesmas que apresentaram os maiores e menores ganhos de massa, respectivamente. Além disso, as amostras EC e ECC, assim como no ensaio ABCPT, exibiram os maiores ganhos de massa, possivelmente devido à maior formação de produtos expansivos.

A Figura 62 apresenta os resultados de ensaio de expansão do CP V e CAA a partir da análise de longo tempo de prismas de concreto CPT.

Figura 62: Expansão em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA) no ensaio CPT



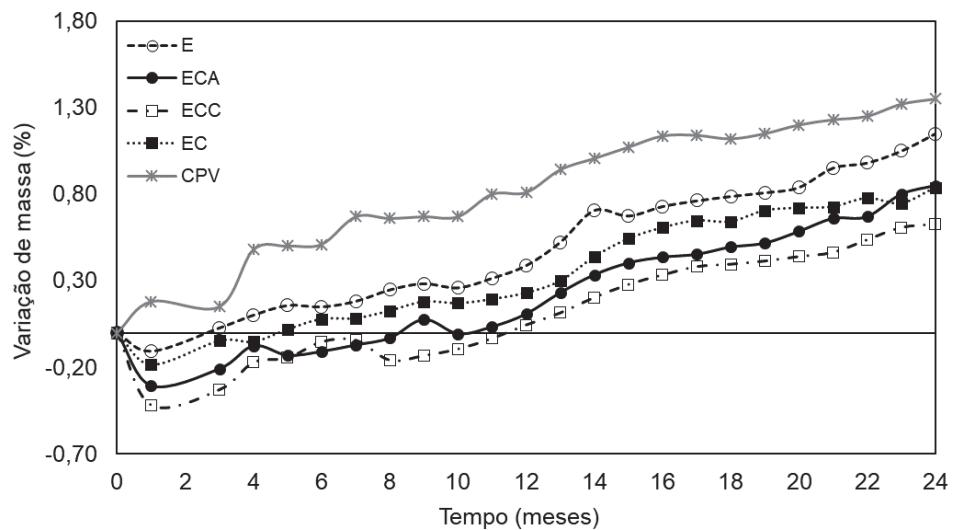
O ensaio CPT, é o ensaio que mais se aproxima das condições de campo ao qual os concretos podem estar submetidos. Em condições de temperatura de 38º e umidade de 95%, a análise se estende por um período de 2 anos. Nesse ensaio pode-se observar que todas as amostras testadas apresentaram expansão significativa ao final do período de ensaio. Constata-se que no décimo segundo mês de observação apenas a amostra de CP V seguida da amostra E apresentaram expansões superiores ao limite estabelecido pela norma, porém, com tendência de expansão, evidenciando a importância da avaliação por um tempo maior.

Observa-se ainda que as amostras desenvolveram expansões maiores no período inicial, são E e EC, da mesma forma que nos resultados apresentados pelo ensaio de barras de argamassa. Porém, ao final do período de avaliação todas as amostras apresentaram-se com potencial deterioração quando submetidas a RAA, assim, indicando que os resultados obtidos por AMBT não são compatíveis com a realidade e que deveriam ser avaliados por um período maior, assim como sugerido por Mohammadi, Ghiasvand, Nili (2020).

As amostras de ECA e ECC apresentaram uma retração inicial por pelo menos 7 meses de ensaio, entre 7 e 13 meses de avaliação as mesmas desenvolveram expansões, seguidas de um novo encurtamento entre 13 e 18 meses e após 18 meses expansões significativas ultrapassando o limite de 0,04% estabelecido pela norma e se aproximando dos valores indicados pelo CP V. Comportamento esse que se replicou para as demais amostras avaliadas e que condiz com os resultados observados por Bakharev, Sanjayan, Cheng (2001). A desaceleração de expansão pode ser relacionada a continuação da hidratação do CAA e ao aumento da resistência à compressão do concreto (Bakharev; Sanjayan; Cheng, 2001).

A Figura 63, apresenta a variação de massa para as amostras ensaiadas durante o ensaio CPT pelo período de 24 meses.

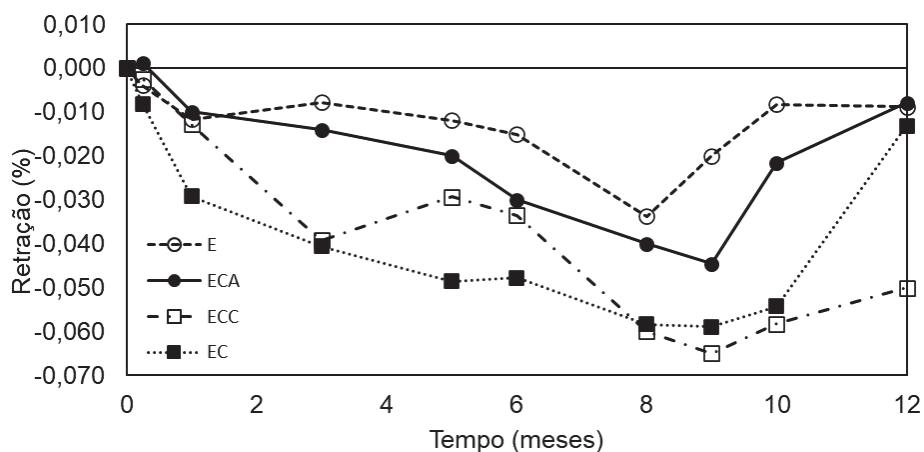
Figura 63: Variação de massa dos prismas de concreto submetidos ao ensaio CPT



Observa-se que todas as amostras desenvolveram um ganho de massa ao final do período de ensaio. Os ganhos de massa finais são condizentes com os valores de expansão apresentados durante o período de teste. Sendo que a amostra E e a amostra ECC, foram as amostras que apresentaram maior e menor ganho de massa, respectivamente.

Para avaliar o comportamento do CAA em condições reais, sem exposição que acelerasse a deterioração por RAA, corpos de prova de concreto prismáticos foram submetidos a análise linear de expansão, em temperatura de 23⁰ C e umidade entre 50% e 60%. Os resultados estão apresentados na Figura 64.

Figura 64: Resultado da análise de retração dos prismas de concreto



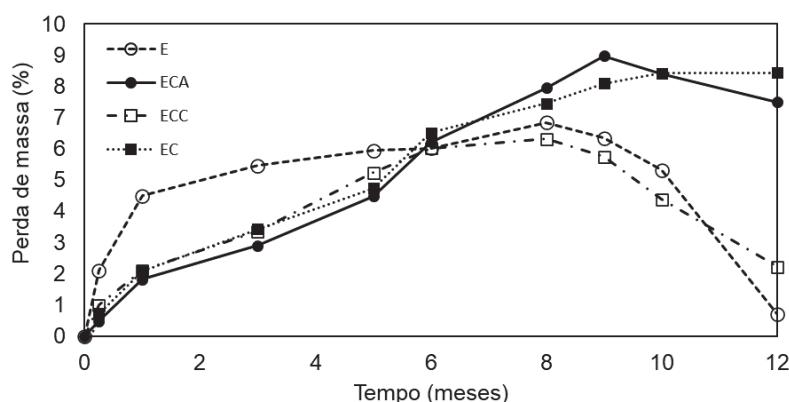
Nota-se pela avaliação em condições ambientes que todas as amostras de CAA apresentaram retração, apresentando somente a partir do nono mês características de expansão. O que também pode ser comparado com os resultados do ensaio CPT, onde a partir do nono mês o CAA começou a desenvolver expansões mais significativas. Uma alta tendência de encolhimento também é observada em géis CASH com baixa relação Ca/Si por natureza, e esta propriedade pode ser modificada pela adição de grupos extras de Si, Al no gel reagido (Chi; Huang, 2013; Gao; Yu; Brouwers, 2016; Lee; Jang; Lee, 2014).

Considerando os valores de retração, pode-se constatar que nos resultados apresentados no ensaio de longo prazo (CPT) está ocorrendo uma sobreposição de efeitos, ou seja, a expansão devido à deterioração do concreto por RAA está sendo minorada devido ao efeito de retração apresentada pelo CAA. Esse aspecto também foi observado por Xie; Xiang; Xi (2003), que correlaciona os efeitos da RAA com a retração autógena, ou seja, retração devido às reações de hidratação do cimento.

Diversos estudos comprovam que a retração em cimentos de escória ativada é significativamente maior do que nos cimentos Portland comuns Cadore et al., 2019; Duran Atış et al., 2009; Palacios e Puertas, 2007). Moraes et al., (2021), mesmo em condições de umidade elevada (95%), apresentou em seus resultados características de retração em concretos submetidos ao ensaio acelerado ACPT, o que pode indicar que o mesmo sofreu alguma influência da retração por secagem e devido a temperatura de 60º contribuiu para a maior formação de produtos hidratados, consequentemente sofrendo com retração autógena.

A Figura 65, apresenta os dados relacionados a perda de massa dos prismas de concreto sujeitos a condições ambientes.

Figura 65: Variação de massa relacionado ao ensaio de retração



Observa-se que todas as amostras de CAA apresentaram perda de massa, durante o período de análise. Nota-se ainda que a partir do oitavo mês as amostras começaram a ganhar massa, resultado que está de acordo com a análise de retração, que a partir do oitavo mês começou a apresentar expansão, logo, o ganho de massa pode estar relacionado com a formação de géis expansivos decorrentes da RAA.

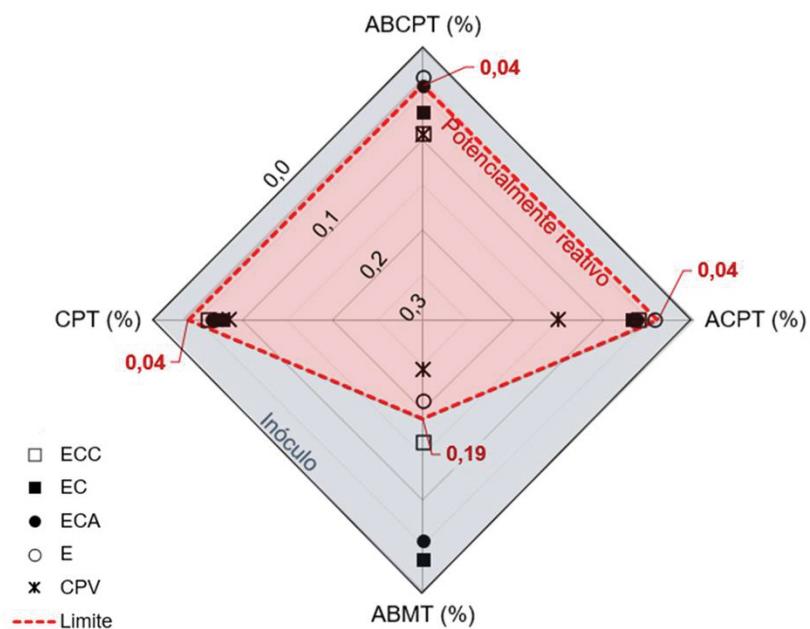
Entre as amostras com maiores perdas de massa destaca-se a EC e ECA. Porém, a amostra que apresentou maior retração foi ECC, o que implica que a perda de massa não necessariamente está relacionada com a retração por secagem, mas sim com a retração autógena, decorrente da maior formação de produtos hidratados.

Esses resultados de variação de massa estão de acordo com os resultados encontrados por Collins e Sanjayan, (2000), onde os autores concluíram que a perda de massa não é inteiramente responsável pela retração do concreto e a perda de água não explica a elevada retração do CAA.

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os ensaios de expansão linear (ABMT, ABCPT, ACPT e CPT) realizados permitiram avaliar a Reação Álcali-Agregado (RAA) nas amostras ECC, EC, ECA, E e CPV, comparando seus valores finais de expansão com os limites normativos estabelecidos para cada método. Para visualizar e comparar os resultados obtidos em todos os ensaios, seja em concreto ou argamassa, foi desenvolvida a Figura 66. Nessa representação, os pontos localizados na área vermelha indicam que os valores finais de expansão das amostras ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas, sendo classificados como potencialmente reativos, enquanto os pontos na área azul correspondem a valores abaixo dos limites normativos, caracterizando as amostras como inócuas.

Figura 66: Comparativo de resultados de expansão linear dos CAAs e CPV para os ensaios ABMT, ACPT, ABCPT e CPT.



A partir das análises de expansão apresentadas, observa-se que o ensaio CPT, considerado o mais confiável por suas condições de exposição mais realistas, pode apresentar expansões menores do que o esperado devido à sobreposição dos efeitos da RAA e da retração. Mesmo assim, os resultados indicam que, nesse ensaio, todas as amostras ultrapassaram o limite normativo (0,04%), sendo classificadas como reativas.

Apesar dos resultados sugerirem que condições submersas apresentam resultados mais realistas de expansão por RAA para CAA. No ensaio ABMT, apenas as amostras CPV e E ultrapassaram o limite normativo (0,19%), sendo classificadas como reativas, enquanto as demais permaneceram inócuas. A menor expansão observada nesse método pode estar relacionadas as condições severas de exposição do ABMT, que não condizem com a realidade, para o CP, no caso do CAA, pode ter gerado difusão dos álcalis do cimento para a solução, pois o CAA apresenta alcalinidade maior que o meio (Ghiasvand et al., 2023; Huang et al., 2018).

O ensaio ABCPT surge como uma alternativa para analisar a suscetibilidade do CAA à deterioração causada pela RAA, uma vez que as condições submersas do teste minimizam os efeitos da retração por secagem, enquanto a solução alcalina, com teor de álcalis equivalente ao do CAA, reduz os problemas de difusão e lixiviação. Foi observado

que, no ensaio ABCPT, os CAAs com maiores expansões foram os que apresentaram maiores retracções em temperatura ambiente, evidenciando a influência da retração nos resultados de expansão obtidos pelo CPT, especialmente nos primeiros 12 meses.

Esses resultados indicam que os ensaios acelerados ABCPT e ACPT apresentaram boa correlação com o CPT, demonstrando que podem ser alternativas viáveis, desde que sejam realizados por um período de exposição um pouco mais longo para melhorar a precisão da predição da reatividade das misturas. Por outro lado, o ABMT pode subestimar a reatividade de algumas misturas, devido às diferenças na composição química e nas interações entre a argamassa e o meio de ensaio. Dessa forma, recomenda-se a combinação de múltiplos ensaios para uma avaliação mais robusta da durabilidade dos concretos de CAA frente à RAA.

A classificação final das amostras quanto à sua reatividade é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23: Classificação das amostras de CAA e CPV quanto à sua reatividade submetidas aos ensaios ABMT, ABCPT, ACPT e CPT.

Amostra	ABCPT	ACPT	ABMT	CPT
ECC	Expansão > 0,04	Expansão > 0,04	Expansão < 0,19	Expansão > 0,04
EC	Expansão > 0,04	Expansão > 0,04	Expansão < 0,19	Expansão > 0,04
ECA	Expansão < 0,04	Expansão > 0,04	Expansão < 0,19	Expansão > 0,04
E	Expansão < 0,04	Expansão > 0,04	Expansão > 0,19	Expansão > 0,04
CPV	Expansão > 0,04	Expansão > 0,04	Expansão > 0,19	Expansão > 0,04

Dessa forma, verifica-se que o CPV apresenta alta reatividade em todas as condições testadas, enquanto o ECC, E e ECA demonstraram comportamento limítrofe, podendo exigir monitoramento adicional. A ECA foi a mistura mais estável. Se considerarmos que o método de avaliação CPT é o método mais confiável, então todos os cimentos testados são considerados reativos. Esses resultados reforçam a importância de utilizar múltiplos métodos de ensaio para avaliar a RAA, garantindo uma análise mais precisa e representativa da reatividade dos concretos.

Os resultados indicam que os ensaios acelerados podem ser eficazes na detecção de reatividade em CPV, pois seus valores foram consistentes e correlacionados entre os diferentes métodos. No entanto, para os CAAs, a maior variabilidade nos ensaios

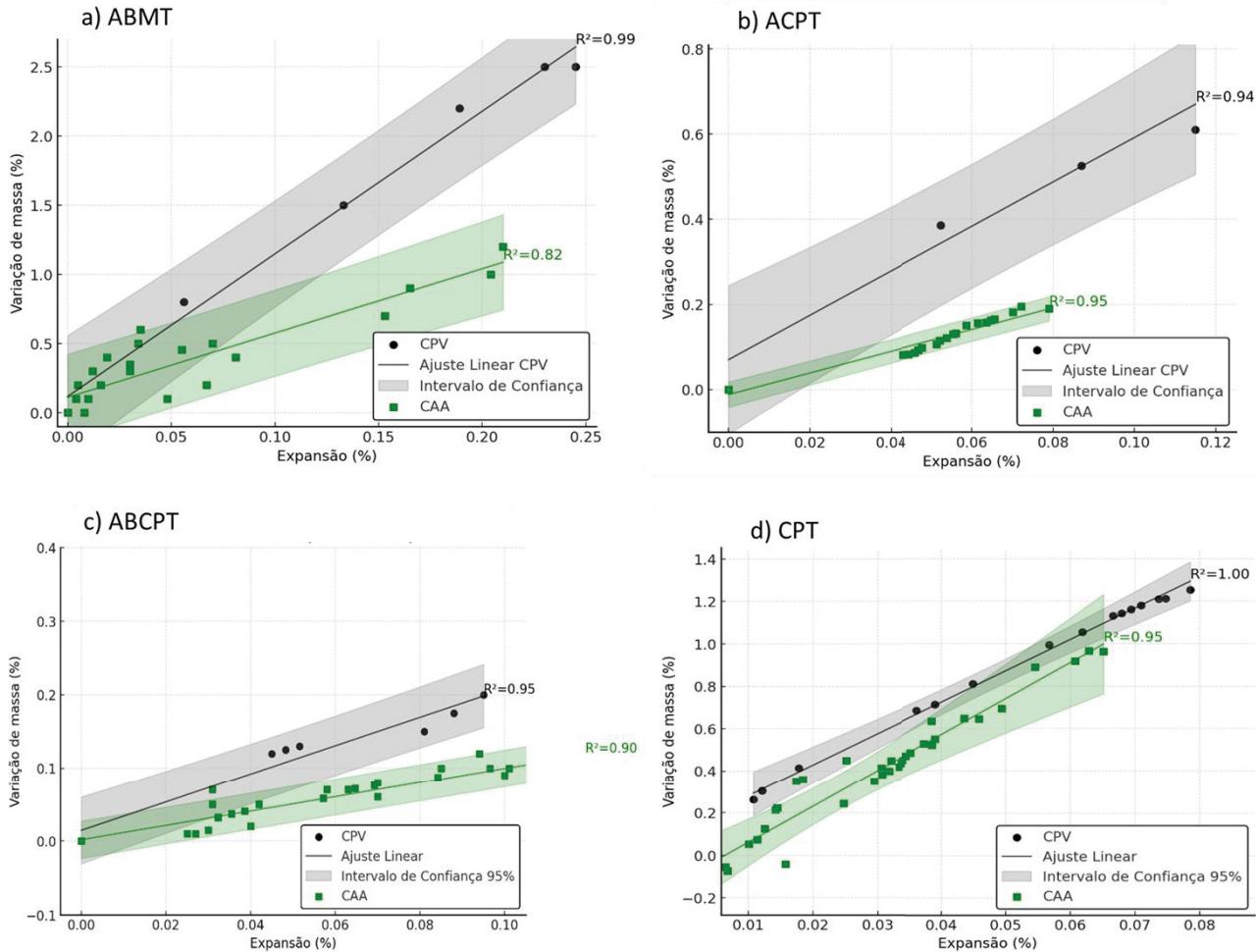
acelerados de argamassa e ABCPT sugere que esses métodos podem não refletir completamente os mecanismos expansivos desse tipo de cimento, tornando os ensaios, como o CPT e ACPT, mais adequados para avaliar sua durabilidade.

Além disso, agregados com baixa reatividade, como os analisados neste estudo, podem gerar resultados subestimados. Portanto, recomenda-se um período de avaliação superior a 12 meses para o ensaio de expansão CPT, com o objetivo de obter resultados mais confiáveis. Essa recomendação condiz com as conclusões de Ghiasvand et al. (2023), que, embora reconheçam a eficácia de ensaios de curto prazo para RAA em CAAs com agregados altamente reativos, enfatizam a necessidade de estudos de longo prazo para uma análise mais precisa de agregados com baixa ou moderada reatividade.

A fim de analisar e correlacionar os valores de expansão (%) e variação de massa (%) entre diferentes amostras experimentais, foram analisados os dados obtidos a partir dos ensaios ABMT, ACPT, ABCPT e CPT, considerando cinco distintos grupos de medição: CPV, E, EC, ECC e ECA. Para facilitar a interpretação dos resultados e melhorar a análise comparativa, essas amostras foram divididas em dois grandes grupos. O primeiro grupo, denominado CPV, foi mantido isolado devido às suas características distintas. O segundo grupo, chamado CAA, foi formado pela união das amostras E, EC, ECC e ECA, pois apresentavam tendências semelhantes ao serem analisadas em conjunto.

A Figura 67 apresenta a correlação entre expansão (%) e variação de massa (%) entre CPV e CAA, a partir dos ensaios a) ABMT, b) ACPT, c) ABCPT e d) CPT.

Figura 67: Correlação entre expansão (%) e variação de massa (%) entre CPV e CAA, a partir dos ensaios
a) ABMT, b) ACPT, c) ABCPT e d) CPT



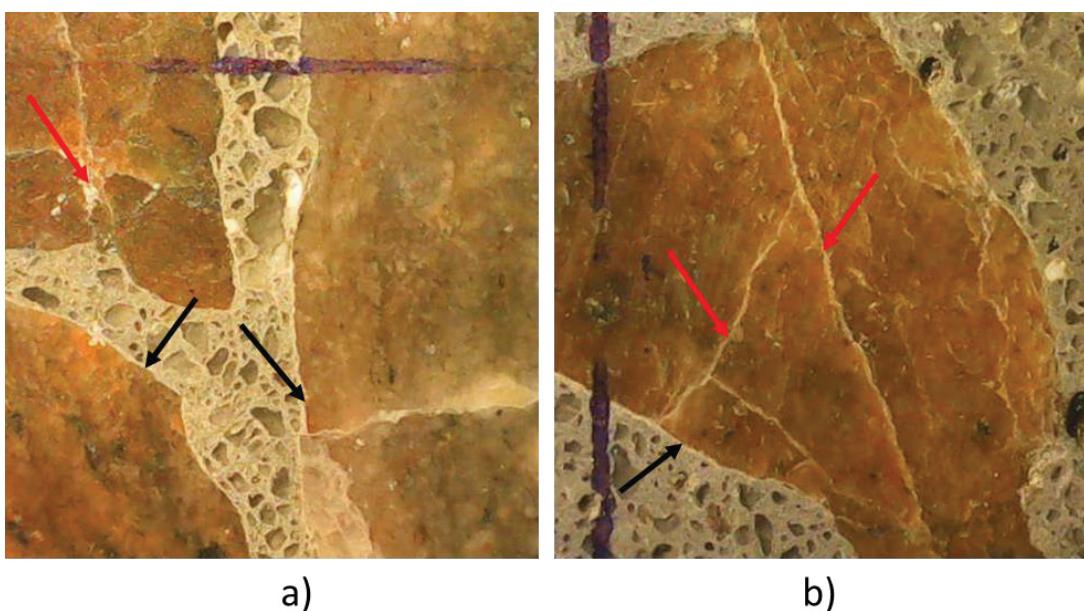
Os concretos formulados com CPV apresentaram um padrão altamente previsível de expansão e ganho de massa em todos os ensaios, com coeficientes de determinação (R^2) próximos ou superiores a 0,94, indicando uma forte relação linear entre a expansão e a formação de produtos expansivos. Essa característica sugere que os ensaios acelerados podem ser confiáveis para prever o comportamento de longo prazo do CPV, uma vez que os valores de expansão final foram muito próximos entre os diferentes métodos. O ABCPT e o AMBT produziram resultados compatíveis com o CPT tradicional, validando sua aplicação como métodos acelerados para diagnóstico da RAA nesse tipo de cimento. Em particular, o AMBT apresentou a maior correlação para CPV, demonstrando que a exposição a soluções alcalinas intensifica o mecanismo expansivo de forma proporcional à absorção de umidade, enquanto o ABCPT acelerou a reação.

Por outro lado, os concretos formulados com CAA apresentaram maior variabilidade nos resultados, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,82 e 0,95, dependendo do ensaio aplicado. Essa dispersão pode estar relacionada a mecanismos adicionais que influenciam a absorção de umidade e a expansão, tornando os resultados menos homogêneos em comparação ao CPV. O ensaio de longo prazo, como CPT, indicou um comportamento mais consistente do CAA, resultando em ajustes lineares mais confiáveis. Entretanto, os ensaios acelerados (AMBT e ACPT) apresentaram maior dispersão, sugerindo que a interação com soluções alcalinas pode não capturar completamente os mecanismos expansivos do CAA. Além disso, o CPT revelou um efeito de retração inicial antes da expansão significativa, comportamento não observado no CPV, reforçando que os cimentos alcalinos ativados podem apresentar uma resposta diferenciada às condições do ensaio.

Ao comparar os dois sistemas, fica evidente que, enquanto o CPV apresenta uma relação clara e bem definida entre expansão e variação de massa, os concretos de CAA demonstram maior variabilidade na resposta ao ensaio acelerado. Isso pode indicar que os mecanismos de expansão no CAA dependem mais das condições específicas do ensaio, como concentração de álcalis e tempo de exposição, tornando necessária uma avaliação mais detalhada para entender se os resultados obtidos no AMBT são representativos das condições reais de campo. Já a aplicação do ABCPT em CAA é relevante, pois os métodos tradicionais de avaliação da RAA podem não considerar adequadamente as particularidades desses cimentos. Ao minimizar os efeitos de difusão e lixiviação, o ABCPT pode oferecer uma avaliação mais precisa da reatividade potencial dos agregados em contato com matrizes alcalinas ativadas.

Para complementar a análise dos ensaios de expansão e validar os mecanismos associados à RAA, foram realizadas análises de Microscopia e Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV-EDS). A Figura 68 refere-se a imagens de microscópio digital de concretos a partir de CAA polidos, a) amostra E e b) amostra ECA, aos 18 meses de idade do ensaio CPT. As demais amostras também apresentaram as mesmas características.

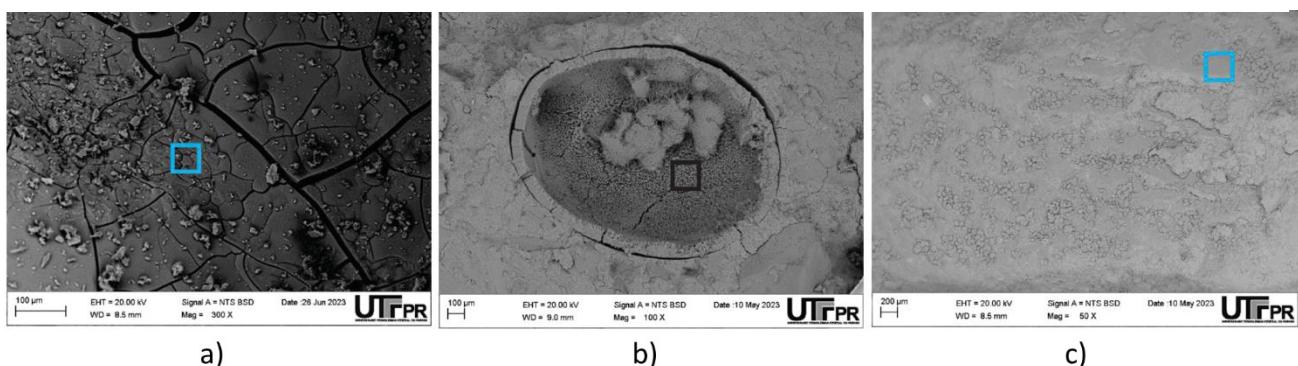
Figura 68: Microscopia óptica do concreto de CAA submetido às condições de cura de 38⁰ e umidade de 95% com agregado reativo. a) Fissuras internas e externas carcteríticos de RAA, b) Deposição de gel de RAA nas fissuras do concreto de CAA.



A análise microscópica revelou fissuras internas nos agregados (destacadas na Figura 68 por setas vermelhas) e fissuras na interface entre a pasta e o agregado (indicadas por setas pretas), todas contendo depósitos de géis expansivos. Essas observações auxiliam na correlação entre os danos microestruturais e os níveis de expansão observados nos ensaios laboratoriais.

A Figura 69 apresenta as imagens de MEV para o concreto feito com CPV e com o mesmo agregado reativo. Esta figura foi gerada no trabalho de Macioski (2023) utilizando o mesmo agregado e o mesmo cimento (CPV) desta pesquisa a partir do ensaio CPT aos 12 meses de ensaio.

Figura 69: Microscopia de varredura eletrônica em concreto de cimento Portland sujeito a RAA, aos 12 meses de idade à 38º e umidade de 95%. a) Gel de RAA gretado, b) Poro preenchido por gel de RAA, c) Gel de RAA na superfície do agregado.



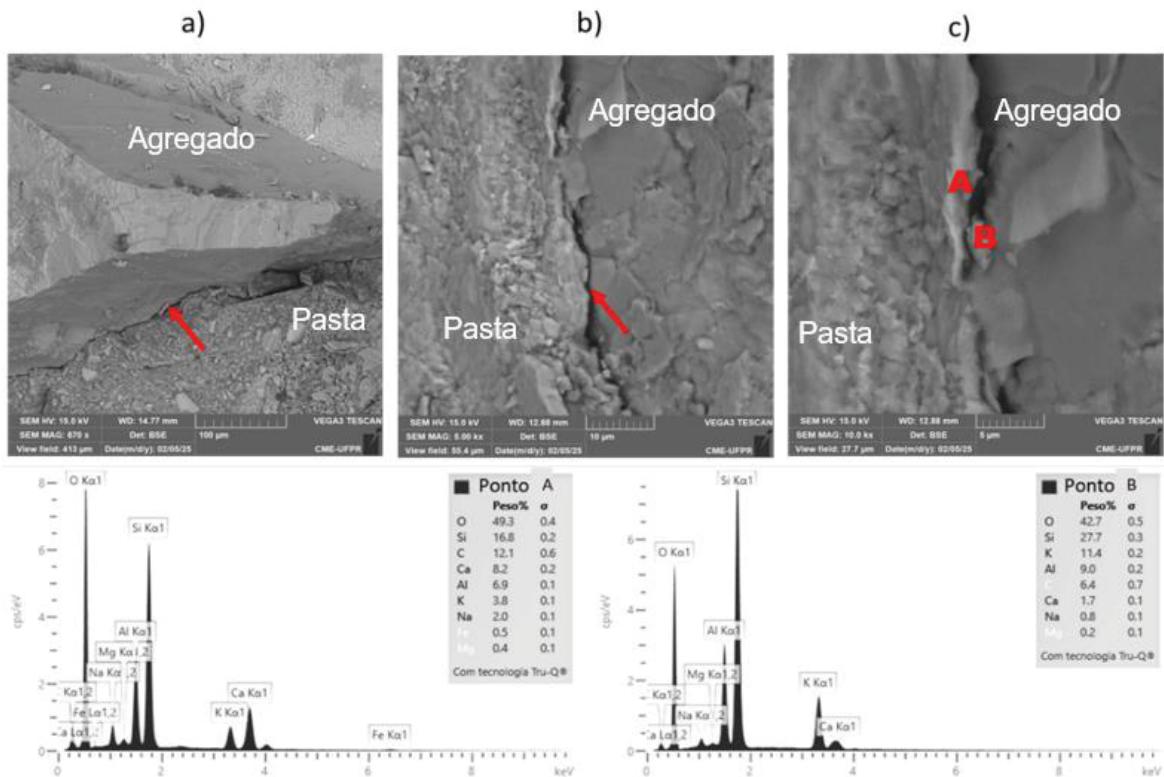
Fonte: Macioski (2024)

Observa-se na Figura 69a que o gel fissurado possui uma morfologia uniforme e uma superfície de baixa rugosidade. A ausência de cristais com estrutura definida reforça o caráter amorfó do material. Em outras regiões da amostra, por meio de ampliações de 100X, foram identificados poros cuja superfície interna estava revestida por um precipitado texturizado e fissurado, conforme ilustrado na Figura 69b. Além disso, constatou-se que o material presente no interior desses poros exibia uma estrutura rendada, com dimensões reduzidas (aproximadamente 10 µm) e extremidades interconectadas, características que sugerem tratar-se de gel de RAA recristalizado.

Já na Figura 69c, tem-se a superfície do agregado fissurado, onde foi possível observar um produto de morfologia compacta (Macioski, 2023). A investigação do gel de RAA frequentemente revela a presença de produtos maciços e fissurados, assim como estruturas cristalizadas. Em certas condições, esses produtos podem exibir morfologia rendada dentro dos poros ou apresentar uma estrutura acicular, sendo compostos majoritariamente por sílica, cálcio e álcali (HASPARYK, 2005).

A Figura 70, mostra a analise de MEV realizada para a amostra E de CAA.

Figura 70: MEV de amostras de CAA. a) e b) Fissura na interface pasta agregado da amostra E, c) Pontos de EDS no material depositado na fissura encontrada na amostra E.



A análise por MEV revelou a presença de um material depositado no interior da fissura existente entre o agregado e a matriz cimentícia. Esse material se apresenta aderido às paredes da fissura, exibindo uma textura rugosa e não homogênea, sem uma estrutura cristalina bem definida.

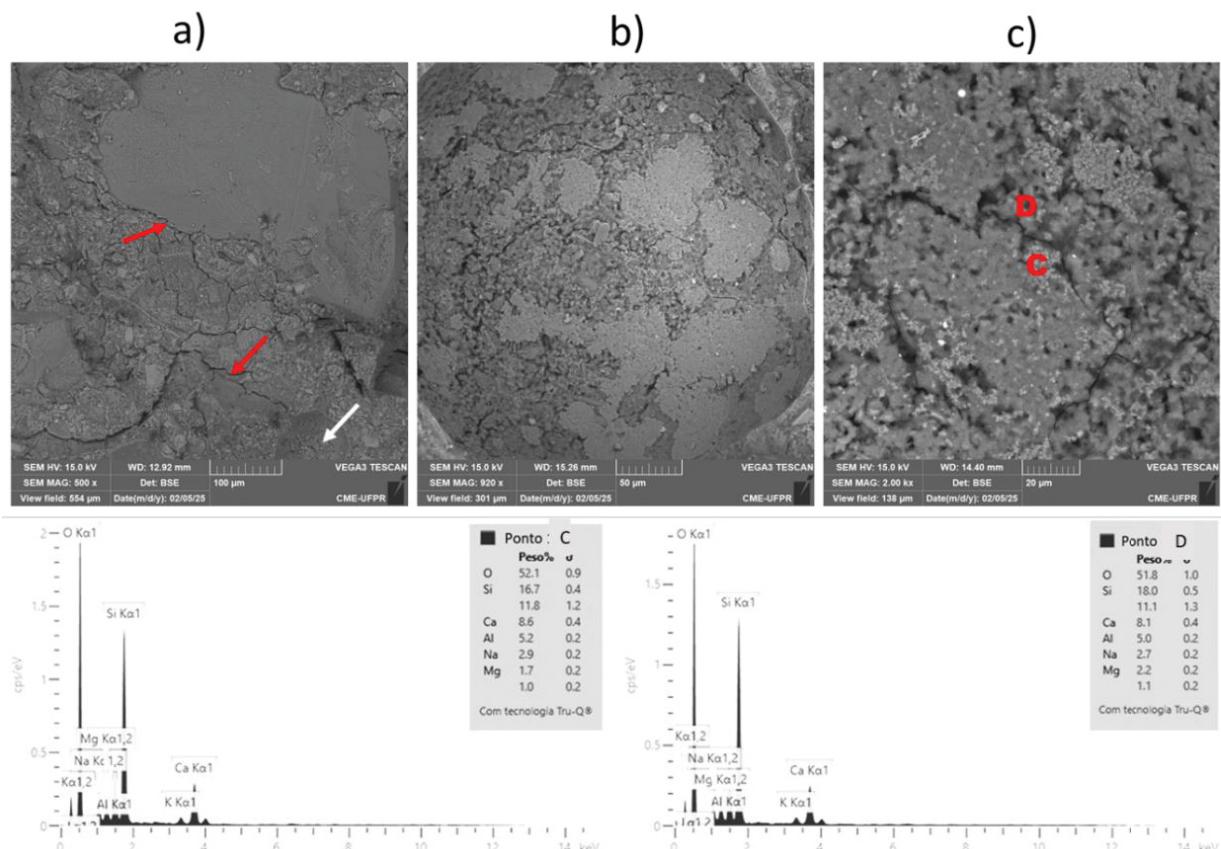
Essa morfologia sugere que o material pode ter sido inicialmente fluido ou viscoso, preenchendo a fissura e, posteriormente, passando por um processo de densificação ou endurecimento, possivelmente devido à interação com a matriz cimentícia e à evolução da reação. Qian et al., (2024) indicam que géis de RAA com menor teor de cálcio e maior concentração de álcalis tendem a apresentar menor viscosidade e maior mobilidade, facilitando seu escoamento e deixando poros vazios na matriz cimentícia. Este fenômeno pode explicar a presença de regiões vazias em algumas das fissuras analisadas no presente estudo, sugerindo que parte do gel de RAA pode ter migrado para outras áreas da matriz ou sido lixiviado.

A composição química obtida por Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) confirma a predominância de Si, Na, K e Ca, elementos frequentemente associados ao gel

da RAA em CAA o que está de acordo com estudos de Leemann et al., (2020) e Moraes et al., (2021). A análise quantitativa indica que o Ponto A, localizado na interface entre o material depositado e a matriz cimentícia, apresenta um teor mais elevado de Ca, enquanto o Ponto B, situado na região mais interna do material, contém uma concentração maior de Si e feldespato do agregado, com menor presença de Ca.

A presença de Al em ambos os pontos analisados é um aspecto relevante, pois indica uma possível modificação na composição do gel de RAA, tornando-o menos expansivo e mais rígido. Em sistemas cimentícios convencionais, a formação do gel da RAA ocorre predominantemente como um material sílico-alcalino com pouca influência do Al. No entanto, em sistemas alcalinos ativados, é esperado que haja incorporação desse elemento no gel (WANG et al., 2024). A Figura 71 apresenta as características encontradas na análise de MEV de amostras de CAA aos 24 meses de exposição em condições de 38 °C ± 2 °C e umidade de 95%.

Figura 71: MEV de amostras de CAA. a) Fissuras e poros presentes na amostra EC, b) Poro com presença de gel de RAA na amostra EC, c) Material depositado em poro encontrado na amostra ECA.



A análise das micrografias obtidas por MEV evidenciou a deterioração da interface agregado-matriz, manifestado por fissuras interfaciais e poros preenchidos com um material de textura rendada.

Os resultados de EDS confirmam a presença de Si, Na, K, Ca e Al, confirmando que o material depositado nas fissuras e poros corresponde a um produto de RAA modificado pela interação com a matriz cimentícia. A distribuição química entre os pontos analisados indica que o Ponto C apresenta maior teor de cálcio, enquanto o Ponto D contém uma concentração mais elevada de sílica e álcalis.

Além disso, a detecção de alumínio no gel de RAA sugere uma modificação estrutural, recorrente em sistemas cimentícios com alta disponibilidade de Al, como ocorre nos CAAs. A incorporação de alumínio na estrutura do gel pode influenciar a sua expansibilidade, tornando-o mais rígido e menos suscetível à mobilidade, o que pode impactar sua reatividade ao longo do tempo (Qian et al., 2024).

Nos cimentos Portland, os géis de RAA são compostos por silicatos alcalinos ricos em cálcio, enquanto nos cimentos alcalinos ativados, apresentam maior teor de álcalis e alumina, com menor concentração de cálcio, o que impacta diretamente sua mobilidade e potencial expansivo. Essa diferença na composição química se reflete em variações morfológicas, onde o gel de RAA pode assumir estruturas gretadas (Moraes et al., 2021), plaquetas isométricas finas e alongadas (Wang et al., 2024), rendadas, além de formações porosas e filamentares (Macioski, 2024). Algumas dessas morfologias também são encontradas em cimentos Portland, conforme indica Hasparyk (2005) e Macioski (2024), que relataram a diversidade estrutural dos produtos de RAA, abrangendo desde formas maciças e fissuradas até estruturas rendadas dentro dos poros.

A análise por EDS realizada nas micrografias permitiu identificar as relações atômicas presentes nos produtos de reação. Esses resultados foram comparados com dados da literatura, abrangendo estudos sobre CP (Rezaieh et al., 2021; Kurtis et al., 1998; Hasparyk, 2005; Šachlová; Přikryl; Pertold, 2010) e CAA (Moraes et al., 2021; Qian et al., 2024; Wang et al., 2024). As composições químicas potenciais estão ilustradas na Figura 72, enquanto as relações atômicas percentuais calculadas são apresentadas na Figura 72.

Figura 73: Diagrama ternário dos principais componentes químicos encontrados no gel de RAA em a) Cimento Portland (Macioski, 2023), b) CAA

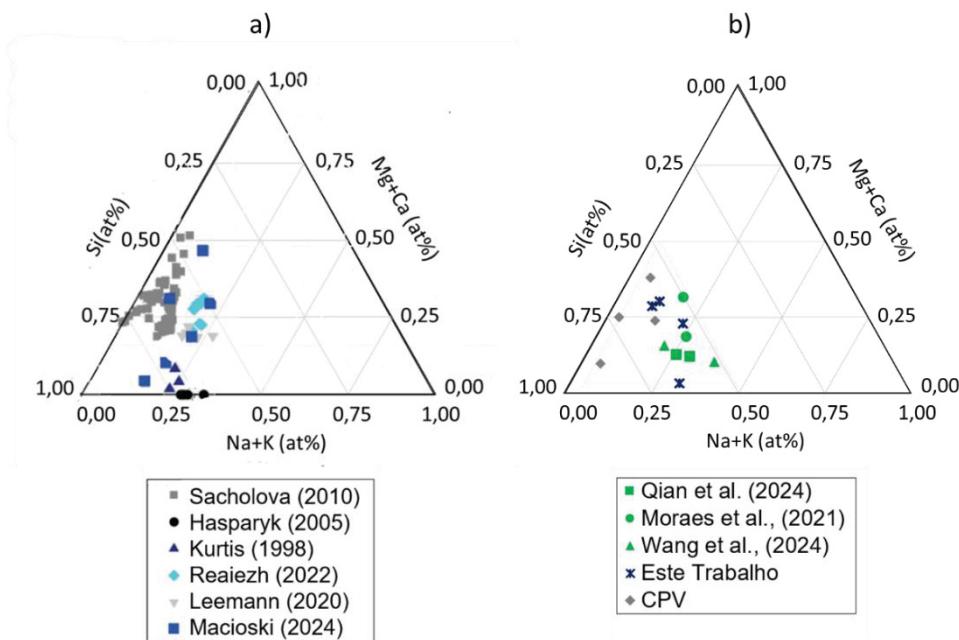
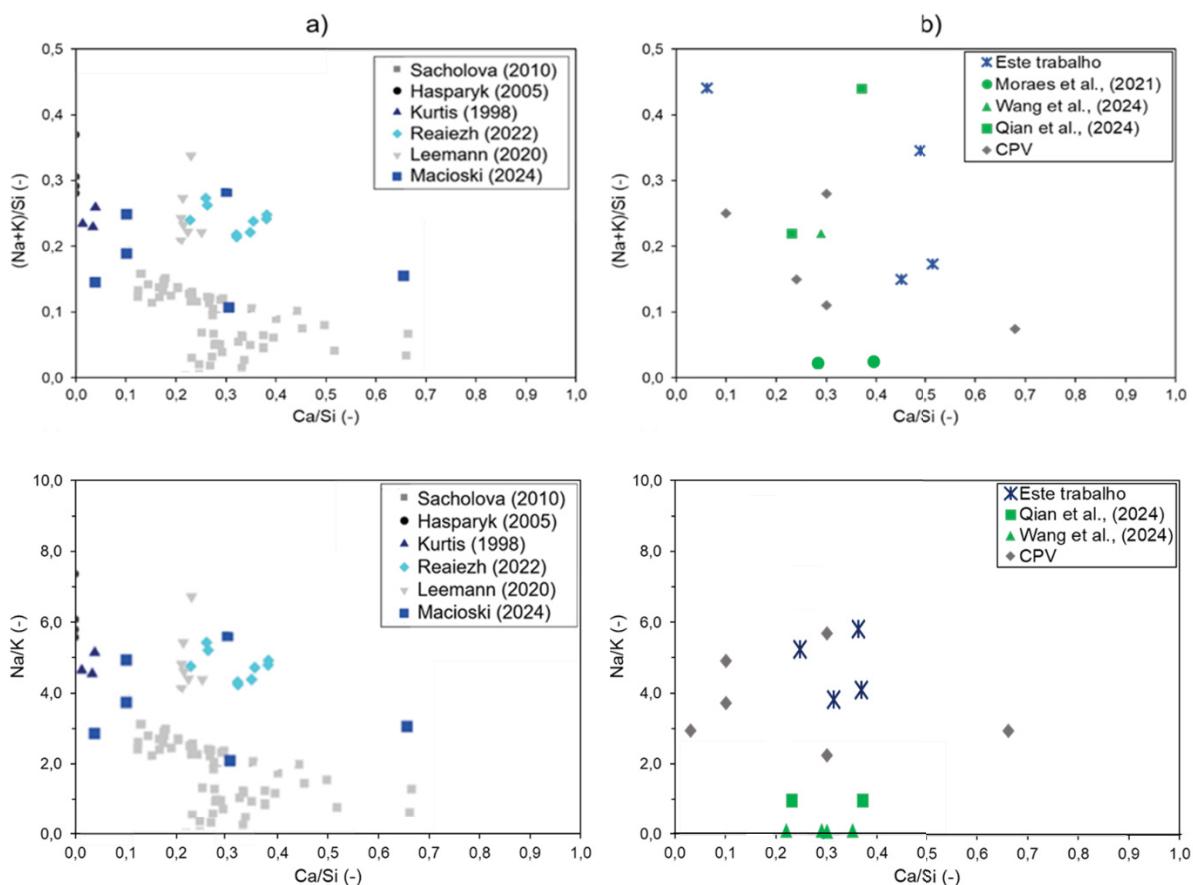


Figura 72: Relações em % atômicas do gel de RAA. a) Cimento Portland (Macioski, 2024) e b) CAA



A análise de MEV revelaram algumas diferenças em suas composições químicas, influenciadas pelo tipo de material utilizado no CAA. A analise do ponto A e B foram retiradas da amostra E, enquanto C e D são provenientes de ECA. Essa diferença na composição reflete na distribuição dos elementos e nas relações Ca/Si, Na/K e (Na+K)/Si.

A ponto B apresentou uma relação de Ca/Si = 0,24, o que indica a formação de géis de baixa viscosidade e expansivos, característicos de sistemas com alta concentração de álcalis e baixo teor de cálcio. Esse comportamento também é reforçado pela relação de (Na+K)/Si = 0,44, mostrando maior concentração de álcalis ativos para a reação expansiva. Da mesma forma, o ponto A, com uma Ca/Si de 0,36, sugerindo menor fluidez dos produtos de RAA quando comparada à B. Seu valor de (Na+K)/Si é 0,35, também indicando uma presença considerável de álcalis, mas em menor proporção do que B.

Os pontos C e D, que contêm caulim e cinza da casca de arroz, apresentaram valores semelhantes de Ca/Si (0,31 e 0,36, respectivamente). Esses teores de cálcio também indicam a formação de géis baixa viscosidade, o que pode resultar em menor propensão à expansão. Os valores de (Na+K)/Si de C (0,17) e D (0,15) são menores que os dos pontos A e B, indicando menor disponibilidade de álcalis livres nesses sistemas. Esse comportamento está alinhado com estudos que sugerem que sistemas com menor teor de álcalis tendem a formar géis RAA menos reativos e menos expansivos (Gholizadeh-Vayghan; Rajabipour, 2017).

Ao comparar esses resultados com a literatura sobre cimento Portland (CPV), observa-se que os produtos de RAA no CPV possuem relações Ca/Si que variam entre 0,3 e 0,5, e Na/K próximo de 1,0. Os valores de (Na+K)/Si no CPV variam de 0,075 a 0,28, sendo geralmente menores do que os encontrados nos pontos A e B, mas semelhantes aos de C e D. Esses valores indicam que os CAA possuem maior disponibilidade de álcalis em comparação com o CPV, o que favorece a RAA, mas também podem apresentar diferenças na viscosidade dos produtos de RAA. No CPV, a presença de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) na solução de poros facilita a incorporação do cálcio aos géis de RAA ,aumentando a viscosidade e a tensão expansiva (Gholizadeh-Vayghan; Rajabipour, 2017). No CAA, no entanto, o cálcio tende a ficar retido na matriz C-(N)-A-S-H, reduzindo sua disponibilidade para interagir com os produtos de RAA e influenciando diretamente a expansão (Shi, 2017, Shi, 2018)

Essa diferença de comportamento entre CPV e CAA se reflete na expansão observada experimentalmente. As amostras de CAA apresentaram menor expansão que o CPV, mas ainda acima do limite normativo, conforme constatado anteriormente. Essa redução da expansão no CAA pode estar relacionada à menor disponibilidade de cálcio livre para os géis ASR, além do efeito da retração inicial dos CAA. Diferente do CPV, onde a retração é menos significativa, os CAA sofrem uma contração volumétrica inicial maior, o que pode levar à formação de microfissuras e influenciar a resposta expansiva ao longo do tempo (Ismail et al., 2013; Kashani et al., 2014). Isso pode explicar por que as amostras de CAA apresentaram menor expansão que o CPV, apesar de ainda ultrapassarem os limites estabelecidos pela norma, no ensaio de CPT.

Os resultados deste estudo também estão alinhados com os achados de Qian et al. (2024) e Wang et al. (2024), que analisaram a RAA em sistemas CAA. As relações Ca/Si, Na/K e (Na+K)/Si encontradas estão dentro das faixas relatadas por esses autores. Isso sugere que os géis ASR em CAA podem ter diferentes comportamentos dependendo da quantidade de cálcio disponível no sistema, um aspecto que também foi reportado nos estudos mencionados.

A Tabela 24 a seguir resume as relações atômicas encontradas neste estudo e nos estudos de referência:

Tabela 24: Relações atômicas (%) encontradas neste estudo e referências

Pontos	Amostra	(Na+K)/Si (-)	Na/K (-)	Ca/Si (-)
A	E	0,35	5,85	0,36
B	E	0,44	5,28	0,24
C	ECA	0,17	3,81	0,31
D	ECA	0,15	4,11	0,36
Moraes et al. (2021)		0,64 - 0,69	-	0,28 - 0,39
Wang et al. (2024)		0,51 - 0,22	0,09-0,11	0,3-0,50
Qian et al. (2024)		0,44 - 0,22	0,90-1,00	0,37 - 0,23
CPV		0,07 - 0,11	0,07-0,11	0,1 - 0,68

Com base nos resultados, é possível afirmar que as relações atômicas encontradas no presente estudo são consistentes com aquelas reportadas para sistemas CAA na literatura. No entanto, algumas diferenças são observadas, especialmente nas amostras C e D, que possuem um teor de Ca/Si mais elevado do que o esperado. Essa diferença reforça

a influência da composição do CAA na formação e comportamento dos produtos ASR. Embora o CAA tenha demonstrado menor expansão do que o CPV, a presença de retração inicial pode ter influenciado esses resultados, reduzindo a expansão observada.

5.5 CONCLUSÕES

O presente capítulo teve como objetivo avaliar a suscetibilidade dos cimentos alcalinamente ativados (CAA) à RAA, analisando diferentes composições químicas e métodos de ensaio para compreender seu comportamento expansivo. Foram realizados ensaios de expansão, variação de massa, microscopia eletrônica (MEV-EDS) e análises químicas, permitindo uma comparação entre os CAA e o CPV. A partir dos resultados obtidos, foram apresenta-se as seguintes considerações finais:

- Os resultados dos ensaios CPT, ACPT, ABCPT e ABMT demonstraram que todas as amostras de CAA apresentaram algum nível de expansão, mas com variabilidade nos métodos de ensaio.
- O ensaio CPT foi o mais confiável para avaliar a expansão de longo prazo, enquanto os ensaios acelerados apresentaram maior dispersão nos resultados.
- No ensaio de longo prazo (CPT), foi observado um efeito de retração antes do desenvolvimento da expansão, indicando que a RAA nos CAA pode estar parcialmente mascarada pela retração autógena. Esse comportamento não foi observado no CPV, reforçando a diferença na interação entre retração e expansão nos dois sistemas.
- Os ensaios acelerados como ABMT e ACPT podem subestimar ou superestimar a expansão real dos CAA, devido às interações químicas específicas desse material.
- O ABCPT foi indicado como uma alternativa mais realista para avaliação da RAA em CAA, pois minimiza os efeitos da lixiviação de álcalis e difusão. A recomendação final do capítulo é que, para avaliação confiável da RAA em CAA, sejam utilizados ensaios de longo prazo combinados com análises químicas detalhadas (MEV-EDS).

- O CPV demonstrou uma relação mais previsível entre expansão e variação de massa, enquanto os CAA tiveram comportamento mais variável, sugerindo a influência de fatores como composição química e retração.
- O estudo mostrou que os CAAs contendo escória pura apresentaram maior tendência expansiva, especialmente nos ensaios acelerados, enquanto os que continham cinza da casca de arroz e caulim apresentaram menor reatividade.
- A análise de MEV-EDS confirmou a presença de géis de RAA nas fissuras, com variações na composição química dos produtos formados. A incorporação de alumínio nos géis RAA em CAA pode alterar seu comportamento, tornando-os menos expansivos em comparação ao CPV.

Diante dessas considerações, os achados deste estudo reforçam a complexidade da RAA nos CAAs. A continuidade de pesquisas na área é essencial para aprimorar os protocolos de ensaio e definir critérios mais específicos para a avaliação da RAA em sistemas cimentícios alternativos.

6 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADOEM CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS COM ABORDAGEM DE EVOLUÇÃO DE DANOS

6.1 INTRODUÇÃO

A crescente busca por alternativas mais sustentáveis na construção civil tem impulsionado o desenvolvimento e a utilização dos Cimentos Álcali-Ativados (CAAs) como substitutos ao cimento Portland convencional. Esses materiais são obtidos a partir da ativação de precursores de aluminossilicato por meio de um ativador alcalino, resultando na formação de um gel cimentante com propriedades similares às do cimento Portland (Duxson et al., 2005; Naqi; Jang, 2019; Zhang et al., 2021). Além de reduzirem significativamente as emissões de CO₂, os CAAs promovem o reaproveitamento de subprodutos industriais, como cinzas volantes, escórias e sílica ativa, contribuindo para a minimização de resíduos sólidos (Adesina; Rodrigue Kaze, 2021; Alomayri; Adesina, 2021; Ismail et al., 2013; Zakka et al., 2020).

Além dos benefícios ambientais, os CAAs apresentam desempenho competitivo em relação ao cimento Portland, especialmente em termos de resistência a condições severas, como ciclos de congelamento e descongelamento, ataques químicos e exposição a sulfatos (Aguirre-Guerrero et al., 2021; Zhang et al., 2021). Esses efeitos positivos são atribuídos à ausência de Portlandita e à formação de uma matriz C-S-H com menor relação Ca/Si, o que confere maior durabilidade e resistência a agentes agressivos(François et al., 2018). Entretanto, a durabilidade dos CAAs ainda é um campo de estudo em evolução, sobretudo no que diz respeito à sua suscetibilidade à RAA (Šimonová et al., 2021).

A RAA é um processo de degradação do concreto causado pela reação entre os álcalis do cimento (Na⁺, K⁺ e OH⁻), agregados contendo sílica reativa e umidade. Essa interação resulta na formação de um gel expansivo que, ao absorver água, gera tensões internas, provocando fissuração progressiva e comprometendo a integridade estrutural do material (Olajide et al., 2024). Devido ao teor elevado de álcalis nos CAAs, há uma preocupação sobre seu potencial de desencadear a RAA (Fernandez-Jimenez et al., 2007). Contudo, a influência de outros fatores, como a natureza química da matriz cimentante e a retração autógena, pode alterar o desenvolvimento da reação. A retração, por exemplo,

pode atenuar a expansão típica da RAA ao induzir tensões opostas, mas a magnitude desse efeito ainda não é completamente compreendida (Ballekere Kumarappa et al., 2018; Li et al., 2019a, 2019b; Najafi Kani et al., 2012).

Nos sistemas cimentícios à base de cimento Portland, a RAA é amplamente estudada utilizando métodos normatizados para sua avaliação, como os ensaios acelerados em barras de argamassa definidos pela ASTM C1260 (norma americana), NBR 15577-4 (2018) e RILEM AAR-2. Também são empregados o ensaio acelerado em prismas de concreto, normatizado pela NBR 15577-7 (2008), e o ensaio de longo prazo em prismas de concreto, normatizado pela ASTM C1293 (norma americana) e NBR 15577-6 (2018). Essas metodologias permitem avaliar a cinética da reação e medir a expansão dos corpos de prova ao longo do tempo, porém não fornem informações detalhadas sobre a degradação microestrutural (Frare et al., 2023).

Para compreender as abordagens utilizadas na avaliação da RAA em CAAs, realizou-se uma busca sistemática nas bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus, empregando os termos "activated alkali cement" e "alkali aggregate reaction". Foram analisados artigos publicados a partir de 2015, com pelo menos duas citações, excluindo-se revisões bibliográficas e duplicatas, totalizando 29 estudos. Os resultados dessa análise encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25: Resumo de principais estudos recentes sobre RAA em CAAs.

Autores	Resistência à compressão	Expansão em argamassa	Expansão em concreto	Variação de massa	FRX	MEV-EDS	DRX	DRI	SDT
Wang et al., (2025)	x	x		x	x	x			
Qian et al., (2024)	x	x				x	x		
Wang et al., (2024)	x	x		x		x	x		
Wang; Noguchi; Maruyama, (2024)		x			x	x			
Lei; Kumar; Yang, (2024)			x		x	x			
Eker; Demir Şahin; Çullu, (2023)		x	x			x			
Yang; Poon; Cui, (2023)			x		x	x			
Yang et al., (2023)									
Gao et al., (2023)		x			x	x			
Ghiasvand et al., (2023)	x	x	x						
Duan et al., (2023)		x			x	x			

Wang; Noguchi; Maruyama, (2022)		x	x		x	x	x		
Yang; Gao, (2022)	x	x			x	x	x		
Moraes et al., (2021)		x	x	x		x			
Khan; Saha; Sarker, (2021)			x			x			
Winnefeld et al., (2020)		x	x	x		x	x		
He et al., (2020)		x				x			
Kalina et al., (2020)		x				x			
Singh; Singh, (2020)		x				x			
Paudel; Yang; Gao, (2020)		x			x	x			
Zhang; He; Poon, (2020)		x				x			
Yang et al., (2020)		x							
Tänzer; Jin; Stephan, (2017)		x				x			
Shi, (2017)		x				x			
Shi, (2015)		x				x			
Krivenko et al., (2014)		x				x	x		
Puertas et al., (2009)		x				x			
Presente Estudo	x	x	x	x		x		x	x

A literatura indica uma variedade de ensaios empregados para investigar a RAA, incluindo medições de variação de massa, expansão em concreto e argamassa, além de análises microestruturais, como a identificação do gel expansivo por MEV-EDS. Apesar da relevância desses métodos, a correlação entre os diferentes ensaios ainda necessita de profundidade, especialmente no que se refere aos CAAs.

A Tabela 25 evidencia que ensaio acelerado em barras de argamassa (AMBT) é largamente adotado em pesquisas sobre a RAA em CAA devido ao seu uso em cimento Portland e à sua rapidez e praticidade. No entanto, suas condições severas de exposição são frequentemente criticadas por comprometerem a confiabilidade dos resultados (Golmakani; Hooton, 2019; Shehata; Thomas, 2002). Estudos indicam que a expansão de CAAs ativados por escórias pode ser inferior à observada em cimentos Portland sob imersão em solução de NaOH, mas que a umidade relativa do ambiente pode alterar os resultados (Shi et al., 2015; Fernández-Jiménez; Puertas, 2002).

Além do AMBT, o método dos prismas de concreto tem sido utilizado para avaliar a RAA em CAAs, tanto por ser normatizado para o cimento Portland quanto por permitir a confirmação dos resultados do AMBT (Mahanama, 2019; Shi, 2015). Estudos envolvendo cimentos Portland frequentemente servem como referência para comparação com CAAs

(Donatello et al., 2014; Angulo-Ramírez et al., 2018), enquanto materiais como cinza volante, metacaulim e vidro moído são analisados devido ao seu potencial de mitigação da reação (Davidovits, 1994, 1999, 2005; Fernández-Jiménez et al., 2007).

Dada a composição química distinta dos CAAs em relação ao cimento Portland, é possível que a RAA nesses materiais apresente mecanismos de deterioração diferenciados (Awoyera et al., 2022). Assim, torna-se essencial adotar métodos que permitam uma caracterização mais detalhada da progressão dos danos. Nesse contexto, os ensaios Damage Rating Index (DRI) e Stiffness Damage Test (SDT) surgem como abordagens inovadoras para análise da deterioração da RAA em CAAs. O DRI quantifica os danos internos com base na contagem de microfissuras e outras alterações microestruturais (Sanchez, 2016a), enquanto o SDT avalia a perda de rigidez mecânica, refletindo o comprometimento estrutural progressivo (Sanchez, 2016b). Apesar desses métodos já terem sido explorados em cimentos Portland, esses ensaios ainda não foram utilizados para CAAs, como evidenciado no levantamento da Tabela 25.

Portanto, este estudo busca preencher essa lacuna, investigando a progressão dos danos causados pela RAA em CAAs por meio da aplicação combinada dos ensaios DRI e SDT. Ao correlacionar os dados obtidos, espera-se fornecer uma compreensão mais precisa dos mecanismos de deterioração desses materiais, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre sua durabilidade e viabilidade como alternativa sustentável na construção civil.

6.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

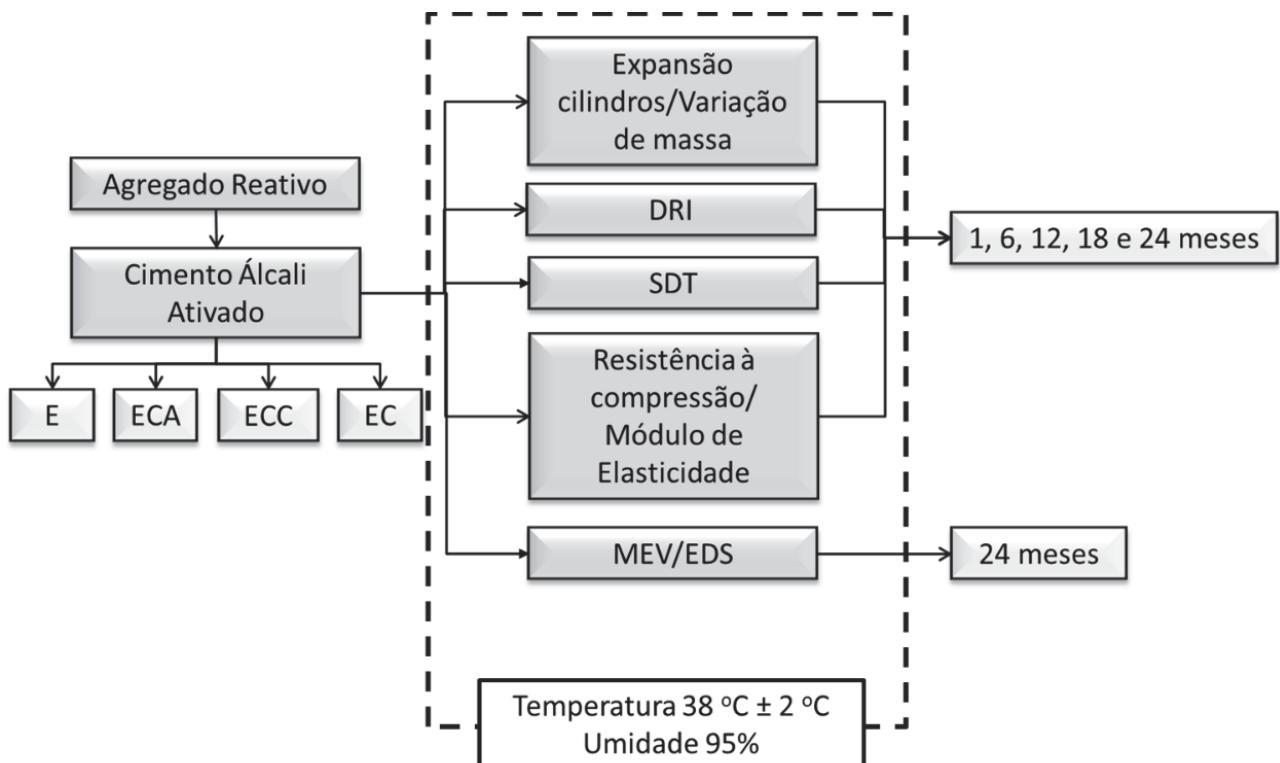
6.2.1 Materiais

Este capítulo dá continuidade à investigação apresentada no Capítulo 5, utilizando os mesmos materiais, traço e procedimentos de dosagem previamente descritos. Dessa forma, as condições de preparo e caracterização dos concretos avaliados permanecem inalteradas, e para evitar redundâncias, optou-se por não repetir detalhadamente as informações, visando à concisão do texto

6.2.2 Métodos

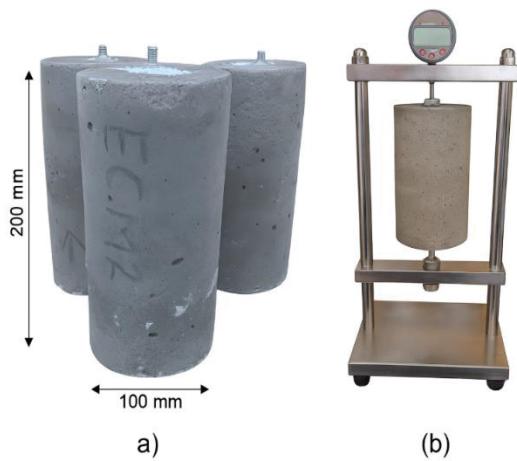
A Figura 74 apresenta o diagrama elaborado com os parâmetros de moldagem e os ensaios realizados. Os corpos de prova foram removidos dos moldes 24 horas após a moldagem, e, em seguida, foi seguido o procedimento de cura para as avaliações.

Figura 74: Esquema de moldagem e avaliação dos corpos de prova



Foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos Ø 10 x 20 cm para cada cimento desenvolvido, a fim de avaliar a expansão e melhorar a comparação entre resultados de expansão e das técnicas de DRI e SDT, devido ao formato do corpo de prova. Desse modo, após a desmoldagem, foram feitos dois furos, um superior e outro inferior, no centro do corpo de prova, com auxílio de uma furadeira e fixando um pino em cada lado com cola epóxi. Os pinos são os mesmos utilizados nos ensaios de expansão de prismas de concreto Figura 75. Os procedimentos de cura e análise de variação dimensional dos mesmos, seguiram-se as descritas para o ensaio de CPT.

Figura 75: a) corpos de prova cilíndricos com pinos, b) dispositivo para medição de expansão



Antes de cada leitura e outros ensaios (18 ± 2 horas antes), os recipientes que continham os corpos de prova eram retirados do ambiente de temperatura controlada para permitir a estabilização da temperatura com o ambiente. Após a conclusão das leituras, todos os corpos de prova de expansão eram devolvidos aos recipientes, com a posição invertida em relação ao armazenamento anterior, e então retornavam às condições de ensaio.

As medições de expansão foram efetuadas durante a exposição em ambiente controlado com 95% de umidade e temperatura de 38°C , uma vez por mês durante todo o período do ensaio. A expansão induzida (Δ_l (%)) foi calculada comparando a medida inicial (l_0), obtida às 24 horas, com a medida ao longo do período de exposição (l_f) sendo determinada pela Equação 8.

$$\Delta_l(\%) = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0 + 285} \right) \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

6.2.2.3 Análise da deterioração dos corpos de prova

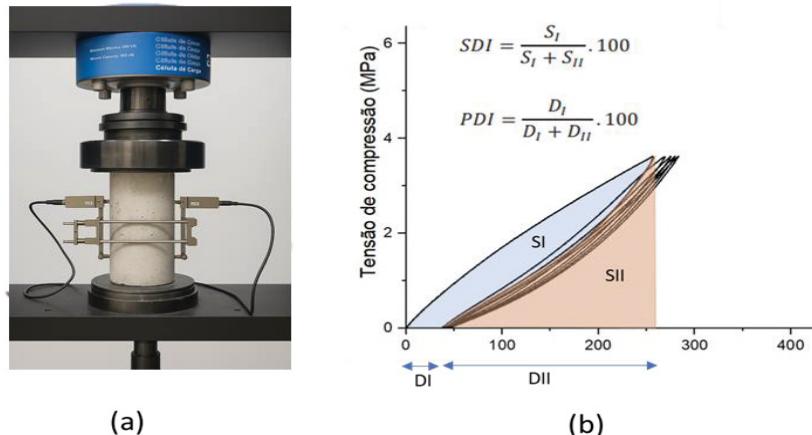
Para avaliar a deterioração dos corpos de prova devido à RAA, foram realizados os ensaios de SDT (Stiffness Damage Test) e DRI (Damage Rating Index). Para o ensaio de SDT, foram preparados 3 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de $\varnothing 10 \times 20$ cm, de

cada tipo de cimento estudado, os quais foram submetidos a um ambiente controlado com 95% de umidade e temperatura de 38°C, para idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.

Para a execução do ensaio, os corpos de prova foram submetidos a 5 ciclos de carga e descarga, com uma taxa de aplicação de 0,10 MPa/s, utilizando uma carga máxima de 40% da resistência à compressão aos 28 dias, conforme as pesquisas de Sanchez et al. (2014, 2015, 2017).

Para avaliar a perda de rigidez do concreto, foi aplicado o SDT em uma amostra de cada idade, conforme os parâmetros definidos por Sanchez et al. (2017). Esses autores indicam que a carga de 40% da resistência à ruptura aos 28 dias, com velocidade de ensaio de 0,10 MPa/s, não altera significativamente as propriedades do concreto (De Souza; Sanchez, 2023a). O ensaio foi conduzido em uma prensa hidráulica (Instron, modelo 23-20), e a deformação específica foi monitorada usando LVDTs fixados nas laterais da amostra, conforme ilustrado na Figura 76a.

Figura 76: a) Ensaio de SDT em antamento, b) Cálculo dos índices SDI e PDI



Durante o processo, foram calculados os índices SDI e PDI, conforme apresentado na Figura 76b. Por ser um teste não destrutivo, após a realização do SDT, os corpos de prova foram rompidos à compressão nas mesmas idades de cura. O SDI representa o grau de perda de rigidez do concreto ao longo dos ciclos de carregamento, sendo calculado com base na relação entre a energia elástica e a energia total aplicada; valores próximos de zero indicam concreto íntegro, enquanto valores elevados sugerem maior deterioração. Já o PDI quantifica a deformação plástica acumulada, ou seja, a parte da deformação que não é recuperada após cada ciclo, sendo que valores baixos indicam comportamento elástico e

valores altos revelam deformações residuais significativas associadas à presença de microfissuras permanentes, típicas da RAA.

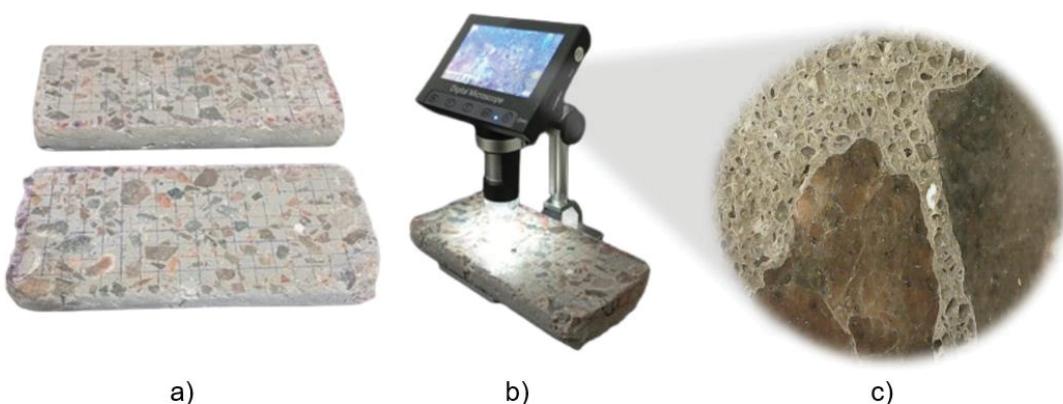
Sanchez et al. (2016a) alertam que a utilização dos valores absolutos da área de histerese e da deformação plástica pode levar a conclusões errôneas, pois esses valores podem variar significativamente dependendo da resistência e da composição do concreto. Dessa forma, os resultados do SDT devem ser analisados de maneira relativa, usando índices que comparam a energia elástica com a energia total, fornecendo uma melhor indicação dos danos gerados em diferentes materiais.

Além disso, o módulo elástico secante foi calculado com base na NBR 8552 (ABNT, 2008), utilizando os dados do segundo e terceiro carregamento, que são considerados os mais confiáveis para avaliação (Sanchez et al., 2014a).

O Índice de Classificação de Danos (DRI) também foi aplicado como uma medida semiquantitativa da extensão dos danos no concreto.

Os corpos de prova foram cortados longitudinalmente em duas metades (Figura 77a) com o auxílio de uma serra para concreto. Cada metade foi polida com uma polidora usando discos de diferentes gramaturas (100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1500, 3000), com o polimento de cada gramatura durando cerca de 5 minutos, sendo a última (30000) realizada por pelo menos 15 minutos para alcançar um acabamento espelhado. Após o polimento, os corpos de prova foram marcados com uma grade de 1 cm por 1 cm, formando cerca de 200 quadrados, que foram identificados por letras nas linhas (A, B, C...) e números nas colunas (1, 2, 3...).

Figura 77: a) corpos de prova cortados ao meio, b) microscópio utilizado no ensaio de DRI, c) amostra visível



A análise foi feita utilizando um microscópio digital (Figura 77b) com ampliação de até 1000x. O microscópio tinha uma câmera integrada para o registro das imagens e a posterior análise. Em cada quadrado (1 x 1 cm), foram observadas, contadas e marcadas as características petrográficas associadas à RAA (Figura 77c). A identificação das características seguiu as metodologias de Villeneuve (2011) e Sanchez et al. (2015), que incluem uma tabela com ponderações para os diferentes tipos de danos (Tabela 26). O valor final obtido foi normalizado para 100 cm², sendo que quanto maior o valor do DRI, maior a deterioração causada pela reação de álcali-sílica.

Tabela 26: Característica de dano e fator empregado para a RAA

Característica	Sigla	Fator de Ponderação
Fissura no agregado graúdo Cracks in coarse aggregate	CCA	0,25
Fissura preenchida por produtos de reação no agregado graúdo Opened cracks in coarse aggregates	OCA	2
Fissura preenchida por produtos de reação no agregado graúdo Crack with reaction product in coarse aggregate	OCAG	2
Partícula de agregado desagregada/corroída Disaggregate/corroded aggregate particle	DAP	2
Descolamento do agregado graúdo (perda de aderência) Coarse aggregate debonded	CAD	3
Fissura na pasta de cimento Cracks in cement paste	CCP	3
Fissura preenchida por produtos de reação na pasta de cimento Cracks with reaction product in cement paste	CCPG	3

Fonte: Adaptado de Sanchez et al., (2005).

O DRI é frequentemente usado em conjunto com o SDT para uma análise multinível, facilitando o diagnóstico da RAA (Hasparyk; Sanchez, 2021). Estudos indicam uma boa correlação entre os parâmetros do SDT, DRI e as medições de expansão (Islam; Ghafoori, 2018; Rivard; Fournier; Ballivy, 2002; Sanchez et al., 2016b, 2014a, 2016a, 2017a). Nesse contexto, Sanchez et al. (2017b) propõem uma análise multiparamétrica para estimar a expansão potencial em estruturas afetadas pela RAA, com base em dados de 20 concretos e 13 agregados reativos, como mostrado na Tabela 27.

Tabela 27: Classificação de dano multiparâmetro baseada nos ensaios SDT e DRI

Grau de dano	Expansão (%)	SDI	DRI (-)
Negligenciável	0,02 ± 0,01	6 a 16	100 a 155
Marginal	0,04 ± 0,01	11 a 25	210 a 400
Moderado	0,11 ± 0,01	15 a 31	330 a 500
Alto	0,20 ± 0,01	19 a 32	500 a 765
Muito alto	0,30 ± 0,01	22 a 36	600 a 925

Fonte: Traduzido de Sanchez et al. (2017b)

Eles explicam que os níveis de expansão não devem ser vistos como limites fixos entre as diferentes classes de danos, mas como referências para comparação, permitindo identificar níveis significativos de deterioração do concreto devido à RAA. Embora os ensaios normatizados que medem a expansão do concreto sejam confiáveis, eles têm longa duração e grande variabilidade. Já os ensaios como a emissão acústica, SDT e DRI se mostram eficazes no diagnóstico complementar da RAA.

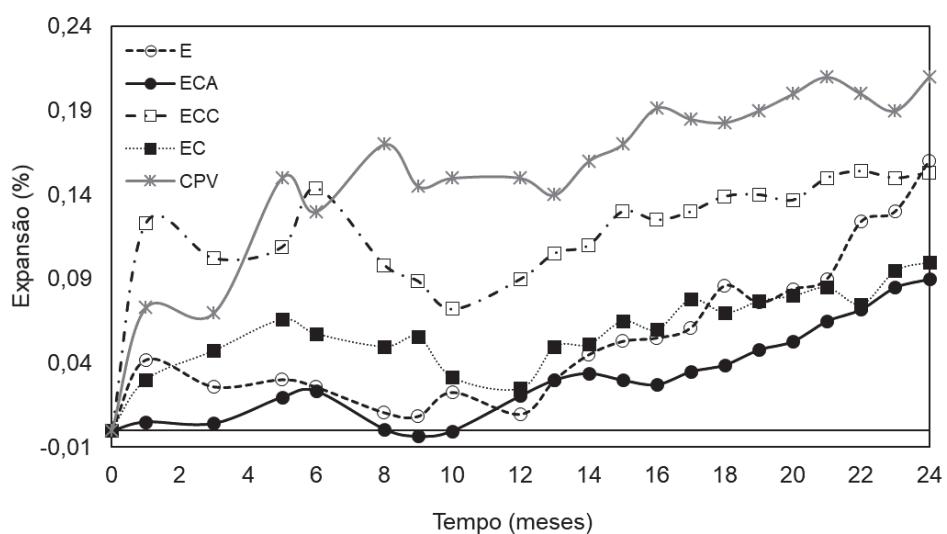
6.2.2.4 Analise de microestrutura

Após 24 meses de acompanhamento da RAA em corpos de prova mantidos a 38 °C ± 2 °C e aproximadamente 95% de umidade relativa, foram realizados ensaios complementares para examinar a presença da reação no concreto. Para isso, as amostras foram analisadas utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Zeiss EVO MA15. As amostras foram primeiramente fraturadas e secas em estufa a 50°C. Depois, os fragmentos foram fixados em suportes metálicos (stubs) com fita dupla face de carbono e revestidos com fita de cobre, o que facilitou a deposição de ouro durante o processo de metalização. Não foram realizados procedimentos de embutimento, polimento ou ataque químico nas amostras. Para investigar a composição química do gel e outros elementos presentes, foi utilizada espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 78 apresenta os valores de expansão para corpos de prova cilíndricos de concretos sujeitos as mesmas condições de exposição que o ensaio CPT NBR 15577-6 (2018), com temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e aproximadamente 95% de umidade relativa, avaliados pelo período de 2 anos. O ensaio foi realizado com corpos de prova cilíndricos, 10x20cm, afim de melhorar a comparação entre a expansão e as técnicas de DRI e SDT.

Figura 78: Expansão em Cimentos Alcalinos Ativados (CAA) e CPV para os corpos de prova cilíndricos

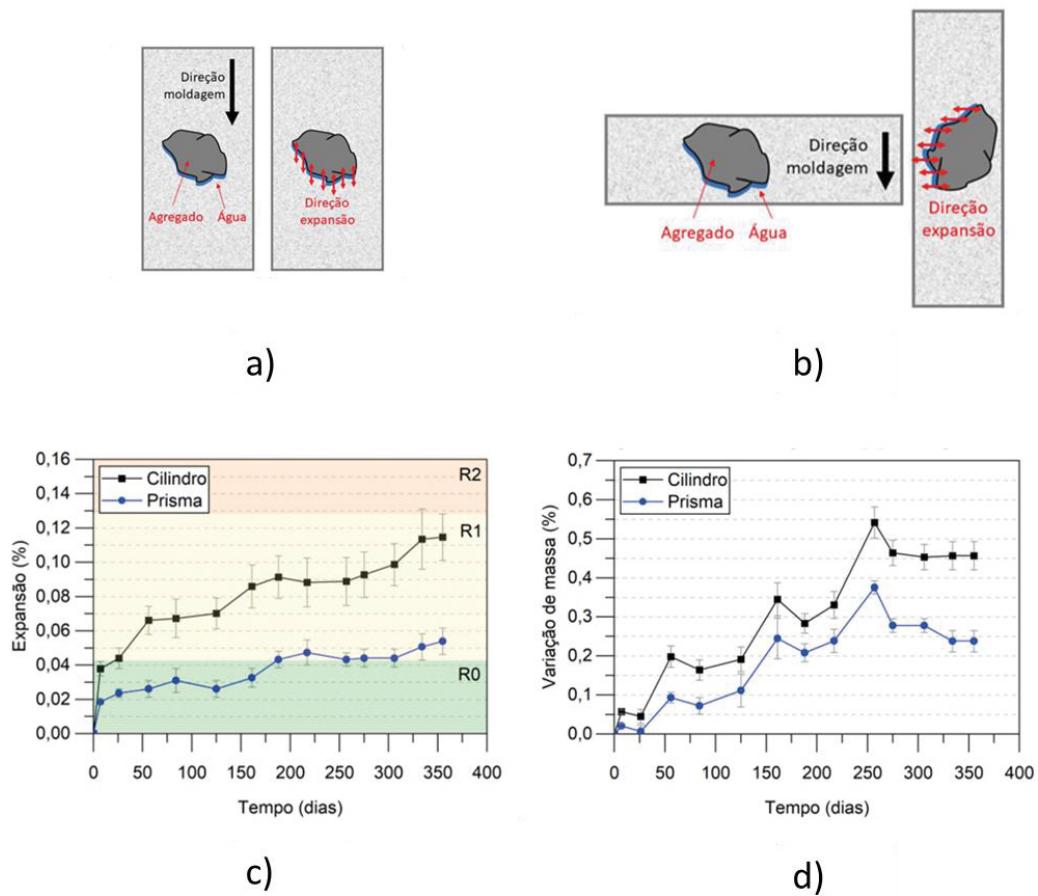


Analisando a expansão em corpos de prova cilíndricos pode-se perceber que a expansão do CP V atingiu em torno de 0,21% ao final de 2 anos de análise. Seguido pelo ECC e E com 0,15%, EC com 0,10% e ECA com 0,09%. Isso corrobora resultados de expansão apresentados no capítulo anterior onde o CAA apresenta menor expansão que o CP V quando submetido a condições de exposição que aceleram o processo de deterioração do concreto por RAA.

As amostras que a presentaram maiores expansões nesse caso foi ECC e E, sendo que as mesmas também obtiveram pior desempenho entre os CAAs no ensaio de ABMT (NBR 15577/2018). Além disso, a série ECC também foi a amostra mais expansiva no ABCPT. Já no ACPT (NBR 15577/2018), EC, ECC e ECA foram as mais expansivas e tiveram desempenho semelhante. No ensaio CPT, todas as amostras de CAA desenvolveram expansões com características parecidas.

Segundo Larive et al., (2000), a fissuração causada pela RAA tende a ocorrer principalmente na direção perpendicular à orientação do lançamento do concreto no molde, em razão do acúmulo de água sob os agregados (Figura 107b). Esse comportamento é influenciado pela anisotropia do concreto, que é gerada durante os processos de moldagem e vibração. Como resultado, observa-se uma diferença nos resultados das amostras prismáticas moldadas na horizontal e das amostras cilíndricas moldadas na vertical. Macioski (2023) ilustra essa diferença na Figura 79, destacando a direção do lançamento e a direção predominante da expansão causada pelo acúmulo de água (Figura 79a e b) e os resultados apresentados comparando os dois métodos de ensaio (Figura 79c e d).

Figura 79: diferença nos resultados das amostras prismáticas moldadas na horizontal e das amostras cilíndricas moldadas na vertical. a) Corpo de prova cilíndrico. b) Corpo de prova prismático. c) Expansões em corpos de prova cilíndricos e prismáticos. d) Variações de massa em corpos de prova cilíndricos e prismáticos.



Fonte: Macioski (2023)

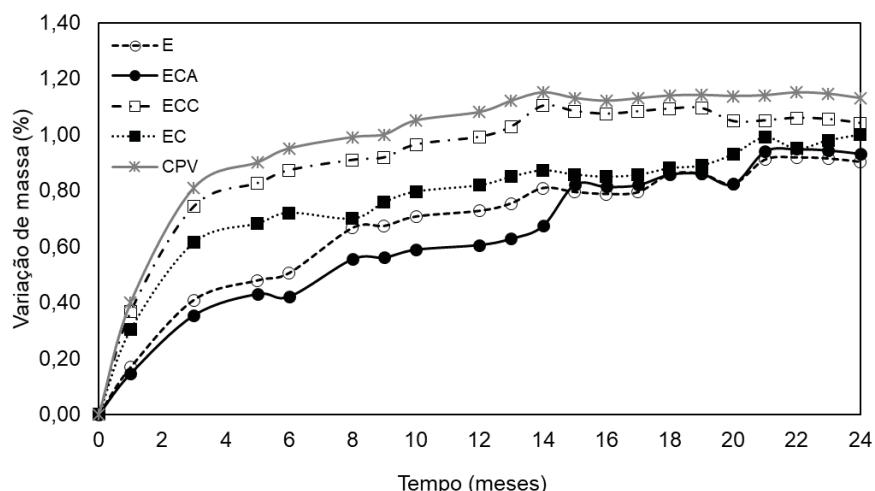
Deve-se notar que as expansões apresentadas nos corpos de prova cilíndricos são maiores do que em corpos de prova prismáticos submetidos as mesmas condições de exposição (Figura 79c). Estudos relacionados a expansão de CAA em concretos já são poucos e baseiam-se em normas e estudos voltados a avaliação de prismas assim como o

CP. Nesse contexto, Diab et al., (2021) em seus estudos voltados ao CP, encontraram diferenças de até 40% na expansão entre prismas e cilindros nos primeiros 90 dias. Sinno, Piersanti, (2019) observaram que cilindros expandem mais que prismas e que os prismas lixiviam mais álcalis, mascarando os resultados. Além de constatar que a lixiviação de álcalis nos prismas pode ser até 41% maior que nos cilindros, influenciando os resultados de expansão, especialmente em concretos com agregados de baixa reatividade, como é o caso desse estudo.

Conforme observado por Macioski (2023) e Langaro (2023), as amostras cilíndricas apresentaram um aumento mais expressivo na variação de massa, indicando uma expansão superior nessa geometria. Esse incremento na massa está diretamente relacionado ao grau de fissuração das amostras, o que facilita a penetração de umidade e sua interação química, resultando na formação do gel RAA. Vale ressaltar que ambos os estudos foram realizados com amostras de concreto contendo agregados da mesma jazida utilizada no presente trabalho, o que reforça a consistência dos resultados.

A Figura 80 apresenta os resultados de variação de massa relacionados aos corpos de prova cilíndricos sujeitos as condições de exposição do ensaio CPT.

Figura 80: Variação de massa dos corpos de prova cilíndricos



No que diz respeito a variação de massa dos corpos de prova cilíndricos, submetidos a deterioração por RAA pode-se notar que todas as amostras analisadas apresentaram um comportamento semelhante, onde o maior ganho de massa foi constatado da idade inicial até os 6 meses de avaliação.

As amostras de CAA apresentaram um ganho de massa inferior ao CP V, além disso ECC foi a que mais apresentou ganho de massa, o que condiz com as maiores expansões desenvolvidas, e podem ser relacionadas com aumento do gel expansivo. Apesar disso, amostras de CAA não apresentaram variação de massa considerável entre si.

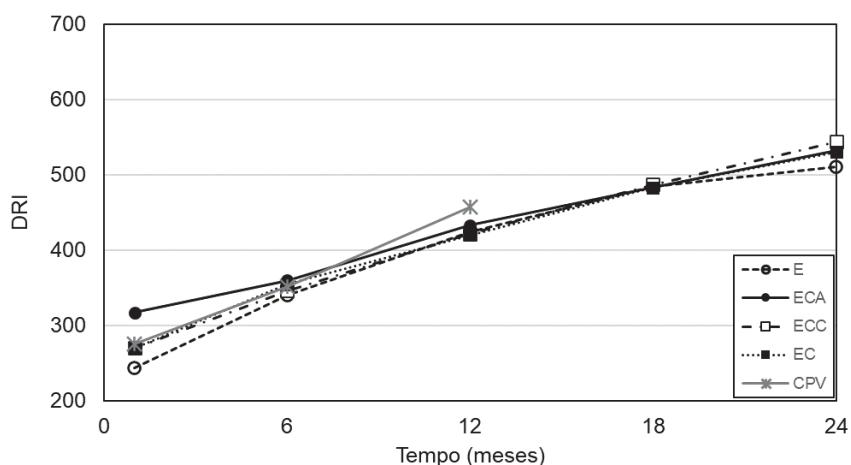
6.3.2 Análise da deterioração do concreto de CAA considerando a evolução de danos

6.3.2.1 Índice de Classificação de Danos (Damage Rating Index) – DRI

A fim de consolidar os resultados já apresentados para a avaliação da expansão de CAA devido a deterioração por RAA, foram realizados os ensaios de avaliação de danos SDT e Índice de Classificação de Danos (DRI), em corpos de prova cilíndricos, sujeitos às condições de exposição de umidade de aproximadamente 95% e temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

A Figura 81 apresenta os resultados de DRI nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses, para concretos com CP V e CAA.

Figura 81: Evolução do DRI ao longo do período de avaliação da RAA em corpos de prova cilíndricos

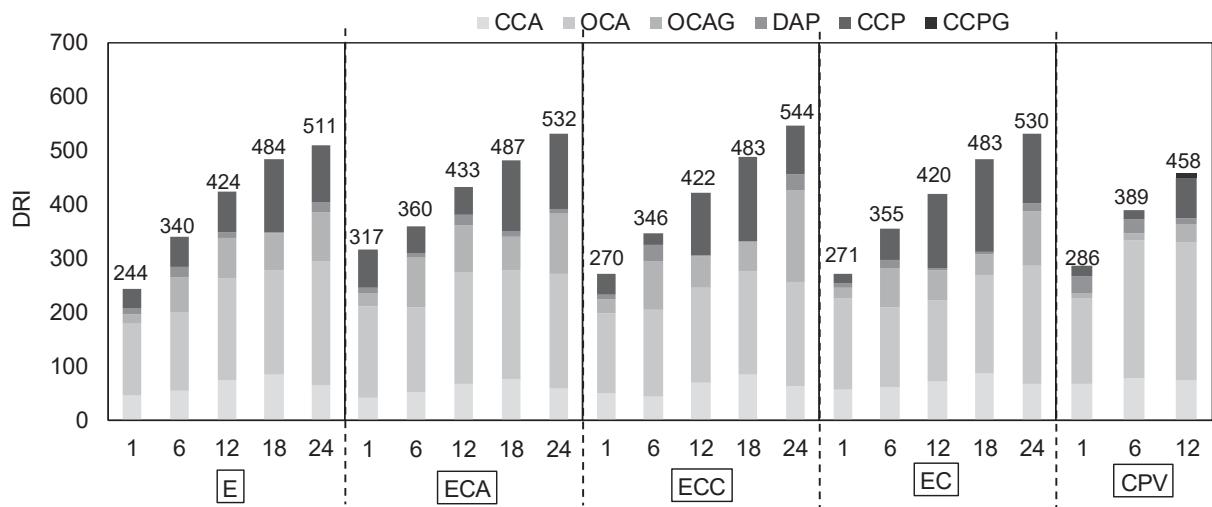


*CPV – Dados colhidos somente até 12 meses, pois foram usados os mesmos corpos de prova de Langaro 2023 para a análise e comparação.

Constatou-se que o valor de DRI para todas as amostras aumentou ao longo do tempo de exposição de forma semelhante e com valores com a mesma ordem de grandeza para cada idade avaliada. Os valores apresentados para o CP V são semelhantes aos das demais amostras de CAA.

A Figura 82 apresenta os dados petrográficos das amostras de CAA e CP V, para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.

Figura 82: Características petrográficas dos concretos de CAA e CPV



CCA – Fissuras fechadas no agregado

OCA – Fissuras abertas no agregado

OCAG – Fissuras abertas no agregado com produto de reação

DAP – Partícula de agregado desagregado/corroída

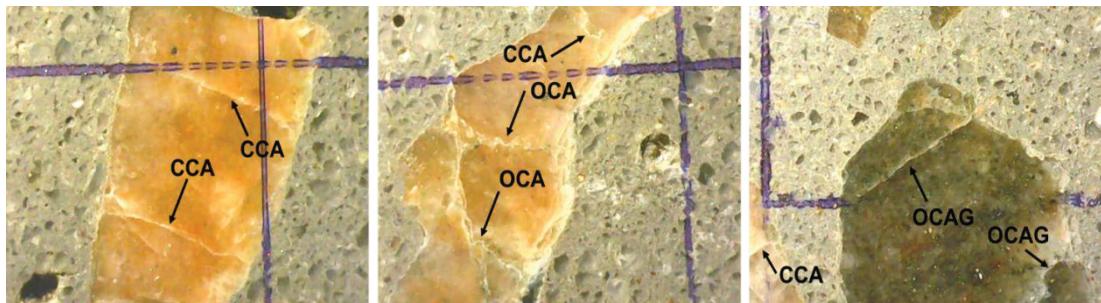
CCP – Fissuras na pasta de cimento

CCPG – Fissuras na pasta de cimento com produto de reação

Os dados apresentados na Figura 82 refletem o comportamento das amostras CAA e CPV ao longo do tempo, com a análise focada nas fissuras observadas nos agregados e na pasta de cimento. Observando o comportamento das amostras, é possível notar que o CAA e o CPV possuem padrões semelhantes nas primeiras idades, presença de fissuras internas nos agregados provavelmente relacionadas a características intrínsecas do próprio agregado e não necessariamente relacionadas ao desenvolvimento da reação deletéria. Considerando a contribuição de cada tipo de fissura na amostra, observa-se que aos 28 dias todas as amostras já apresentam algum grau de fissuração (DRI entre 244 e 317). Este comportamento está relacionado ao uso de rocha metamórfica tipo gnaisse com alto grau de alteração.

A Figura 83 apresenta fissuras internas nos agregados encontradas no primeiro mês de análise para amostras de CAA.

Figura 83: Fissuras observadas nas análises de DRI



CCA – Fissuras fechadas no agregado

OCA – Fissuras abertas no agregado

OCAG – Fissuras abertas no agregado com produto de reação

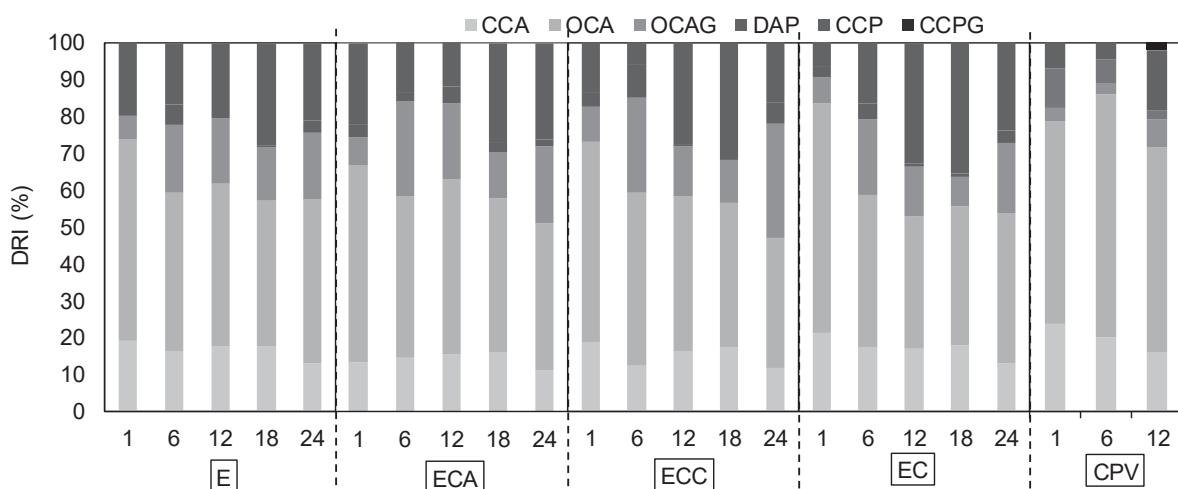
DAP – Partícula de agregado desagregado/corroída

CCP – Fissuras na pasta de cimento

CCPG – Fissuras na pasta de cimento com produto de reação

A Figura 84 apresenta o percentual das características microscópicas encontradas das amostras.

Figura 84: Características microscópicas dos concretos de CAA e CPV



CCA – Fissuras fechadas no agregado

OCA – Fissuras abertas no agregado

OCAG – Fissuras abertas no agregado com produto de reação

DAP – Partícula de agregado desagregado/corroída

CCP – Fissuras na pasta de cimento

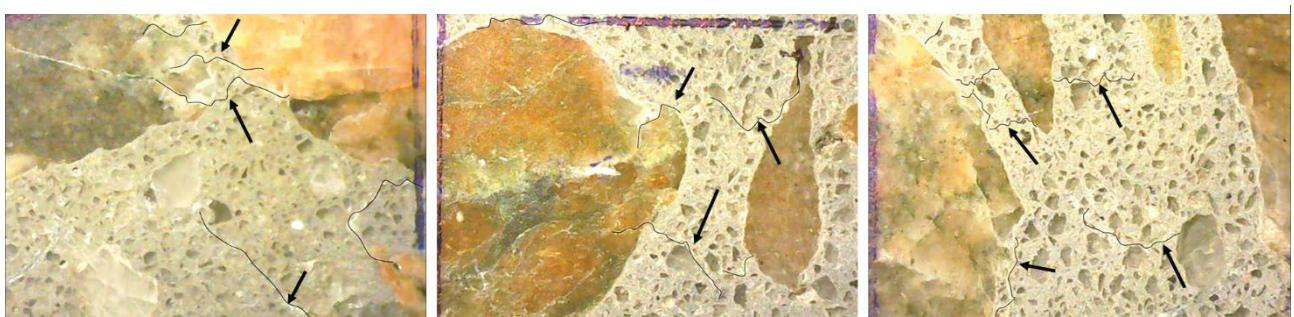
CCPG – Fissuras na pasta de cimento com produto de reação

Pode-se notar de forma geral que a quantidade de fissuras fechadas nos agregados se manteve ao longo do tempo para todas as amostras, ou seja, algumas evoluíram para fissuras abertas e novas fissuras fechadas surgiram. Além disso, a quantidade de fissuras abertas nos agregados evoluiu para fissuras com presença de gel de RAA principalmente a partir de 6 meses de avaliação.

Quanto as fissuras que progrediram para pasta de cimento, observa-se uma manutenção da quantidade na amostra E e uma redução da deterioração em ECA e ECC nos primeiros 12 meses de avaliação. Isso pode estar relacionado com a presença de cinza da casca de arroz na composição do CAA. Comportamento semelhante ao comparado com CP com adição de cinza volante estudado por (Souza, 2022). De Souza; Sanchez; Biparva, 2024), por exemplo, ressaltam que pozolanas como sílica ativa, metacaulim e cinzas (de casca de arroz, volante, etc.) minimizam o desenvolvimento da reação álcali-sílica, resultando em menores deformações. Em alguns casos, substituições elevadas de cimento por pozolanas praticamente impedem a reação – em estudo recente, misturas com 10% de sílica ativa ou 15% de metacaulim nem sequer atingiram 0,05% de expansão durante o ensaio acelerado, um claro indicativo do efeito redutor dessas adições (Souza; Sanchez, 2023).

A Figura 85 apresenta algumas fissuras na pasta observadas durante as análises de DRI.

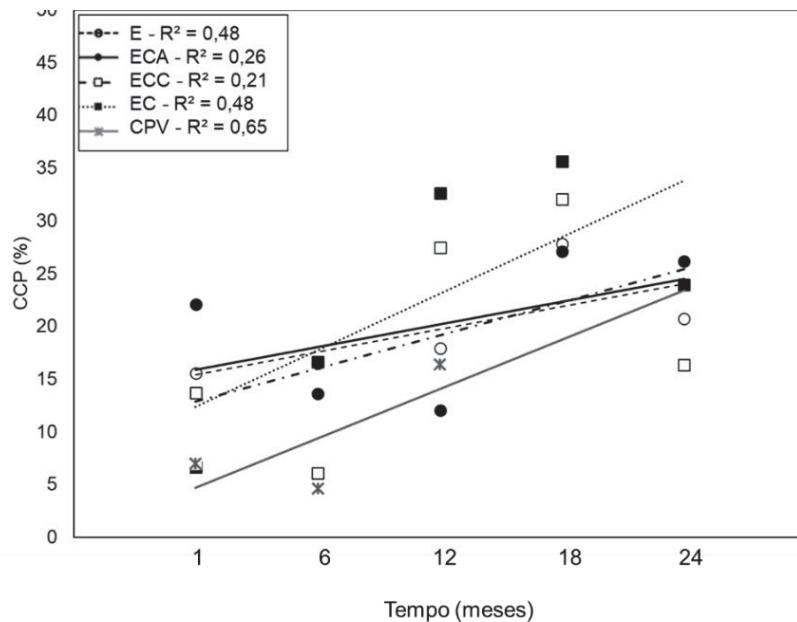
Figura 85: Fissuras presentes na pasta de cimento para concretos feitos com CAA



Para analisar a tendência de progressão das fissuras em direção à pasta de cimento, foi realizado um estudo do percentual de CCP ao longo do tempo para todas as amostras, com a aplicação de um ajuste de regressão linear para verificar a confiabilidade dos dados e a dispersão dos pontos. Essa análise é fundamental para avaliar a evolução das fissuras e entender o comportamento das amostras ao longo do tempo, permitindo identificar

padrões consistentes ou variações inesperadas no processo de deterioração. A Figura 86 ilustra essa tendência de progressão.

Figura 86: Evolução das fissuras na pasta de cimento CPV e CAA



Observou-se que as amostras E, ECA, ECC e EC apresentaram valores de R^2 mais baixos, o que sugere que as tendências de variação do % de CCP ao longo do tempo não seguem uma linha tão consistente quanto o CPV. Embora todas as amostras de CAA mostrem um aumento gradual do percentual de CCP, a variação entre os pontos de dados é mais dispersa. Esse comportamento pode ser atribuído as características químicas dos percurores, que podem interferir na formação e propagação do gel expansivo, retardando a reação e resultando em um comportamento menos previsível.

Em contraste, o CPV exibiu uma tendência linear mais forte (com $R^2 = 0.65$) em comparação com as amostras de CAA. Isso indica que o CPV tem uma resposta mais previsível ao longo do tempo, possivelmente devido à sua maior reatividade em comparação com o CAA. As reações de RAA no CPV tendem a ser mais intensas e consistentes ao longo do tempo, resultando em uma expansão contínua, o que é esperado, já que o CPV não contém materiais que retardam a reação.

Souza e Sanchez (2023), afirma que grande parte das fissuras em agregados, em concretos com CP e adições que mal iniciaram a RAA, originaram-se de causas prévias, como o processamento do agregado. Essas fissuras não progrediram significativamente em termos de RAA, enquanto a expansão permanecia baixa. Nas misturas com pozolanas

mais eficazes, como as que utilizam cinza de casca de arroz (CCA) ou outras adições, a reação foi tão retardada que as fissuras detectadas precocemente estavam associadas a mecanismos não deletérios, como retração autógena na pasta rica em pozolana, sem causar impacto significativo na integridade mecânica. Este comportamento pode explicar o fato de o CAA ter apresentado algumas microfissuras na pasta desde as primeiras idades, provavelmente microfissuras térmicas ou retração, facilitadas por uma matriz mais rígida e menos porosa devido à presença de CCA e C.

À medida que a RAA evoluiu, a partir de 12 meses, observou-se um aumento das fissuras abertas na pasta com gel expansivo, particularmente no CPV. Este, em comparação com as amostras de CAA, apresentou uma quantidade e largura maiores de fissuras preenchidas com gel expansivo. Esse comportamento é esperado, pois o CPV, por não conter materiais que retardam a reação, tem mais álcalis disponíveis para reagir, o que leva a uma reação mais intensa, gerando mais gel higroscópico, que pressiona as fissuras e as amplia.

Os resultados do Índice de Danos (DRI) indicam que o concreto com CPV apresentou maior deterioração, com presença de gel reativo em agregados e na pasta, evidenciando avanço da RAA. Conforme Souza e Sanchez (2023), concretos com cimento Portland mantêm DRI elevado em todas as idades, enquanto substituições por 30% de cinza volante ou 50% de escória reduzem o DRI em mais de 50%, com menor formação de fissuras preenchidas por gel. No CPV, as fissuras com gel de sílica refletem deterioração acelerada; o gel expansivo se propaga pela rede de poros e trincas, aumentando a expansão e o dano estrutural.

Shi et al. (2019) também observaram que 10% de metacaulim diminuiu a expansão e a fissuração, embora o gel de sílica ainda tenha se formado. Adições como metacaulim incorporam alumínio no gel de RAA, formando produtos menos expansivos. No presente estudo o CAA com presença de caulin e o CPV possuem pouca variação nos valores de DRI. Uma possível explicação é que o teor de substituição de escória por caulin não foi suficiente para imobilizar completamente o gel nos agregados ou que as fissuras finas de origem autógena já presentes na pasta serviram de caminho para o gel remanescente. Ao final de 2 ano, tanto o CPV quanto o CAA apresentaram fissuração na pasta, mas por razões distintas: no CPV, as fissuras surgiram tarde, quando a expansão já era

elevada, enquanto no CAA, microfissuras já existentes podem ser percoladas pelo gel, mesmo em menor quantidade, resultando em um aumento do dano visível na pasta.

Isso está em linha com análises microestruturais observados por Langaro (2021) que indicou menor consumo de minerais reativos quando há pozolanas no sistema, desacelerando a dissolução do cristal de sanidina e a consumação de álcalis, o que ajuda a mitigar a reação. Além disso, essas adições melhoram a qualidade da pasta, refinando os poros e continuando a reagir ao longo do tempo, o que pode facilitar alguma autocicatrização de fissuras microscópicas. Souza et al. (2023) observaram que concretos com cinza apresentaram autocicatrização superior ao concreto convencional, devido à continuidade de hidratação/pozolanicidade e à precipitação de produtos nas fissuras.

Embora o efeito de autocicatrização não seja suficiente para barrar uma RAA agressiva, ele pode ajudar a conter a conectividade das fissuras menores, retardando sua coalescência em rede e proporcionando resistência adicional à deterioração precoce. Em aplicações reais, isso se traduz em vida útil extendida e menores riscos de manifestações patológicas por RAA, justificando a adoção de cinzas de casca de arroz, metacaulim e CAA de forma geral como componentes em concretos sujeitos à RAS.

6.3.2.2 Teste de Dano da Rigidez (Stiffness Damage Test) – SDT

Os resultados do SDT mostram uma correlação direta entre os parâmetros de saída do ensaio, como a área de histerese (HA), índice de deformação plástica (PDI), índice de dano da rigidez (SDI) e módulo de elasticidade, e os níveis de expansão do concreto. À medida que a expansão aumenta, os parâmetros de dano também tendem a aumentar, indicando um maior nível de degradação do material (Sanchez, 2014; Sanchez et al., 2015a, 2015b).

O PDI é utilizado para avaliar a evolução da deformação plástica ao longo de ciclos de carga e assim determinar a extensão do dano acumulado em estruturas ao longo do tempo. O SDI é um parâmetro numérico que quantifica o grau de dano interno (microfissuração) em um concreto a partir de um ensaio mecânico, ou seja, o SDI representa a fração da energia mecânica de deformação que é dissipada em forma de dano

(energia perdida devido a fissuras) em relação à energia total introduzida no material durante um ciclo de carregamento (Sanchez, 2014).

As Figura 87, Figura 89, Figura 88 e Figura 90 mostram os resultados da relação tensão x deformação para as amostras E, EC, ECA e ECC, nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses. Pode-se notar que na idade de 12 meses ocorreu algum problema na leitura de dados por parte do extensômetro, o que gerou ruído nas curvas da respectiva idade. Porém, os valores calculados não apresentaram incorrências devido a esse problema.

Figura 87: Tensão-deformação da amostra E para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.

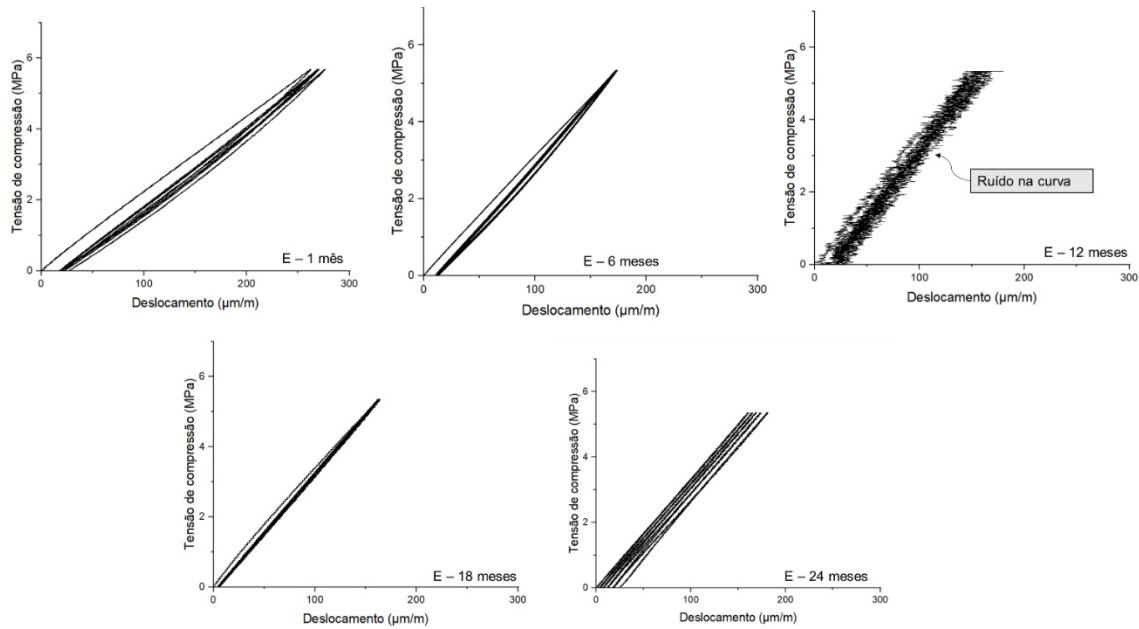


Figura 89: Tensão-deformação da amostra ECA para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.

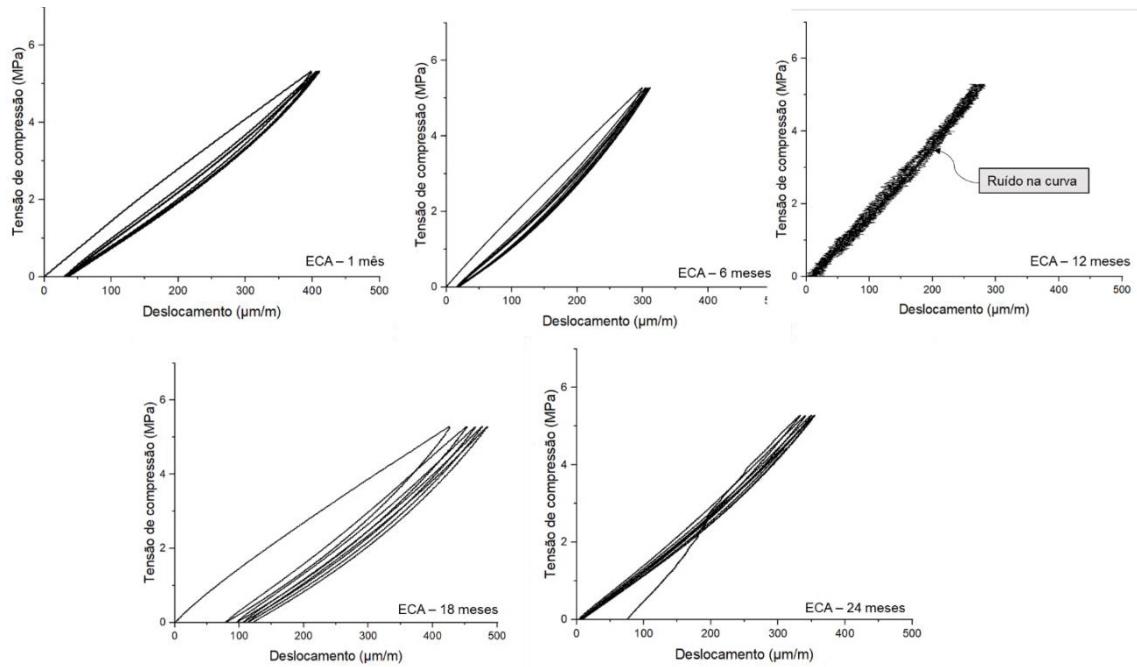


Figura 88: Tensão-deformação da amostra EC para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.

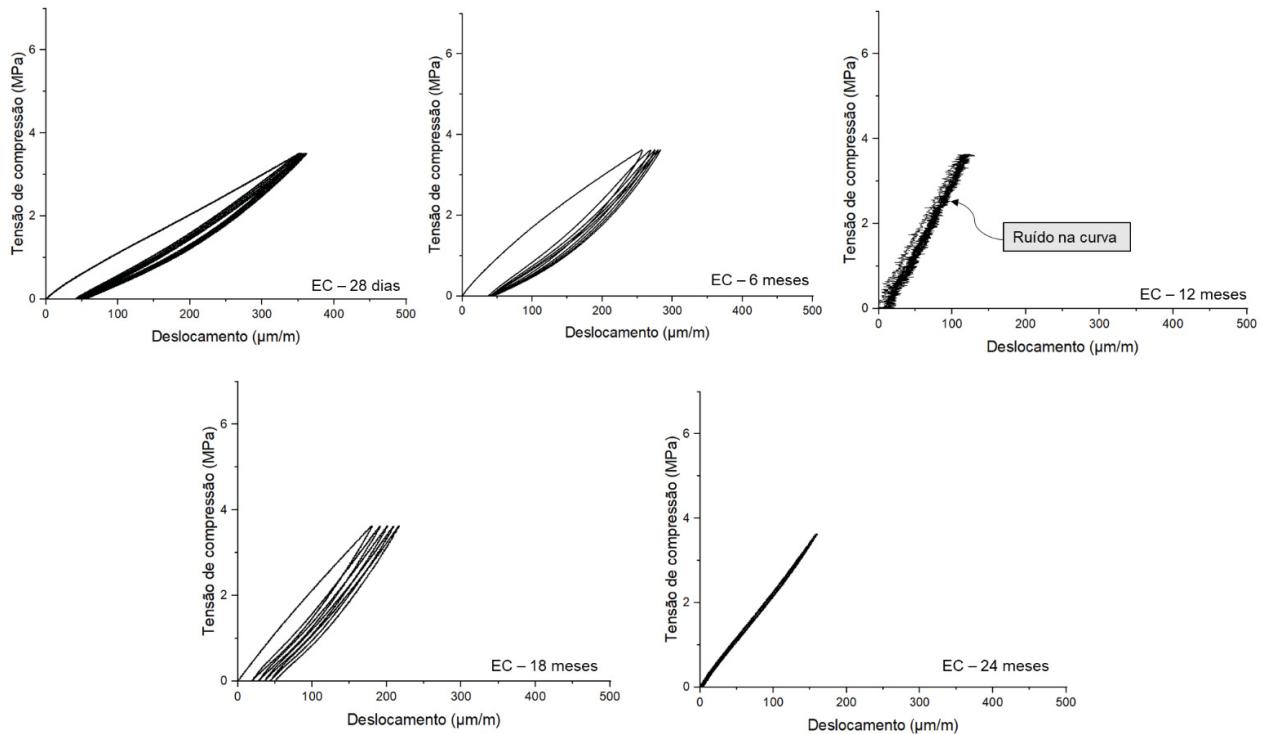
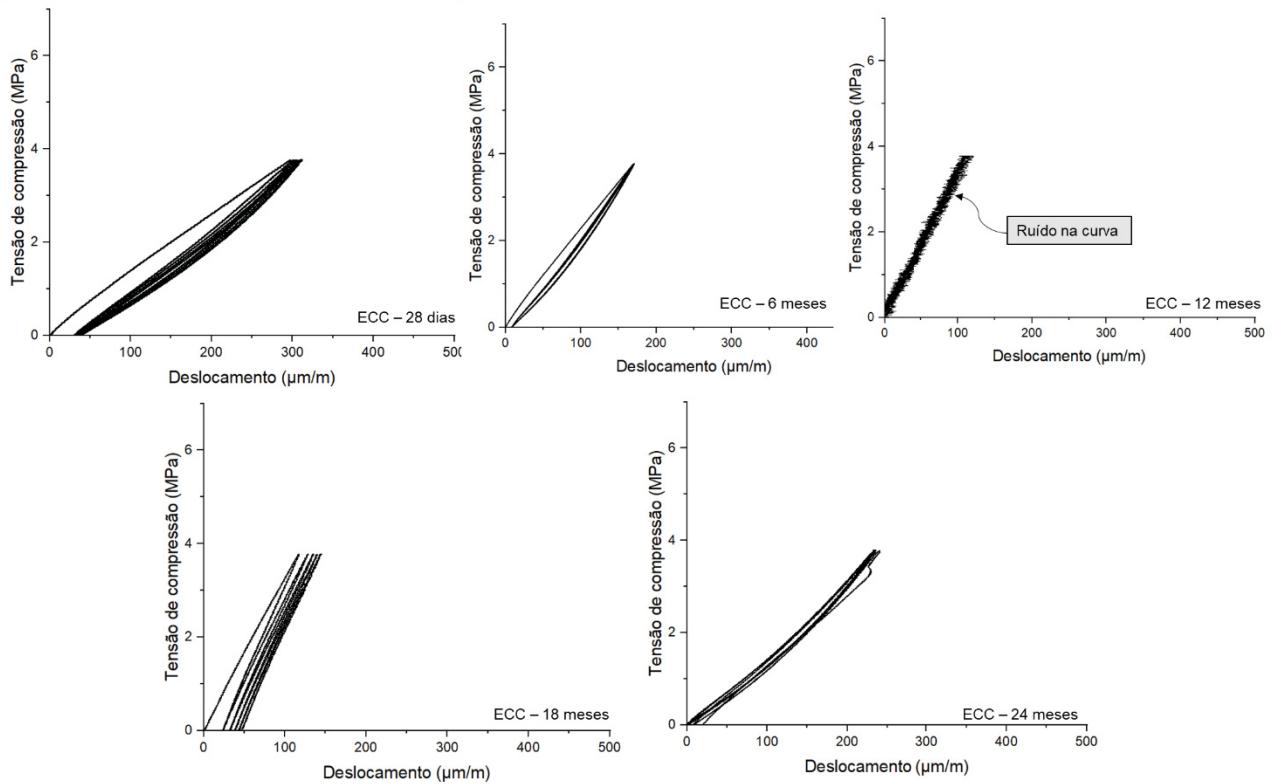


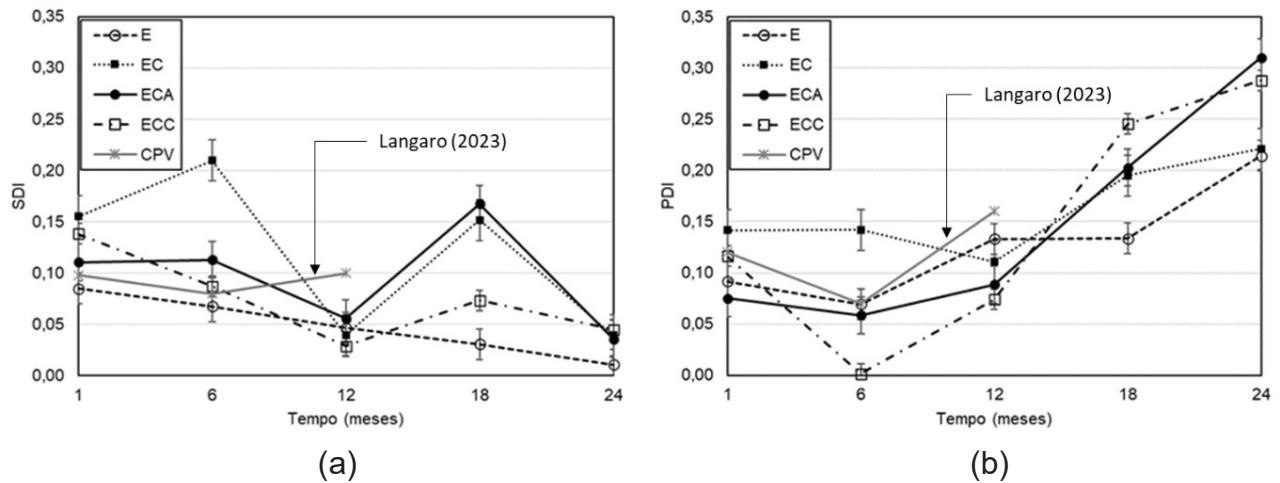
Figura 90: Tensão-deformação da amostra ECC para as idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.



As curvas de tensão versus deformação obtidas nos ensaios de SDT ilustram o comportamento mecânico dos concretos submetidos a ciclos sucessivos de carga e descarga (Figura 87, 88, 89 e 90). À medida que o tempo de cura avança ou conforme os efeitos da RAA se intensificam, as curvas tendem a apresentar alargamento nos ciclos, indicando aumento da histerese e maior dissipação de energia, o que reflete a presença de danos internos. Esses aspectos visuais reforçam a necessidade de quantificar os danos por meio de índices normalizados, como o SDI e o PDI, apresentados a seguir, os quais permitem uma análise comparativa mais objetiva e sensível entre os diferentes tipos de cimento e idades avaliadas.

A Figura 91 mostra os resultados de SDT com os parâmetros de (a) SDI e (b) PDI, para os CAA e para o CPV.

Figura 91: Índices SDI e PDI obtidos a partir do ensaio de SDT



* Dados de CPV gerados por Langaro (2023), com o mesmo agregado reativo plotados no gráfico a título de comparação.

As amostras de CAA mostram uma tendência de redução do SDI ao longo do tempo, indicando que o concreto se torna mais resiliente com o envelhecimento. As amostras de E (cinza de casca de arroz), EC (caulim), ECA (cinza de casca de arroz) e ECC (escória) apresentam uma diminuição no SDI, embora de forma variada. O CPV, por outro lado, exibe uma resposta mais consistente e previsível, com valores de SDI mais baixos e uma dissipação de energia mais constante devido à maior reatividade da RAA. O comportamento do CPV sugere reações mais intensas, mas com menor variação no SDI ao longo do tempo.

A retração plástica do CAA também pode influenciar os dados de SDI (Índice de Dano da Rigidez). O SDI, que mede a dissipação de energia associada ao dano estrutural, diminui ao longo do tempo nas amostras de CAA, indicando que o material se torna mais resiliente à medida que as fissuras se estabilizam. Isso sugere que o concreto de CAA está se tornando menos suscetível ao dano estrutural ao longo do tempo, provavelmente devido à estabilização do gel expansivo da RAA e à compensação da retração plástica. No entanto, a redução do SDI também pode refletir que, apesar de o concreto se estabilizar, as fissuras iniciais causadas pela retração plástica ainda afetam a resposta do concreto em termos de deformação e dissipação de energia.

Em relação ao CPV, Souza et al. (2023), e Souza; Antunes; Sanchez, (2022) afirmam que a expansão acelerada de concretos não-pozolânicos pode resultar em uma maior deterioração devido ao aumento da pressão interna nas fissuras, preenchidas com gel

expansivo. O comportamento do CPV no presente estudo está alinhado com essa descrição, pois as fissuras na pasta de cimento, causadas pela reação de RAA, se intensificam ao longo do tempo, resultando em um aumento das expansões e um aumento da dissipação de energia (SDI) (Langaro, 2023; Macioski, 2023).

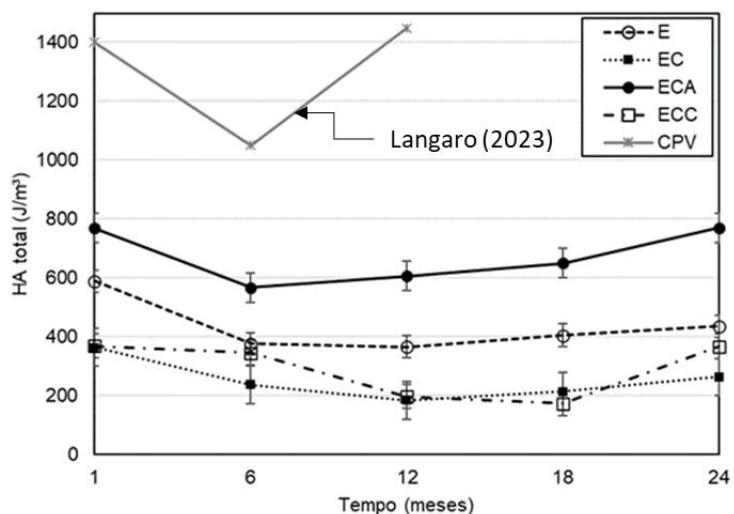
A análise do PDI mostrou que a amostra ECA teve o maior valor ao final de 24 meses (0,31), indicando maior deterioração e suscetibilidade à deformação plástica, especialmente entre 18 e 24 meses. A amostra EC teve os maiores PDIs nos primeiros meses (1 e 6), mas foi superada pela ECA com o tempo. Já a ECC começou com um PDI muito baixo (0,001 aos 6 meses), mas teve um aumento expressivo, atingindo 0,288 aos 24 meses, o que também indica deterioração progressiva.

Todas as amostras de CAA, apresentaram um aumento na deformação plástica ao longo do tempo, como evidenciado pelos valores de PDI. No entanto, esse aumento nas fissuras observadas não é exclusivamente atribuível à RAA, mas também à retração plástica que ocorre durante o processo de cura do CAA. A retração plástica é um fenômeno comum em concretos, especialmente em materiais com baixa porosidade ou matriz mais rígida, como o CAA, onde a perda de água durante o processo de cura causa uma diminuição de volume e, consequentemente, a formação de fissuras na pasta de cimento. O aumento gradual do PDI nas amostras de CAA reflete a progressão das fissuras, que se tornam mais evidentes ao longo do tempo, à medida que o gel expansivo da RAA vai se acumulando, agravando a deterioração estrutural.

Por outro lado, o Cimento Portland Comercial (CPV) mostrou um comportamento diferente, com fissuras com gel expansivo mais evidentes a partir dos 12 meses. Isso é esperado, pois o CPV, ao contrário das amostras de CAA, não contém adições pozolânicos que retardam a formação de gel expansivo. Assim, o CPV apresenta reações de RAA mais intensas, o que leva à expansão do concreto e à propagação das fissuras, especialmente após o 12º mês, quando o gel de sílica preenche as fissuras, gerando pressão interna e aumentando a deformação plástica.

A Figura 92 mostra os resultados da área de histerese total (J/m^3), para os CAA e para o CPV.

Figura 92: Área de histerese para as amostras E, EC, ECA, ECC e CPV nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.



* Dados de CPV gerados por Langaro (2023), com o mesmo agregado reativo plotados no gráfico a título de comparação.

A análise das áreas de histerese total das amostras de CAA mostrou padrões semelhantes entre si. Todas apresentaram uma maior área de histerese no primeiro mês, seguida por uma redução até o décimo segundo mês e um aumento gradual até o final do período de 24 meses. Esse comportamento sugere uma maior vulnerabilidade à deterioração por RAA a partir dos 12 meses. No entanto, em todas as idades avaliadas, as amostras de CAA apresentaram áreas de histerese menores que o CP V.

A amostra ECA apresentou a maior área de histerese em todos os intervalos de tempo observados, com destaque para o primeiro mês ($768,09 \text{ J/m}^3$) e para o último período avaliado ($769,64 \text{ J/m}^3$), sugerindo uma propensão maior a RAA. A amostra E foi a que demonstrou redução inicial mais expressiva, passando de $589,14 \text{ J/m}^3$ no primeiro mês para $375,66 \text{ J/m}^3$ aos seis meses. Posteriormente, observou-se um aumento gradual, atingindo $435,18 \text{ J/m}^3$ aos 24 meses.

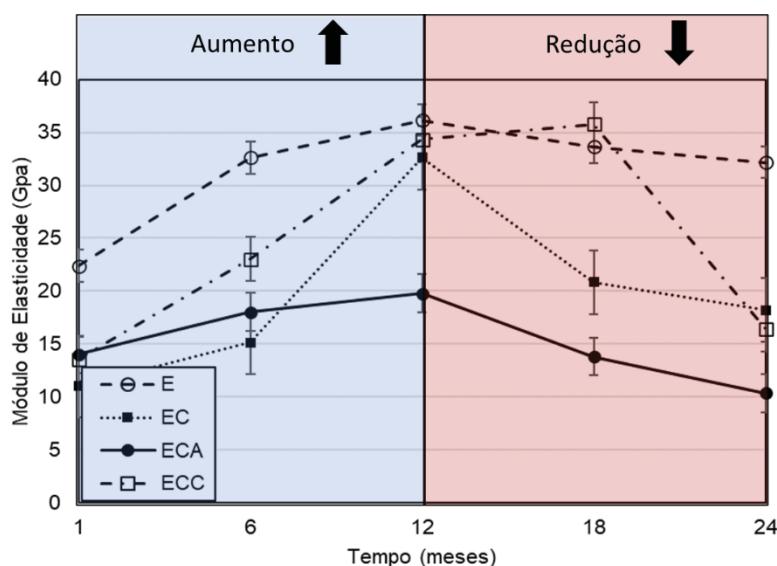
EC apresentou consistentemente a menor área de histerese entre todas as amostras, com uma queda significativa entre o primeiro e o décimo segundo mês, de $363,04 \text{ J/m}^3$ para $184,25 \text{ J/m}^3$, seguida por um leve aumento para $262,87 \text{ J/m}^3$ aos 24 meses. Sugerindo uma maior resistência inicial à deterioração. Contudo, a queda acentuada nos primeiros meses também pode indicar um período de fragilidade.

Em relação à ECC, verificou-se uma redução inicial seguida por um aumento ao longo do tempo, alcançando valores que permanecem inferiores aos da amostra ECA e CP V, assim como as demais amostras.

Além disso, a análise da área de histerese revela que a menor área observada em EC e ECC pode indicar uma capacidade limitada de dissipação de energia durante a deformação, sugerindo que, embora as amostras apresentem maior deformação plástica, sua elevada rigidez estrutural pode comprometer a capacidade da matriz em redistribuir tensões, tornando a resposta global do material mais suscetível à fissuração progressiva frente às tensões impostas pela RAA.

A Figura 93 mostra os resultados do módulo de elasticidade para as amostras E, EC, ECA e ECC nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.

Figura 93: Módulo de elasticidade para as amostras E, EC, ECA, ECC e CPV nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.



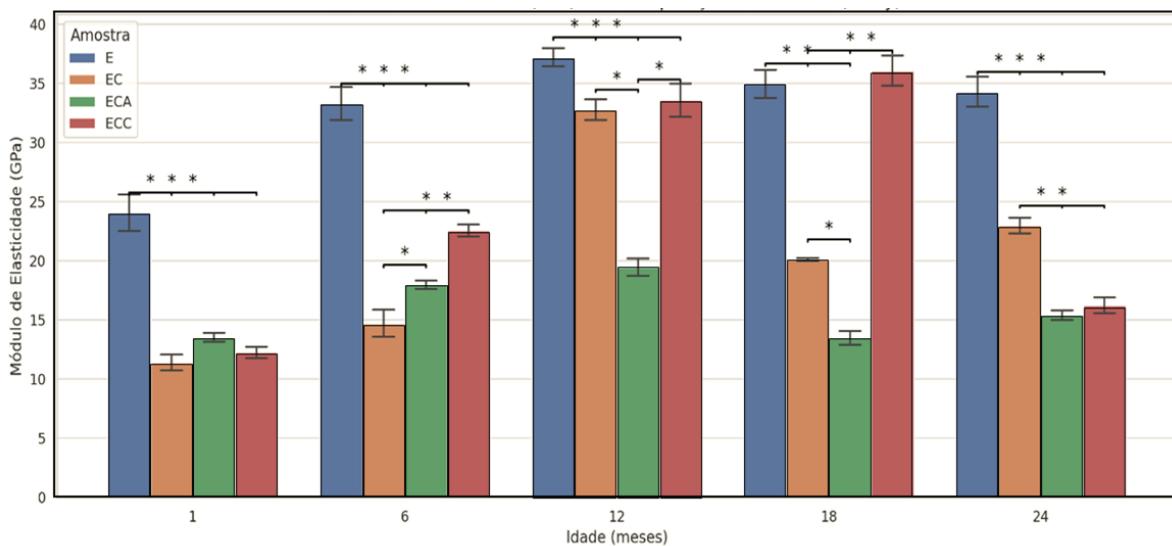
A análise dos dados de módulo de elasticidade e resistência à compressão das amostras de CAA ao longo do tempo revelou um aumento nas propriedades mecânicas até os 12 meses, seguido por uma queda acentuada após esse período.

A amostra E teve um aumento de 60,67% de 1 a 12 meses, alcançando 36,28 GPa, seguido por uma diminuição de 5,93% de 12 a 24 meses, caindo para 34,13 GPa. A amostra EC mostrou um aumento de 192,49% de 1 a 12 meses, alcançando 33,11 GPa, mas uma

redução de 29,63% de 12 a 24 meses, caindo para 23,30 GPa. A amostra ECA apresentou um aumento de 39,42% de 1 a 12 meses, passando de 14,18 GPa para 19,77 GPa, e uma redução de 22,21% de 12 a 24 meses, caindo para 15,38 GPa. Por fim, a amostra ECC teve um aumento de 148,55% de 1 a 12 meses, de 13,82 GPa para 34,35 GPa, e uma queda de 52,63% de 12 a 24 meses, caindo para 16,27 GPa. A combinação de caulim e cinza de casca de arroz ajudou no aumento da resistência nas primeiras idades, mas a RAA comprometeu a estrutura a partir dos 12 meses.

O Figura 94 apresenta os valores médios do módulo de elasticidade para as amostras de cimento álcali ativado ao longo das idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses. As barras de erro representam os desvios padrão estimados para cada amostra. Para cada idade, foi aplicada uma análise de variância (ANOVA) com o objetivo de verificar se há diferença estatisticamente significativa entre os valores médios das amostras naquele tempo de cura. Quando a ANOVA indicou diferença significativa (nível de significância de 5%), aplicou-se o teste de Tukey para identificar quais pares de amostras apresentaram diferença estatística. As comparações com $p < 0,05$ estão indicadas no gráfico por asteriscos (*), posicionados sobre linhas que conectam os grupos que diferiram entre si.

Figura 94: Valores médios do módulo de elasticidade para as amostras de cimento álcali ativado ao longo das idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses, desvio padrão e análise estatística.

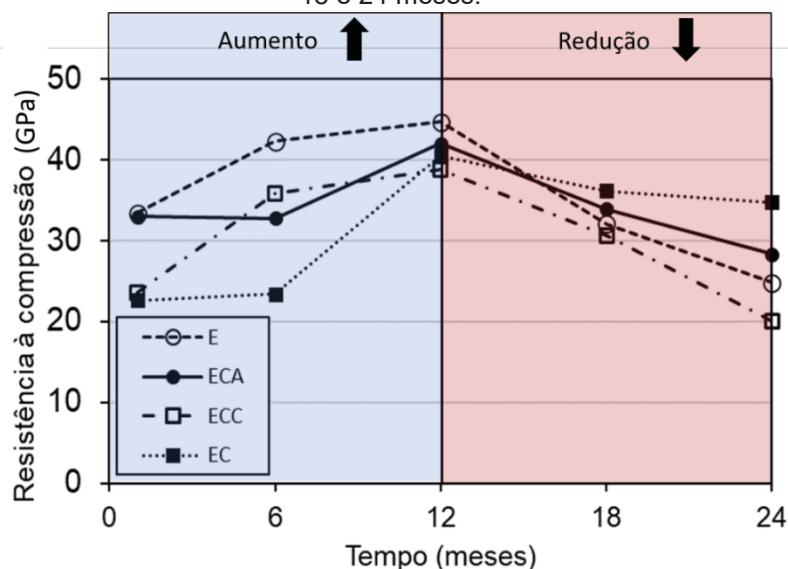


A análise estatística revelou diferenças significativas entre as amostras em todas as idades. Aos 1 e 6 meses, a amostra E apresentou módulo de elasticidade significativamente superior às demais, com valores 108,7% maiores que EC, 77,8% maiores que ECA e 81,8% superiores ao traço ECC ao primeiro mês; e 115,6% maiores que EC e 86,5% superiores a

ECA aos 6 meses. Aos 12 meses, embora ECC tenha apresentado valores ligeiramente superiores a EC, essa diferença foi de apenas 3,6%, sem significância estatística. Aos 18 meses, os valores médios de E foram 7,6% inferiores a ECC, o que reforça a equivalência estatística observada entre os dois traços. Já aos 24 meses, a amostra E voltou a se destacar, com valores 109,2% maiores que ECC, 47% superiores a EC e 118,6% maiores que ECA, reafirmando seu desempenho estrutural superior ao longo do tempo.

A Figura 95 apresenta os resultados de resistência à compressão para as amostras E, EC, ECA e ECC nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.

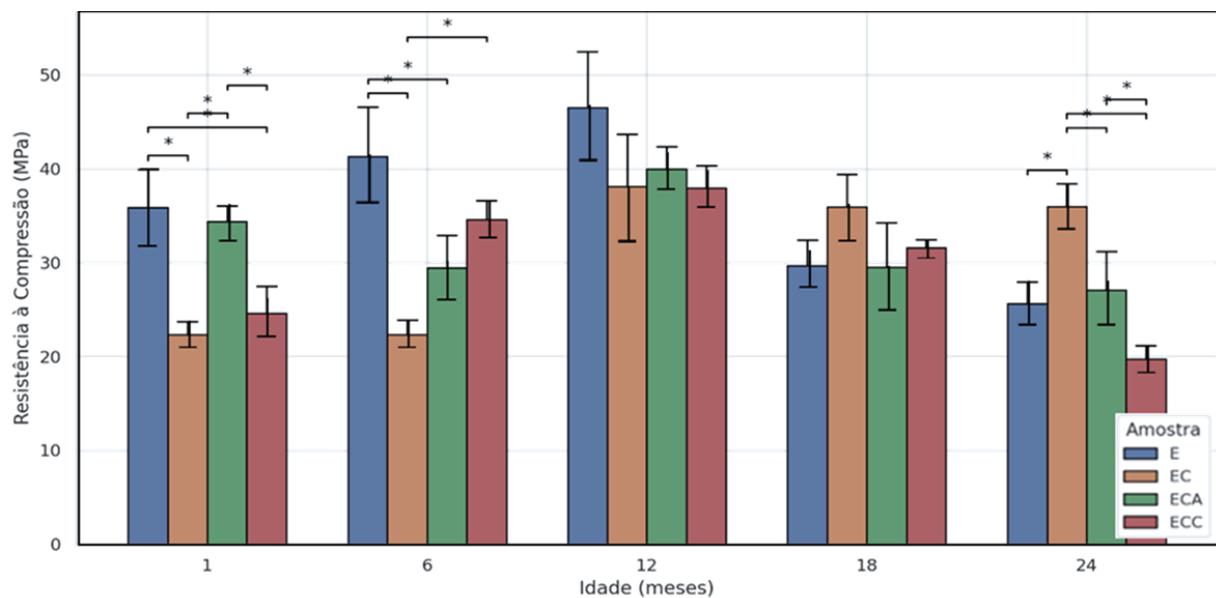
Figura 95: Resistência à compressão para as amostras E, EC, ECA e ECC nas idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses.



As amostras de CAA apresentaram variações na resistência à compressão ao longo do tempo. A amostra E, 44,6 MPa aos 12 meses, teve um aumento de 33,63% nesse período, seguido por uma diminuição de 44,51% de 12 a 24 meses, alcançando 25 MPa, sugerindo que a RAA contribuiu para a perda de resistência após 12 meses. A amostra EC mostrou um aumento de 79,09% até 12 meses, saindo de 22,6 MPa para 40,51 MPa e uma diminuição de 14,24% após, chegando à 34,74 MPa, indicando que o caulim ajudou a moderar a progressão da RAA. A ECA e ECC apresentaram comportamento semelhante às demais amostras, com um aumento de resistência à compressão de 27,36% e 64,31% nos primeiros 12 meses de avaliação, respectivamente e posteriormente uma diminuição de resistência de 32,60% e 64,31%. De forma geral todas as amostras apresentaram um aumento na resistência até 12 meses, seguido por uma queda acentuada nos últimos 12 meses. Essa deterioração pode estar relacionada ao início de reações deletérias que afetam a integridade do concreto.

O Figura 96 apresenta os valores médios de resistência à compressão para as amostras de cimento álcali ativado ao longo das idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses. Para verificar se as diferenças observadas entre as amostras eram estatisticamente significativas, foi aplicada ANOVA de uma via seguida do teste de Tukey ($\alpha = 5\%$) para verificar diferenças estatísticas na resistência à compressão entre os traços E, EC, ECA e ECC em cada idade de cura (1, 6, 12, 18 e 24 meses).

Figura 96: Valores médios de resistência à compressão para as amostras de cimento álcali ativado ao longo das idades de 1, 6, 12, 18 e 24 meses, desvio padrão e análise estatística.



Aos 1 e 6 meses, foram observadas diferenças estatísticas relevantes. A amostra E apresentou resistência significativamente superior às demais, com destaque para as comparações com EC (diferença de 47,6% ao primeiro mês e 81,0% aos 6 meses) e ECC (diferença de 41,6% ao primeiro mês). A amostra EC também apresentou resistência inferior à ECA ao primeiro mês (com 45,8% de diferença), e manteve desempenho inferior em relação a ECA e ECC aos 6 meses.

Aos 12 e 18 meses, não foram observadas diferenças estatísticas entre os traços, indicando comportamento mecânico semelhante e possível estabilização das propriedades entre os materiais.

Esses resultados sugerem que, nas idades iniciais (1 e 6 meses), os traços contendo adições pozolânicas, como a cinza de casca de arroz e o caulim, apresentaram desempenho superior em termos de resistência à compressão, com diferenças estatísticas significativas entre as amostras. Aos 12 e 18 meses, o comportamento entre os traços foi

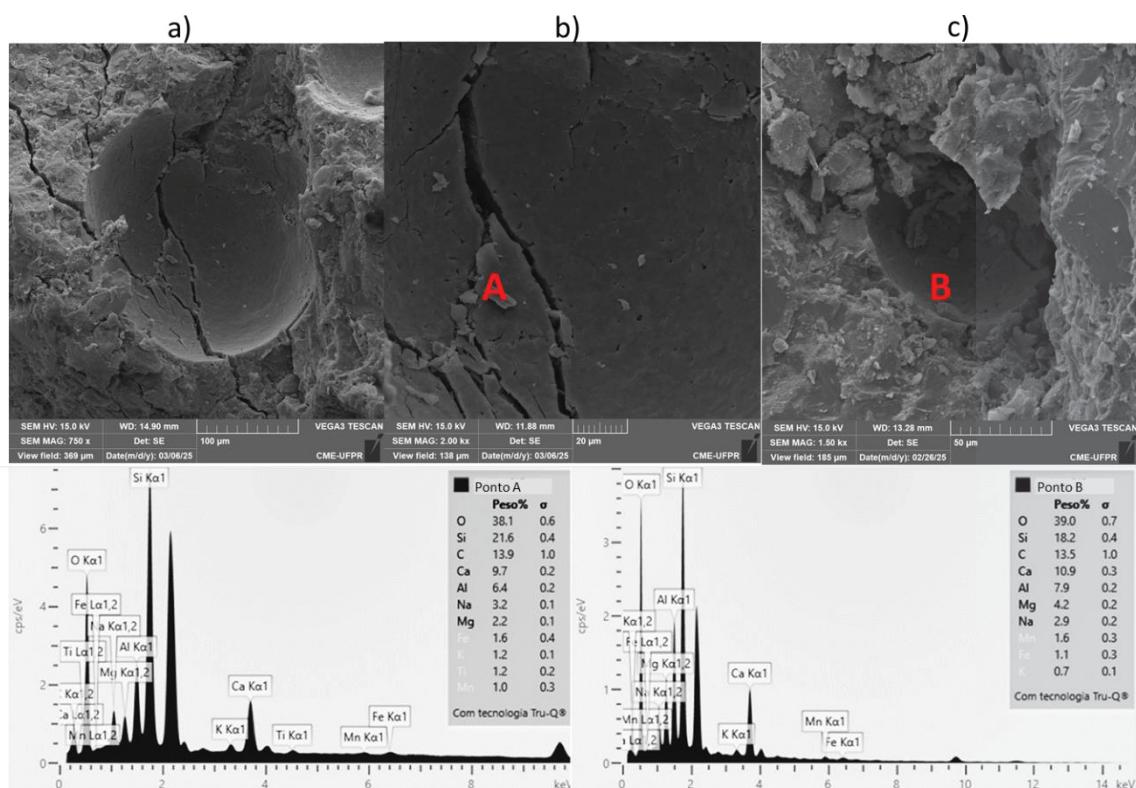
estatisticamente semelhante, indicando possível estabilização microestrutural. Já aos 24 meses, observou-se uma queda significativa na resistência do traço ECC, enquanto o traço EC se destacou positivamente, sugerindo que a progressão da reação de RAA afetou os traços de forma diferenciada ao longo do tempo.

6.3.2.3 Microscopia de varredura eletrônica (MEV)

Para entender melhor a formação do gel de RAA e os processos de deterioração do concreto sob a ação da reação álcali-agregado (RAA), foi realizada a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura com Dispersão de Energia (MEV-EDS).

A Figura 97 apresenta as imagens de MEV para o concreto feito com CAA sujeito a RAA aos 24 meses de idade à $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade de 95%.

Figura 97: Microscopia de varredura eletrônica em concreto de cimento Portland sujeito a RAA, aos 12 meses de idade à 38°C e umidade de 95%. a) Poro no concreto, b) Poro preenchido por gel de RAA na amostra EC, c) Poro encontrado na amostra ECA.



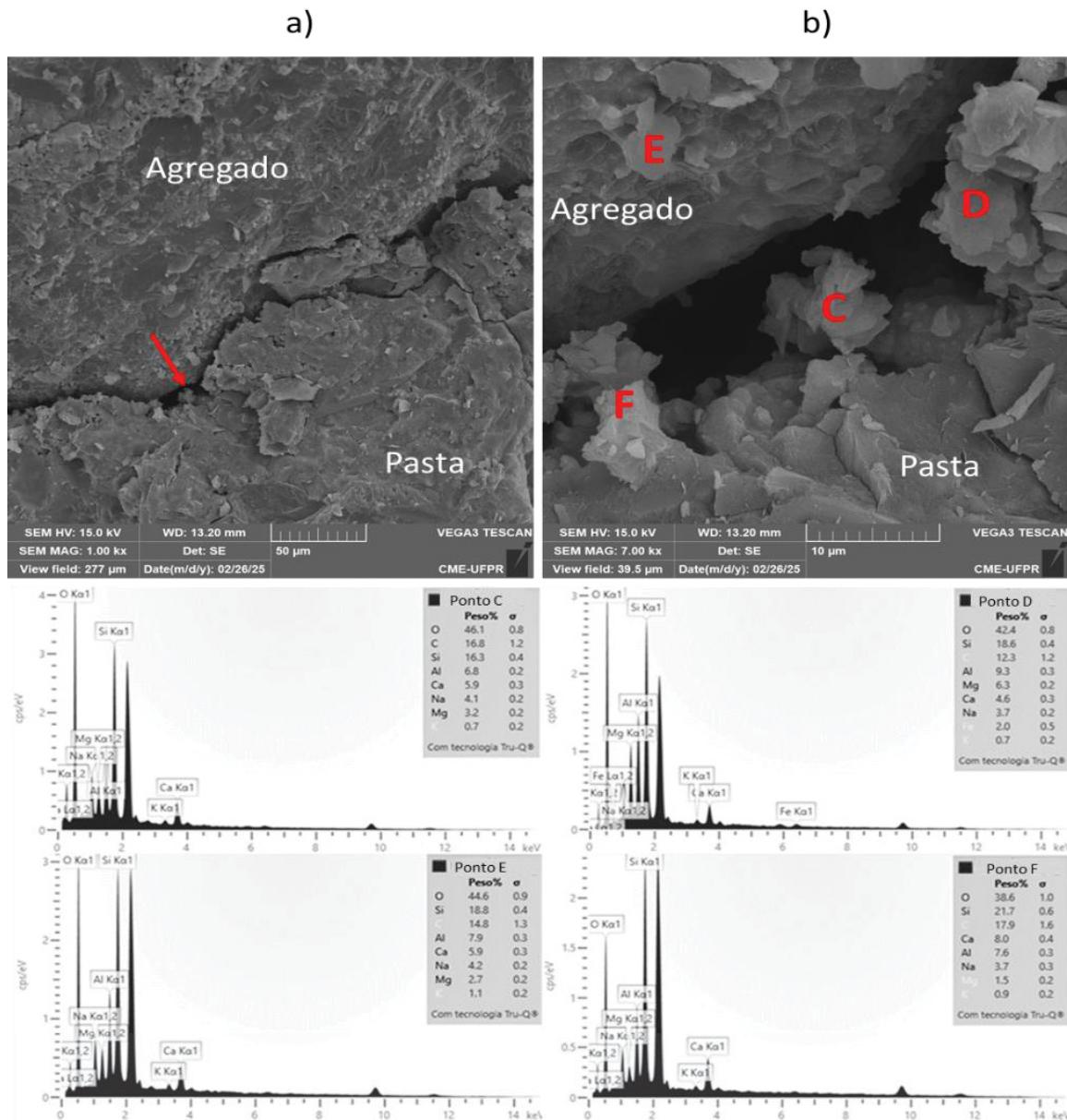
Na Figura 97, observa-se a presença de poros no concreto, que estão preenchidos com material. A análise do gel fissurado revela uma morfologia uniforme, com uma

superfície de baixa rugosidade, característica típica dos produtos de reação da RAA. A ausência de cristais com estrutura definida reforça o caráter amorfó do gel formado, indicando que o produto de reação não possui uma organização cristalina, o que é comum em concretos sujeitos à RAA. Essas observações são consistentes com os resultados de Macioski (2024), que também identificou gel amorfó com morfologia similar em concretos com CPV e agregados da mesma jazida.

A Figura 97b exibe um poro na amostra EC, onde foi realizada a análise EDS para identificar a presença de gel de RAA. Os principais componentes químicos encontrados na amostra EC incluem silício (Si), cálcio (Ca), alumínio (Al), sódio (Na) e magnésio (Mg). Esses elementos são típicos dos produtos de reação gerados pela RAA, confirmando a formação do gel de expansivo de RAA (Leemann et al., 2020b). Já a Figura 97c, referente à amostra ECA, mostra um poro com características semelhantes, com uma composição química de Si, Ca, Na e Mg e Al, que sugere uma interação com os componentes do CAA, que pode modificar a estrutura do gel e sua reatividade, resultando em um produto menos expansivo e mais estável. Já o Mg na composição dos géis de ASR podem se converter parcialmente em hidróxidos de magnésio (brucita) e posteriormente em silicatos de magnésio hidratados (MSH) (Sinha; Wei, 2023). Essas características podem contribuir para a melhoria da durabilidade e resistência dos concretos com CAA, especialmente em comparação com o CPV, que apresenta maior suscetibilidade à expansão devido à RAA.

A Erro! Fonte de referência não encontrada., apresentam também a presença de fissuras entre a pasta e o agregado com deposição de material reativo na amostra E.

Figura 98: análise de MEV para amostra de CAA - E. a) fissura interface agregado/pasta. b) material depositado na fissura, pontos para análise de EDS



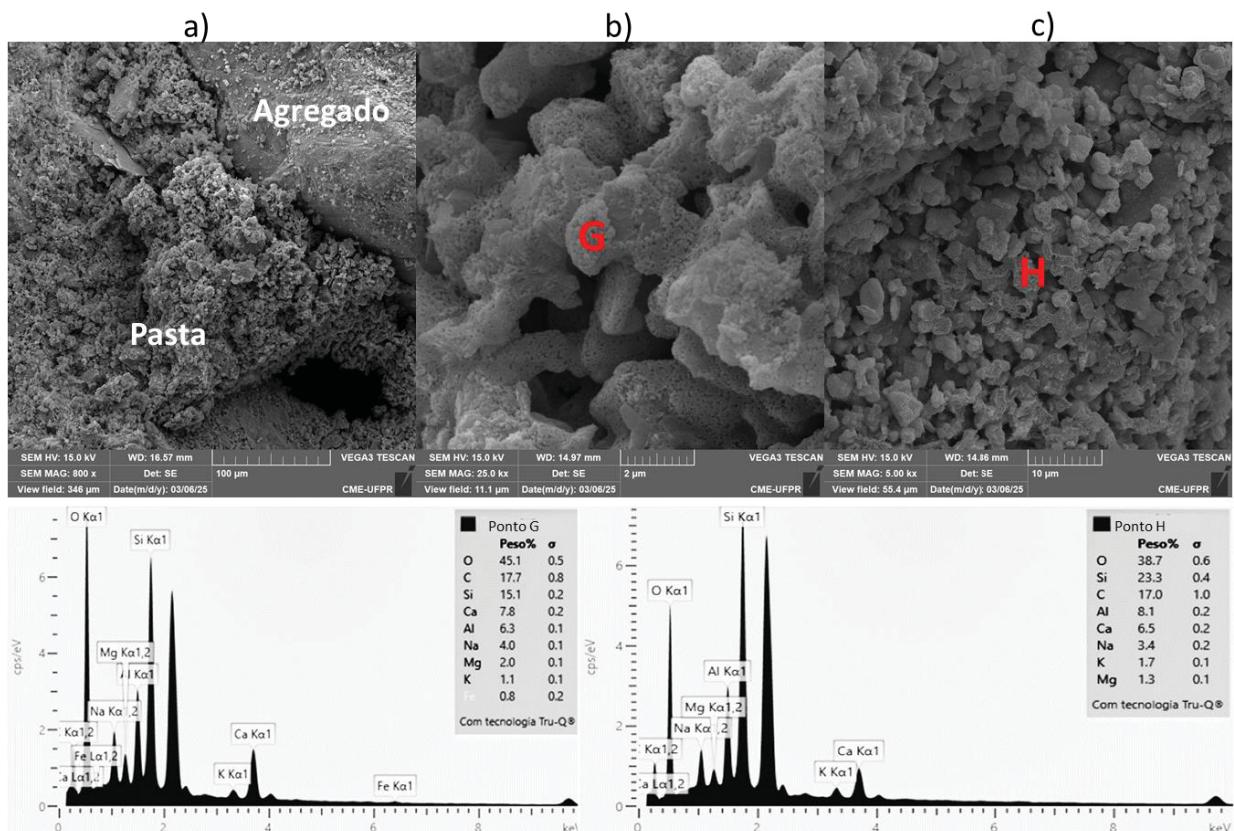
A análise de MEV revelou a presença de um material depositado nas fissuras entre o agregado e a matriz cimentícia, com textura rugosa e sem estrutura cristalina definida. A ausência de cristais aciculares ou prismáticos sugere que o material não é bem ordenado, mas sim um gel amorfó parcialmente densificado ao longo do tempo, possivelmente devido à interação com a matriz e à evolução da reação. Esse tipo de morfologia também foi encontrado na amostra ECA.

A análise por Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) confirmou a presença de elementos típicos do gel de RAA, como Si, Na, K e Ca, conforme encontrado por

Leemann; Münch, (2019) e Leemann et al., (2020b). Além da presença de Al e Mg, normalmente incorporados em géis de RAA em CAA (Sinha; Wei, 2023; Wang et al., 2024).

Na Figura 104, observa-se a presença de fissuras entre o agregado/pasta com material depositado em amostra de ECC.

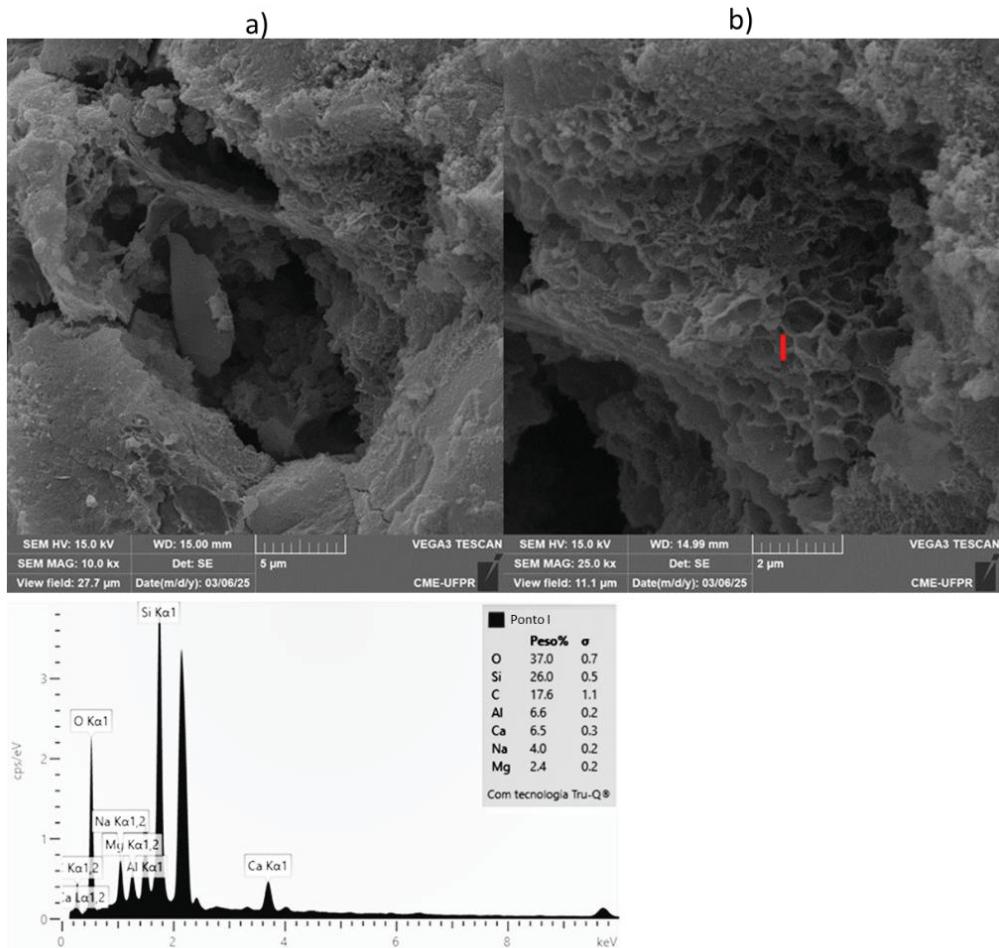
Figura 99: fissuras entre o agregado/pasta com material depositado em amostra de ECC.



A análise das micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou fissuras interfaciais e poros preenchidos com material de textura rendada nas amostras ECC e EC, indicando deterioração na interface agregado-matriz. Os resultados de EDS confirmaram a presença de elementos típicos do gel de RAA, como Si, Na, K, Ca e Al. A presença de alumínio no gel sugere uma modificação estrutural, o que pode influenciar a expansibilidade do gel e reduzir sua mobilidade, afetando sua reatividade ao longo do tempo, conforme descrito por Qian et al., (2024).

A amostra EC e E apresentou ainda poros com estrutura rendada como pode ser visto na Figura 100.

Figura 100: Poros com presença de material com estrutura rendada na amostra EC



Nos cimentos Portland, os géis de RAA são compostos principalmente por silicatos alcalinos ricos em cálcio, enquanto nos cimentos ativados por álcalis, esses géis possuem maior teor de álcalis e alumina, com menor concentração de cálcio. Essa diferença na composição química afeta diretamente a mobilidade e o potencial expansivo do gel. As variações morfológicas resultantes incluem formações porosas e filamentares, frequentemente com uma aparência semelhante a teias de aranha, como mostrado na Figura 100b. Esse tipo de morfologia também pode ser observado em cimentos Portland, como relatado por Hasparyk (2005) e Macioski (2023), que documentaram a diversidade estrutural dos produtos de RAA, que variam de formas maciças e fissuradas até estruturas rendadas dentro dos poros. A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das

amostras revelou a presença de componentes químicos típicos da RAA, como Si, Na, Ca, Al e Mg, confirmando a formação e o comportamento desses produtos no concreto de CAA.

A análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) nas micrografias permitiu identificar as relações atômicas nos produtos de reação. Esses resultados foram comparados com estudos da literatura sobre CP (Rezaieh et al., 2021; Kurtis et al., 1998; Hasparyk, 2005; Šachlová; Přikryl; Pertold, 2010) e CAA (Moraes et al., 2021; Qian et al., 2024; Wang et al., 2024). As composições químicas encontradas estão ilustradas na Figura 101, e as relações atômicas percentuais calculadas são apresentadas na Figura 102.

Figura 101: Diagrama ternário com composições químicas encontradas nas análises de EDS

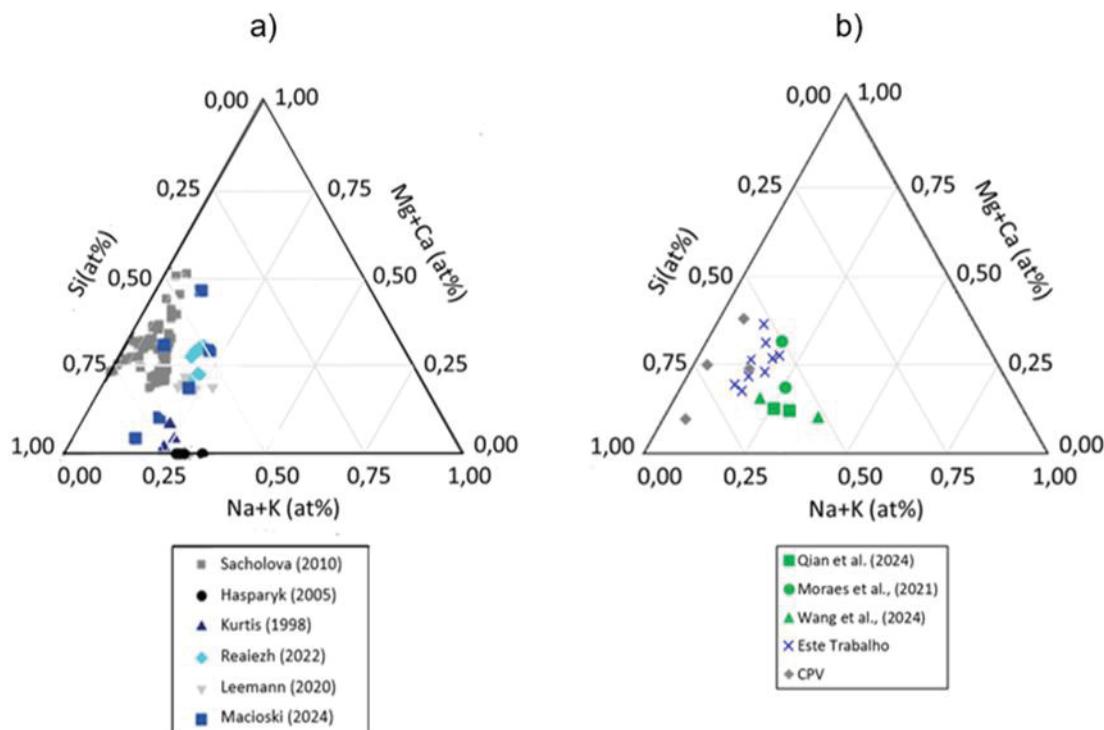
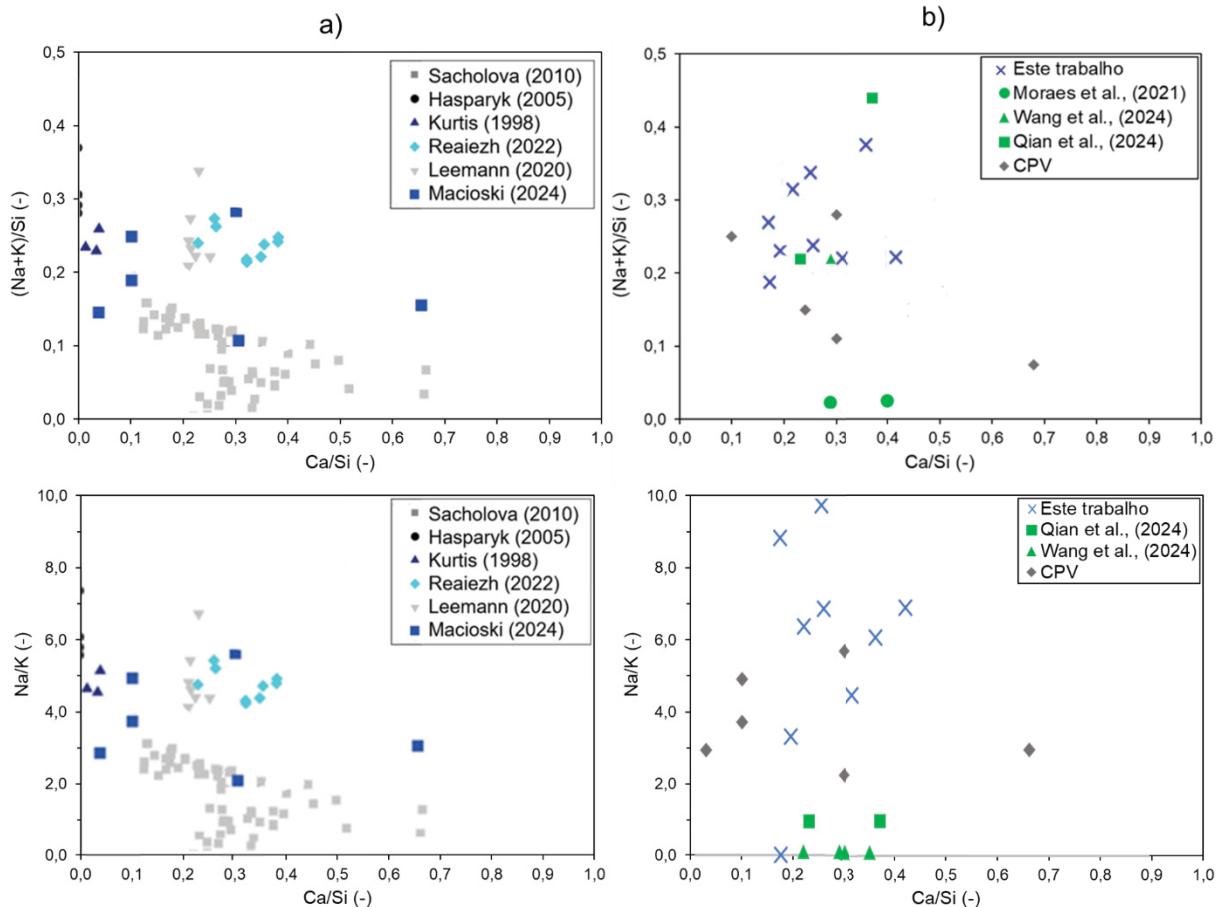


Figura 102: Relações em % atômicas do gel de RAA. a) Cimento Portland (Macioski, 2024) e b) CAA



Os resultados de MEV revelaram que os produtos de RAA nas amostras de CAA apresentam uma morfologia distinta em comparação com o CPV. No CPV, os géis de RAA formam-se com uma maior concentração de cálcio, criando um gel silico-alcalino-cálcico com tendência expansiva. Em contraste, os géis de RAA no CAA apresentaram maior presença de alumínio (Al) e magnésio (Mg), o que modificou a estrutura do gel, tornando-o mais rígido e menos expansivo. Esses resultados corroboram com os achados de Qian et al. (2024), que observaram que o alumínio presente no gel de ASR pode gerar um gel mais rígido e menos expansivo. A detecção de Mg nas amostras também sugere que, além da modificação do gel, o efeito do magnésio pode contribuir para a formação de produtos mais estáveis, como hidróxidos de magnésio, reduzindo a expansibilidade do gel. Esses achados são consistentes com estudos de Qian et al. (2024) e Leemann et al. (2020), que relataram a formação de géis de ASR com diferentes comportamentos dependendo da concentração de álcalis e cálcio.

No que diz respeito à relação entre as variáveis Ca/Si e (Na+K)/Si, foi observado que as amostras de CAA, com valores de Ca/Si mais elevados, tendem a formar géis mais viscosos e menos expansivos, devido à menor disponibilidade de álcalis para a formação de gel de ASR, enquanto no CPV, a maior quantidade de cálcio e álcalis disponíveis favorece a formação de um gel expansivo. Essa diferença é respaldada por estudos de Qian et al., (2024), que mostram como as adições pozolânicas influenciam a natureza do gel de ASR, mitigando a expansão do concreto.

Por fim, os resultados deste estudo reforçam a importância da composição do cimento e do processo de cura na evolução da RAA e suas implicações no desempenho mecânico do concreto. O CAA, com cura térmica e a presença de adições pozolânicas, mostrou um comportamento mais estável nos primeiros estágios de cura, mas, com o tempo, a RAA teve impacto no desempenho, embora de forma mais controlada quando comparado ao CPV. Isso está alinhado com os achados de Sanchez et al. (2015), que destacam a importância das propriedades do cimento e das condições de cura na mitigação dos efeitos da RAA.

A Erro! Fonte de referência não encontrada. a seguir resume as relações atômicas encontradas neste estudo e nos estudos de referência:

Tabela 28: Relações atômicas (%) encontradas neste estudo e referências

Pontos	Amostra	(Na+K)/Si (-)	Na/K (-)	Ca/Si (-)
A	EC	0,20	0,02	0,45
B	ECA	0,20	0,38	0,60
C	E	0,29	0,60	0,36
D	E	0,24	0,48	0,25
E	E	0,28	0,34	0,31
F	E	0,21	0,32	0,37
G	ECC	0,34	0,40	0,52
H	ECC	0,22	3,40	0,28
I	EC	0,15	0,00	0,25
Moraes et al. (2021)		0,64 - 0,69	-	0,28 - 0,39
Wang et al. (2024)		0,51 - 0,22	0,09-0,11	0,3-0,50
Qian et al. (2024)		0,44 - 0,22	0,90-1,00	0,37 - 0,23
CPV		0,07 - 0,11	0,07-0,11	0,1 - 0,68

Com base nos resultados obtidos, as relações atômicas encontradas no presente estudo estão alinhadas com aquelas reportadas para sistemas CAA na literatura,

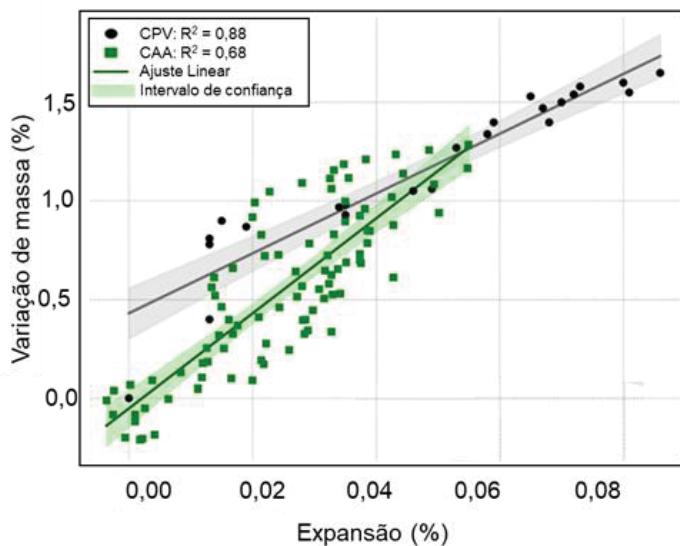
reforçando a influência da composição do CAA na formação e comportamento dos produtos de RAA. A presença de alumínio (Al) e magnésio (Mg) no gel de ASR, observada nas amostras de CAA, confirma a modificação estrutural do gel, o que resulta em uma expansão mais controlada em comparação ao CPV. Embora o CAA tenha apresentado uma menor expansão que o CPV, a retração inicial, influenciada pela cura térmica e pela presença de pozolanas, pode ter contribuído para essa redução, atenuando os efeitos expansivos da reação ao longo do tempo.

6.3.3 Discussão geral dos resultados

A análise dos resultados obtidos ao longo dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, SDI, PDI e outros parâmetros permite uma compreensão do comportamento dos CAA ao longo do tempo. Para uma interpretação mais precisa, é importante realizar o cruzamento dos dados entre diferentes ensaios e avaliar a coerência entre eles e identificar os mecanismos que explicam o comportamento observado, como a evolução das fissuras, a relação entre a expansão por RAA e as propriedades mecânicas.

A Figura 103 apresenta a correlação entre variação de massa (%) e Expansão (%) para o ensaio realizado em corpos de provas cilíndricos nas condições de 95% de umidade e 38⁰ de cura, para as amostras de CAA e CPV.

Figura 103: correlação entre variação de massa (%) e Expansão (%) para o ensaio realizado em corpos de provas cilíndricos nas condições de 95% de umidade e 38⁰ de cura

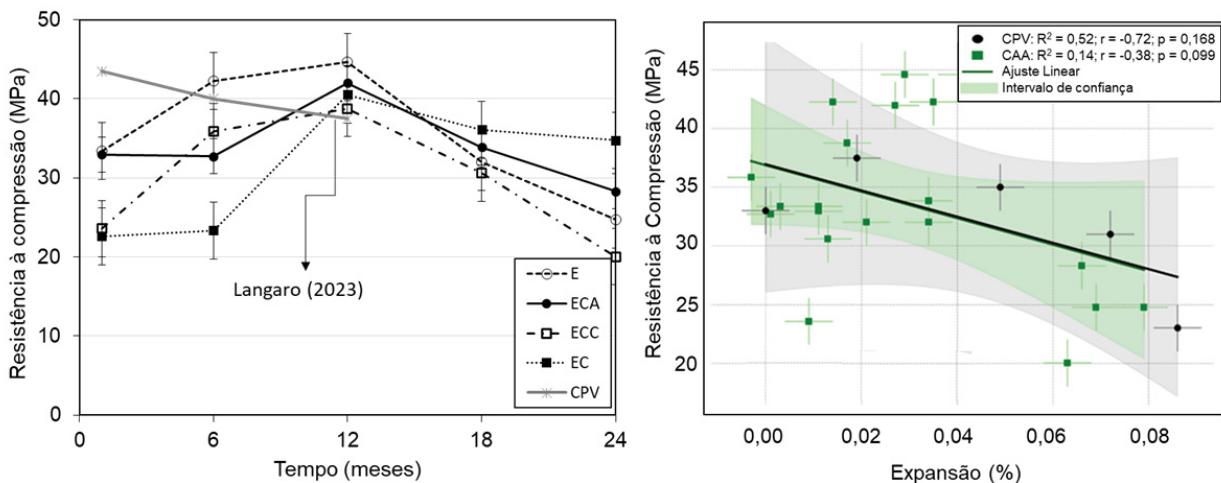


A relação entre expansão (%) e variação de massa (%) nas amostras de CAA e CPV apresentou comportamentos distintos, como demonstrado pelos valores de R^2 obtidos. No caso do CPV, observou-se uma relação mais linear e previsível ($R^2 = 0,88$), o que indica que a variação de massa acompanha diretamente a expansão, sugerindo um padrão de degradação mais uniforme ao longo do tempo. Em contraste, as amostras de CAA apresentaram maior dispersão nos resultados ($R^2 = 0,68$), sugerindo que fatores adicionais, como mecanismos de hidratação distintos, lixiviação de álcalis e variações na microestrutura do concreto, podem estar influenciando essa relação.

No caso do CAA, a maior variação de massa observada pode ser explicada pelo processo de retração inicial, que resultou na formação de fissuras na pasta de cimento. Essas fissuras iniciais permitem a penetração de água, o que aumenta a absorção de umidade, que por sua vez, favorece a formação e expansão do gel de RAA, que é um dos principais responsáveis pela expansão do concreto. Esse comportamento está alinhado com estudos anteriores, que destacam o papel do acúmulo de umidade e da lixiviação de álcalis no controle da progressão da expansão e na variação de massa ao longo do tempo (Costa et al., 2017; Lindgård et al., 2013; Rivard et al., 2003).

A expansão e a variação de massa, reflete os mecanismos envolvidos nas propriedades mecânicas do concreto. Para explorar melhor essa relação, a Figura 104 apresenta a correlação entre os dados de expansão (%) e resistência à compressão (MPa) das amostras de CAA e CPV.

Figura 104: correlação entre os dados de expansão (%) e resistência à compressão (MPa) das amostras de CAA e CPV



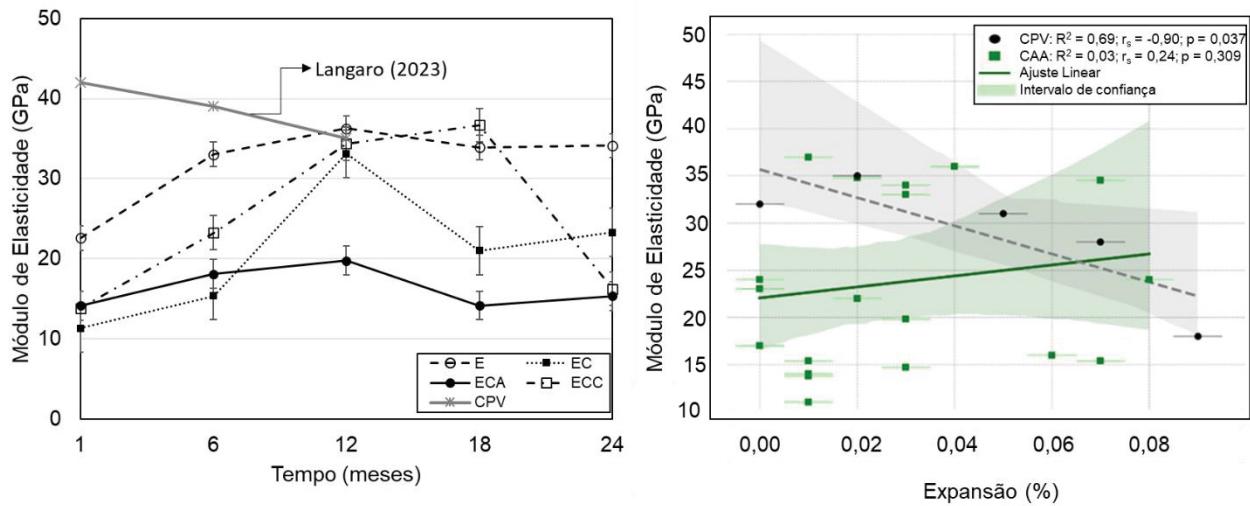
O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para analisar a relação entre expansão (%) e resistência à compressão (MPa) nas amostras CAA e CPV. Para o CAA, obteve-se uma correlação negativa fraca ($r = -0.38$), sem significância estatística ($p = 0.099$), indicando que, embora haja uma leve tendência de redução da resistência com o aumento da expansão, a relação não é consistente. Para o CPV, a correlação negativa foi moderada ($r = -0.72$), mas também sem significância estatística ($p = 0.168$), sugerindo que outras variáveis podem estar influenciando a resistência à compressão.

Essa falta de significância pode estar associada aos processos de hidratação e às condições de cura térmica, que promoveram um aumento na resistência durante o primeiro ano, apesar da expansão. A partir de um certo limite de expansão, a degradação estrutural se intensifica, resultando em uma redução na capacidade mecânica do material (Cai et al., 2020; Kastiukas et al., 2020; Nasir et al., 2020). Portanto, a relação entre expansão e resistência não é linear e depende do grau de deterioração do concreto ao longo do tempo.

A Correlação de Spearman revelou uma forte correlação negativa para o CPV ($rs = -0.90$, $p = 0.037$), indicando que a expansão reduz significativamente a resistência. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da microfissuração interna do concreto, que compromete a integridade estrutural do material. O resultado estatisticamente significativo ($p < 0.055$) confirma que essa tendência é consistente. Para o CAA, a correlação foi fraca e não significativa ($rs = 0.24$, $p = 0.309$), sugerindo que a expansão não afeta diretamente a resistência do CAA, possivelmente devido à composição química dos materiais e à cura térmica, que promovem uma hidratação mais eficiente e podem reduzir os impactos da expansão na resistência mecânica.

A análise da relação entre a expansão e o módulo de elasticidade nas amostras de CAA e CPV pode ser observada na Figura 105.

Figura 105: relação entre a expansão e o módulo de elasticidade nas amostras de CAA e CPV

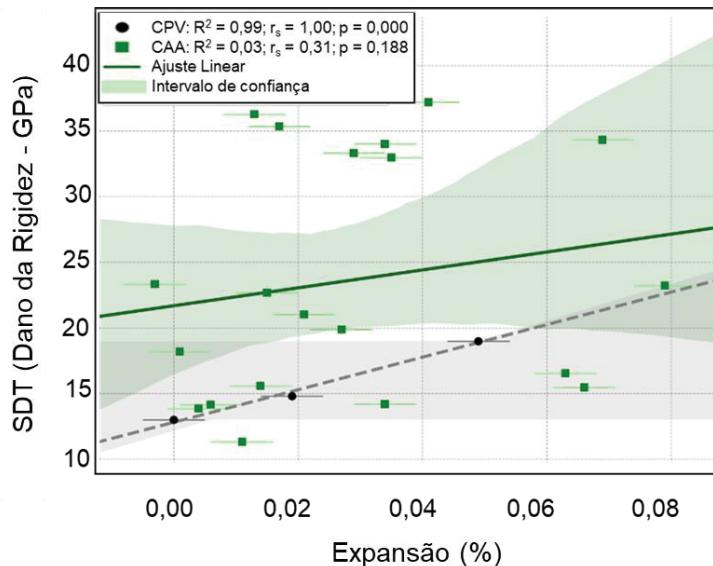


A relação entre expansão (%) e módulo de elasticidade (GPa) nas amostras de CPV e CAA foi analisada utilizando regressão linear e correlação de Spearman. Para o CPV, a regressão linear indicou que 69% da variação no módulo de elasticidade pode ser explicada pela expansão ($R^2 = 0.69$), sugerindo uma relação clara entre a degradação do concreto e a perda de rigidez. Já para o CAA, $R^2 = 0.025$, indicando que a expansão não influencia de maneira significativa a variação do módulo de elasticidade.

A correlação de Spearman revelou uma forte correlação negativa e estatisticamente significativa para o CPV ($r_s = -0.90$, $p = 0.037$), confirmando que a expansão reduz a rigidez do concreto. No caso do CAA, a correlação foi fraca e não significativa ($r_s = 0.24$, $p = 0.309$), sugerindo que a expansão não afeta diretamente o módulo de elasticidade. O teste Tukey revelou que não há diferença significativa entre as amostras. E da mesma forma que a resistência a compressão o módulo de elasticidade de CAA pode ter sido favorecido pela cura térmica, mascrando os efeitos da expansão, enquanto o CPV apresenta uma relação direta entre expansão e perda de rigidez.

Para avaliar a influência da expansão (%) sobre o SDT (Dano da Rigidez - GPa) nas amostras de CAA e CPV, foi realizado uma correlação entre os dados apresentados na Figura 106.

Figura 106: correlação da expansão (%) sobre o SDT (Dano da Rigidez - GPa) nas amostras de CAA e CPV



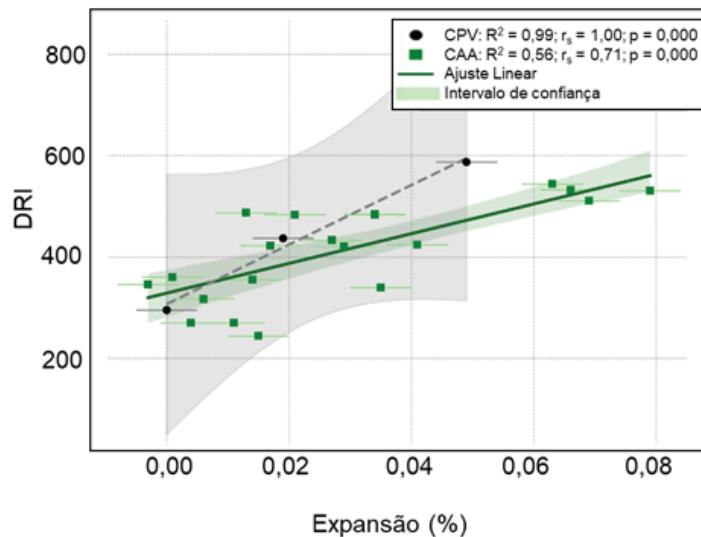
A influência da expansão (%) sobre o SDT (Dano da Rigidez) nas amostras de CAA e CPV, foram analisadas estatisticamente pelo método de regressão linear e correlação de Spearman. A regressão linear indicou uma forte relação entre expansão e SDT para CPV ($R^2 = 0.99$), sugerindo que a expansão impacta diretamente a rigidez. Para o CAA, $R^2 = 0.03$, indicando que a expansão não explica a variação do SDT.

A correlação de Spearman indicou forte correlação positiva para CPV ($r_s = 1.00, p = 0.000$) e uma correlação fraca e não significativa para CAA ($r_s = 0.31, p = 0.188$), sugerindo que o CAA é influenciado por fatores adicionais.

Esses resultados indicam que, enquanto a expansão impacta diretamente a rigidez do CPV, no CAA esse efeito é mascarado pelo ganho inicial de resistência promovido pela cura térmica. A análise destaca a importância de considerar as condições de cura e a evolução da hidratação ao avaliar a durabilidade do concreto.

Ainda com o objetivo de analisar os danos no concreto e a expansão, apresenta-se na Figura 107 a correlação entre os dados de DRI e expansão para as amostras de CAA e CPV.

Figura 107: correlação entre os dados de DRI e expansão para as amostras de CAA e CPV.

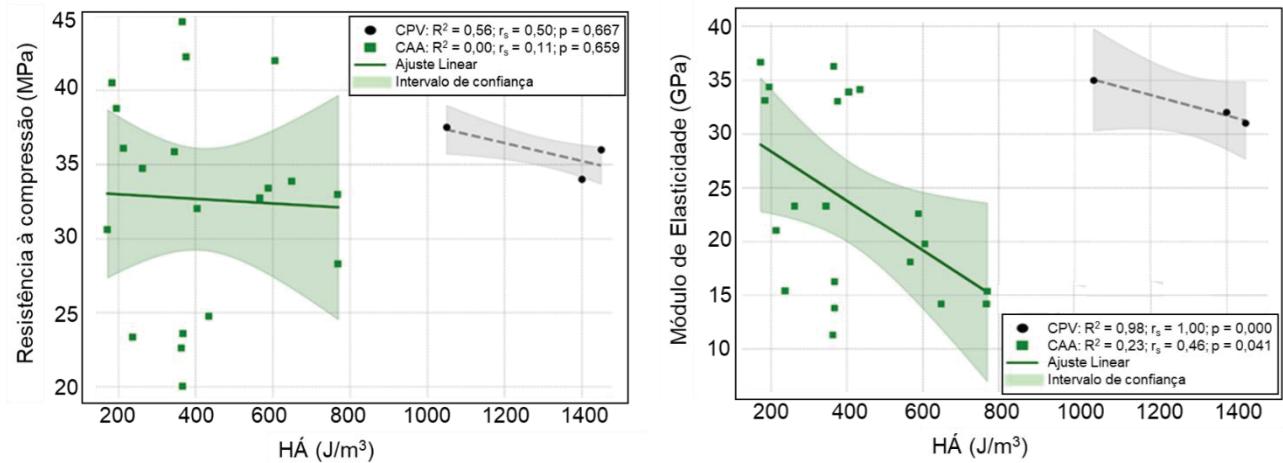


A regressão linear revelou que, para o CPV, a expansão explica quase toda a variação no DRI ($R^2 = 0.99$), indicando um comportamento altamente linear. Já para o CAA, a relação é mais dispersa ($R^2 = 0.56$), sugerindo a influência de outros fatores além da expansão. A correlação de Spearman mostrou uma relação forte e significativa para o CPV ($rs = 1.00$, $p = 0.000$), enquanto para o CAA, a correlação foi moderada ($rs = 0.71$, $p = 0.00045$).

A diferença de comportamento pode ser atribuída à composição dos cimentos: o CPV, apresenta uma relação mais direta entre expansão e DRI, enquanto o CAA, exibe um comportamento mais variável, influenciado pela microestrutura e pelas condições de cura.

A Figura 108 apresenta a correlação entre resistência à compressão e área de histerese e correleção entre módulo de elasticidade e área de histerese.

Figura 108: a) correlação entre resistência à compressão e área de histerese e b) correleção entre módulo de elasticidade e área de histerese.



As análises realizadas entre a Área de Histerese (HA) e o Módulo de Elasticidade (GPa) nas amostras de CAA e CPV revelaram comportamentos distintos. Para o CPV, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,98$) indicou uma forte relação linear entre HA e módulo de elasticidade, enquanto o CAA teve um R^2 de 0,23, demonstrando uma relação fraca. O CPV apresentou uma correlação de Spearman ($r_s = 1,00, p = 0,00$) que indicou uma correlação forte, enquanto o CAA obteve $r_s = 0,46$ ($p = 0,041$), sugerindo uma correlação ainda mais fraca entre as variáveis.

Para as distribuições de HA e resistência à compressão entre CAA e CPV, aplicou-se a regressão linear, onde o CAA teve um R^2 de 0.00, indicando que o modelo linear não se ajusta bem aos dados, enquanto o CPV apresentou R^2 de 0.56, sugerindo uma correlação, porém fraca. A correlação de Spearman revelou para o CAA, o valor de r_s foi -0.11 ($p = 0.659$), indicando uma correlação muito fraca e sem significância estatística. Para o CPV, a correlação foi ligeiramente mais forte ($r_s = 0,56, p = 0,667$), mas também não significativa.

As análises realizadas indicam que tanto o tipo de cimento quanto as condições de cura desempenham um papel crucial nas propriedades mecânicas do concreto. O CAA apresentou um comportamento mais complexo, com uma resposta inicial mais favorável, enquanto o CPV demonstrou uma relação mais previsível. A cura dos concretos de CAA nas condições do ensaio, a 38 °C e 95% de umidade, favoreceu um ganho inicial de resistência mecânica e ajudou a reduzir os danos nos primeiros 12 meses, retardando os efeitos da RAA. Essas condições de cura aceleraram a dissolução de espécies reativas,

como sílica e alumina, promovendo a formação de produtos de hidratação como CSH/CASH, o que aumentou a resistência à compressão (Cai et al., 2020; Kastiukas et al., 2020; Nasir et al., 2020a). Este comportamento está alinhado com as observações feitas por Sanchez (2014), que discute a influência da temperatura e da umidade na cinética das reações em concreto Portland, além de destacar como a cura pode manter a integridade estrutural, minimizando a formação de fissuras e microcavidades.

Nos primeiros 12 meses, os ensaios de DRI, área de histerese, SDT e módulo de elasticidade refletiram os benefícios dessa cura térmica. No entanto, com o passar do tempo, os efeitos da RAA começaram a se intensificar, resultando em uma deterioração progressiva do concreto. Isso confirma que, embora o desempenho inicial dos concretos de CAA seja superior ao dos convencionais, a longo prazo a RAA compromete a resistência, especialmente quando há a presença de agregados reativos ou condições inadequadas de cura.

A análise dos resultados ao longo do estudo revela a relação entre retração, expansão e deterioração nos concretos de CAA sob a influência da RAA. Nos primeiros 12 meses, observou-se uma diminuição na área de histerese, acompanhada por um aumento no módulo de elasticidade e na resistência à compressão. Esse comportamento sugere que a retração significativa, sob condições de cura ambiente, atenuou os efeitos expansivos da RAA, conferindo uma resistência temporária aos efeitos deletérios da reação.

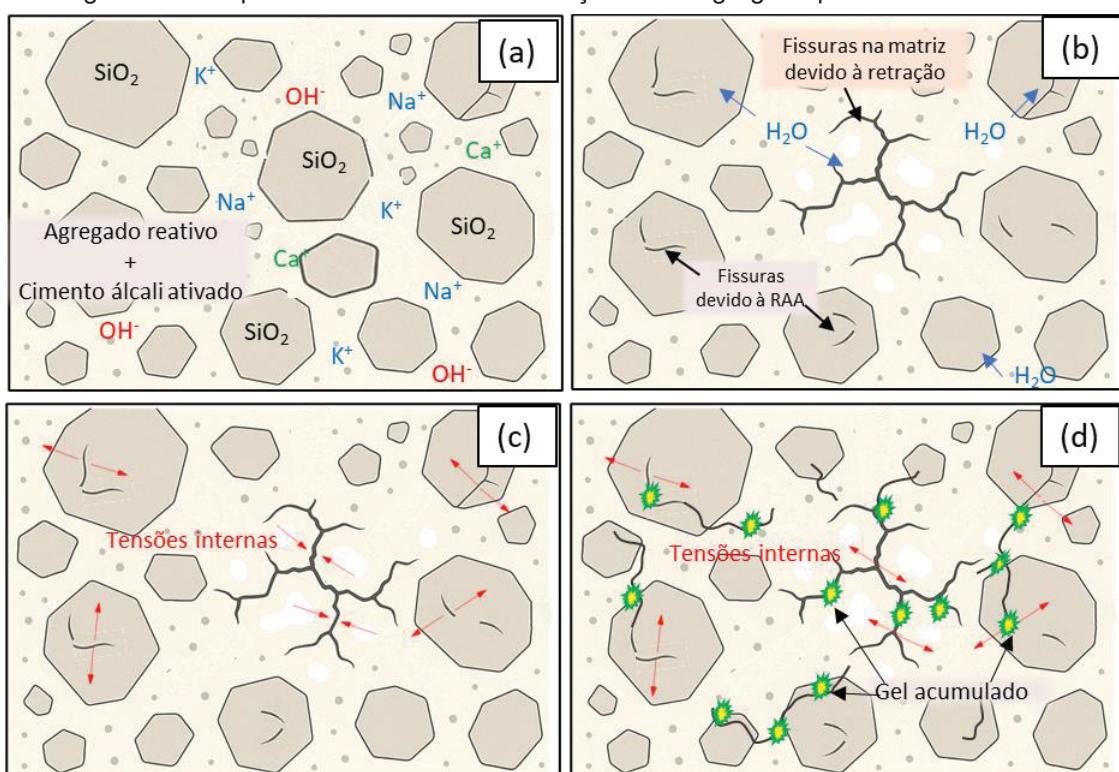
No entanto, a partir dos 12 meses, foi observada uma transição, com uma expansão significativa, aumento da área de histerese e diminuição do módulo de elasticidade, o que indica o avanço da deterioração devido à RAA, inicialmente mitigadas pela retração, essas fissuras evoluíram ao longo do tempo, acompanhadas de produtos expansivos e deterioração da pasta de cimento. Embora o CAA tenha apresentado uma menor proporção de danos do que o CPV, ele ainda demonstra vulnerabilidade à RAA a longo prazo.

A diminuição da rigidez, o aumento da área de histerese e o aumento do PDI após 12 meses refletem a deterioração progressiva do CAA devido à RAA. Esses resultados estão em consonância com os de Sanchez et al. (2015), que destacam que a rigidez do concreto e a resposta ao ensaio de Dano da Rigidez (SDT) são fortemente afetadas pela presença de agregados reativos. A evolução das fissuras observada neste estudo também corrobora as conclusões de Sanchez et al. (2015), que apontam que a presença de fissuras

é um indicativo crítico da deterioração do concreto por RAA. A constatação de que as fissuras começaram a se desenvolver nos primeiros 12 meses, mas foram inicialmente mitigadas, reforça a ideia de que a deterioração é um processo gradual. As características do material, como a retração inicial observada nas amostras de CAA, podem influenciar a taxa de desenvolvimento das fissuras, oferecendo resistência temporária, como foi descrito por Sanchez et al. (2015).

A Figura 109 apresenta o mecanismo de RAA que ocorre no CAA ao longo do tempo.

Figura 109: esquema do mecanismo de reação álcali-agregado para cimentos álcali ativados



A RAA no cimento álcali ativado (CAA) se inicia na moldagem do concreto, que contém agregados reativos ricos em sílica amorfã e uma pasta com alta concentração de álcalis, como sódio (Na^+), potássio (K^+) e cálcio (Ca^{2+}), decorrente principalmente do ativador alcalino (Figura 109a). Devido à granulometria fina dos materiais que compõem o ligante, o sistema sofre uma retração nos primeiros meses, causada principalmente pela perda de água (secagem) e pelos processos iniciais de hidratação que resultam na formação dos géis C-A-S-H ou N-A-S-H (Figura 109b).

A retração pode se prolongar por até 12 meses, gerando microfissuras na matriz, observadas já no primeiro mês por meio do DRI. Essas fissuras facilitam a entrada de

umidade, favorecendo a RAA. Paralelamente, os álcalis da matriz reagem com a sílica amorfa dos agregados, formando fissuras internas que, ao se expandirem e contraírem, podem inicialmente melhorar as propriedades mecânicas ao fechar fissuras na pasta, como indicado pelos resultados do ensaio de SDT.

Com o avanço da reação, forma-se o gel alcalino-silicato característico da RAA, que se expande ao absorver umidade. Isso intensifica as fissuras nos agregados, que se conectam às microfissuras da pasta geradas pela retração (Figura 109c). O gel se acumula nesses espaços, aumentando as tensões internas e podendo levar à delaminação, perda de integridade e até fratura do concreto (Figura 109d).

Em resumo, as análises indicam que o tipo de cimento e as condições de cura afetam as propriedades mecânicas, com o CAA apresentando um comportamento mais complexo, enquanto o CPV exibe uma relação mais previsível.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais deste capítulo contribuem para um melhor entendimento das interações entre os componentes químicos do CAA e a RAA, sugerindo que a composição química e controle da cura térmica podem aumentar a durabilidade e resistência do concreto frente à RAA.

- As fissuras de retração nas amostras de CAA ajudaram a mitigar a expansão da RAA nos primeiros 12 meses, reduzindo a pressão interna e a deterioração inicial.
- Essas fissuras contribuíram para uma menor variação no DRI e SDT, mantendo rigidez e resistência mais estáveis em comparação ao CPV, possivelmente devido à hidratação acelerada proporcionada pela cura térmica.
- Após os 12 meses, as amostras de CAA apresentaram um aumento gradual no DRI, com a expansão e propagação das fissuras de RAA, indicando uma deterioração progressiva.

- O CPV mostrou um aumento no DRI ao longo do tempo, enquanto o CAA teve um comportamento mais gradual e controlado devido à menor expansão e maior resistência ao dano nas primeiras idades.
- O CAA teve menor impacto na redução do SDT nos primeiros 12 meses, graças à hidratação acelerada e ao gel de RAA menos expansivo, mas, com o tempo, a expansão do gel de RAA e o aumento das fissuras levaram a uma deterioração gradual.
- O gel expansivo no CPV gerou microfissuras e deterioração mais visível, causando uma perda mais rápida de rigidez resultando em redução mais significativa no SDT ao longo do tempo.
- As fissuras de retração no CAA serviram como canais para a migração do gel de RAA, ajudando a controlar a pressão interna no concreto. Esse efeito de retração contribuiu para um desempenho mecânico melhor nas fases iniciais.
- No CPV, o gel de RAA tende a ser mais expansivo devido a portlandita (Ca(OH)_2), presente em grandes quantidades, facilita a formação de um gel de RAA mais expansivo, com maior razão Ca/Si. Esse gel, gera pressões internas que causam fissurações no concreto, com uma expansão mais visível.
- No CAA, a menor quantidade de cálcio disponível, combinada com a presença de alumínio e magnésio, resulta em um gel de RAA mais rígido, menos expansivo e mais estável ao longo do tempo. Isso ajuda a controlar a expansão, mas, ainda pode apresentar alguns efeitos da RAA, embora em menor escala.

Essas considerações reforçam a importância das propriedades do material, a composição do cimento e as condições de cura para melhorar a durabilidade e o desempenho a longo prazo do concreto, especialmente em ambientes sujeitos à RAA.

7 CONCLUSÕES

A partir do estudo atual pode-se caracterizar e classificar agregados da região quanto a sua reatividade, como potencialmente reativo ou inóculo, sendo que dos agregados testados e comparados apenas o agregado G1 apresentou expansões para ser considerado reativo.

O estudo demonstrou a importância do desenvolvimento de vários métodos com tempos, temperaturas e condições de exposição diferenciada, para a validação e comparação dos resultados e posterior classificação dos agregados. Os resultados indicaram as incertezas perante o método do AMBT, considerado um método passível de gerar resultados falso-positivos e falso-negativos.

Além disso, pode-se concluir que materiais cimentantes de baixo impacto ambiental, como o CAA, produzidos a partir de resíduos como percursores podem desenvolver resistências à compressão satisfatórias, se tornando uma alternativa ao CP.

Este trabalho foca em conhecer as propriedades microestruturais e de durabilidade do CAA, contribuindo para que seu uso possa ser implantado e aceito no mercado.

A deterioração do concreto de CAA devido à RAA foi observada como um processo gradual e progressivo. Todas as amostras testadas ultrapassaram os limites de expansão após seis meses, indicando que a RAA afeta todas as amostras, porém em menor gravidade que o CP V. Essa constatação reforça a necessidade de monitoramento contínuo e avaliações em períodos mais longos para entender a evolução da deterioração proveniente da RAA.

A pesquisa também destacou a importância da combinação de diferentes métodos de avaliação, como o Índice de Classificação de Danos (DRI) e os ensaios de Dano da Rigidez (SDT), que pode proporcionar uma análise mais abrangente da expansão e deterioração ao longo do tempo.

Assim, o estudo não apenas resume os achados pertinentes, mas também oferece direções para futuras pesquisas e aplicações práticas, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de concretos à base de cimento álcali ativado.

7.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir estão listadas algumas sugestões de trabalhos futuros a partir das conclusões e lacunas de conhecimento encontradas por essa pesquisa:

- Realizar estudos de longo prazo utilizando o método ABCPT para monitorar a evolução da RAA em CAA.
- Investigar a suscetibilidade à RAA em CAA com diferentes agregados de maior reatividade, analisando como a composição mineralógica e as características físicas dos agregados influenciam a deterioração.
- Estudar o impacto de diferentes aditivos e modificadores de propriedades no comportamento do CAA em relação à RAA, buscando soluções que possam mitigar os efeitos da reação.
- Desenvolver modelos numéricos para simular a evolução da RAA em CAA, permitindo prever o comportamento do material sob diferentes condições ambientais e de carregamento.
- Investigar o impacto ambiental da utilização de CAA em comparação com o Concreto de cimento Portland (CP) em termos de emissões de carbono e sustentabilidade, considerando a resistência à RAA.
- Contribuir para o desenvolvimento de normas e diretrizes específicas para a avaliação da RAA em CAA, baseadas em dados experimentais e análises de desempenho.

7.2 ATUAÇÃO NA ELABORAÇÃO DE ARTIGOS NO PERÍODO

Durante o curso de doutorado, até este momento, foram desenvolvidos ou estão em processo de produção os artigos indicados a seguir:

FRARE, A., MIARA, R. D., MACENO, M. M. C. Comparative study of the economic-environmental performance of activated alkali cement and Portland cement using LCA and LCC. **International Worksop on Advances in Cleaner Production. 10th IWACP.** 2021. (PUBLICADO)

FRARE, A., LANGARO, E. A. DE SOUZA, D. J., MEDEIROS, M. H. F. Revisão sistemática sobre Reação álcali-agregado: Panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil. **Revista ALCONPAT.** 2023. (PUBLICADO)

FRARE, A; ANGULSKI DA LUZ, C.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA FILHO, J. I. Study of SiO₂/Al₂O₃ and CaO/SiO₂ Relationships in Activated Alkali Cements. **IBRACON Structures and Materials Journal.** 2024. (PUBLICADO)

FRARE, A., AMARAL, M., SOUZA, D. e MEDEIROS, M. H. F. Processo analítico hierárquico (AHP) aplicado ao estudo de diferentes argamassas frente ao ataque por sulfatos (Na₂SO₄ e MgSO₄). **Ambiente Construído.** 2024. (PUBLICADO)

FRARE, A., ANGULSKI DA LUZ, C. MEDEIROS, M. H. F. Cimento álcali-ativado: influência da morfologia e composição química do metacaulim empregado. **Revista Eixo.** 2024. (PUBLICADO)

FRARE, A.; SILVA, D. A.; LUZ, C. A.; MEDEIROS, M. H. F. Reação álcali agregado em cimentos álcali ativados uma revisão bibliográfica. **XVII Congreso Latinoamericano De Patología de la Construcción. XIX Congreso De Control De Calidad en la Construcción Conpat 2023.** Santa Cruz de la Sierra. 2023. (PUBLICADO)

FRARE, A.; SILVA, D. A.; PERIALISE, R.; MEDEIROS, M. H. F. Passado, presente e futuro da pesquisa sobre concreto com fibras: uma análise bibliométrica. **64º Congresso Brasileiro de concreto, CBC 2023.** Florianópolis. Anais do 64 Congresso Brasileiro de concreto. 2023. (PUBLICADO)

FRARE, A.; LANGARO, E. A.; ANGULSKI DA LUZ.; MEDEIROS, M. H. F. Avaliação da Reação Álcali-Agregado em Cimentos Álcali-Ativados: Aplicação de Métodos Tradicionais e Alternativos. In: **65º Congresso Brasileiro Do Concreto, CBC 2025,** Curitiba. Anais [...]. São Paulo: IBRACON, 2025. ISSN 2175-8182. (PUBLICADO).

LANGARO, E. A.; MACIOSKI, G.; FRARE, A.; MEDEIROS, M. H. F. *Efeito da Geometria de Corpos de Prova de Concreto na Expansão Devido à Reação Álcali-Sílica*. In: **Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, 5., 2025, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: [s.n.], 2025. (ARTIGO ACEITO).

FRARE, A.; RUSSI, L. B.; MEDEIROS, M. H. F. *Aditivo à base de policarboxilato no concreto: avaliação da resistência mecânica e parâmetros indicativos de durabilidade*. In: **Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, 5., 2025, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: [s.n.], 2025. (ARTIGO ACEITO).

LANGARO, E. A.; FRARE, A.; PIERALISI, R.; MEDEIROS, M. H. F.; SANCHEZ, L. Exposure sites for alkali-silica reaction (RAS) in concrete: a review. **IBRACON Structures and Materials Journal**. (ARTIGO EM REVISÃO PELOS AUTORES).

FRARE, A. MIRANDA, P. SILVESTRO, L. ANGULSKI DA LUZ, C. MEDEIROS, M. H. F. **Comportamento reológico de cimentos álcali ativados**. (ARTIGO EM DESENVOLVIMENTO).

FRARE, A., LANGARO, E. A., ANGULSKI DA LUZ, C. MEDEIROS, M. H. F. **Caracterização dos Agregados da região sul quanto a sua reatividade**. (ARTIGO EM DESENVOLVIMENTO).

REFERÊNCIAS

- ABBAS, Safeer; KAZMI, Syed M. S.; MUNIR, Muhammad J. Potential of rice husk ash for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 61–70, 1 fev. 2017.
- ABCP. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Relatórios internos, vários.** São Paulo, 2016.
- ADAMS, Donald F.; WALRATH, David E. Current Status of the losipescu Shear Test Method. **Journal of Composite Materials**, v. 21, n. 6, p. 494–507, 1 jun. 1987.
- ADESINA, Adeyemi. **Performance and sustainability overview of alkali-activated self-compacting concrete.** Waste Disposal and Sustainable Energy Springer, , 1 set. 2020.
- ADESINA, Adeyemi; RODRIGUE KAZE, Cyriaque. Physico-mechanical and microstructural properties of sodium sulfate activated materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 295, p. 123668, 2021.
- AGUIRRE-GUERRERO, Ana María; ROBAYO-SALAZAR, Rafael Andres; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. Corrosion resistance of alkali-activated binary reinforced concrete based on natural volcanic pozzolan exposed to chlorides. **Journal of Building Engineering**, v. 33, 1 jan. 2021.
- AHMAD, Madiha *et al.* Physico-mechanical performance of fly ash based geopolymer brick: Influence of pressure temperature time. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104161, 2022.
- AIKEN, Timothy A. *et al.* Mechanical and durability properties of alkali-activated fly ash concrete with increasing slag content. **Construction and Building Materials**, v. 301, 27 set. 2021.
- ALAEJOS, P. *et al.* Effectiveness of the accelerated mortar bar test to detect rapid reactive aggregates (including their pessimum content) and slowly reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 13–19, abr. 2014.
- ALEXANDER, Anjana Elsa; SHASHIKALA, A. P. Studies on the microstructure and durability characteristics of ambient cured FA-GGBS based geopolymer mortar. 2022.
- ALEXANDER, M. G. **Alkali-aggregate reaction.** [S.I.]: Elsevier LTD, 2019.
- ALOMAYRI, Thamer; ADESINA, Adeyemi. The influence of nano CaCO₃ on the mechanical performance of micro glass-reinforced geopolymer paste. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, p. 1369, 2021.
- ALONSO, S.; PALOMO, A. **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio**Materials Letters. [S.I.: S.n.]. Disponível em: <www.elsevier.comrlocatermatlet>.

AL-OTAIBI, Saud. Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 10, p. 2059–2067, out. 2008.

ALRAWASHDEH, Anas A. et al. Promoting the use of geopolymers and alkali-activated materials through the identification of critical factors and strategies. **Journal of Building Engineering**, v. 98, 1 dez. 2024.

ANDRADE, T. Cases in Building Foundations in the Recife Metropolitan Area. **IBRACON Materials Journal**, v. 2, n. 2, p. 97–105, 2006.

ANGULO-RAMÍREZ, Daniela Eugenia; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby; MEDEIROS, Marcelo. Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars: Performance to alkali-aggregate reaction. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577:2008 - Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos.**, 2008.

AWOYERA, Paul; ADESINA, Adeyemi. A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, 1 dez. 2019.

AWOYERA, Paul O. et al. Alkali-activated materials: advances on accelerated and long-term durability assessment and methodologies—a short review. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, n. 5, p. 1–11, 1 out. 2022.

, Serdar; BARADAN, Bülent. Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali AYDIN -activated slag mortars. **Materials and Design**, v. 35, p. 374–383, mar. 2012.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, p. 331–334, 2001.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 211–216, 2002a.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Ataque de sulfato em concreto de escória ativado por álcali. **Cement and Concrete Research**, p. 211–2016, 2002b.

BALLEKERE KUMARAPPA, Darshan; PEETHAMPARAN, Sulapha; NGAMI, Margueritte. Autogenous shrinkage of alkali activated slag mortars: Basic mechanisms and mitigation methods. **Cement and Concrete Research**, v. 109, p. 1–9, 1 jul. 2018.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos Resíduos cauliníticos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria-prima para a produção de pozolanas de alta reatividade. **Cerâmica**, 2012.

BARR, B.; HASSO, E. B. D. Development of a compact cylindrical shear test specimen. **Mater. Sci. Lett.**, p. 1305–1308, 1986.

BATTAGIN, A. A evolução da cultura da prevenção da reação álcali-agregado no mercado nacional. **Concreto & Construções. Instituto Brasileiro de Concreto**, p. 39–43, 2016.

BELTRAME, N. A. et al. ,. Alkali activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal: resistance to attack by sodium and magnesium sulfates. **Construction and Building Materials**, 2020.

BEN HAHA, M. A. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part II: Effect of Al₂O₃. **Cement and Concrete Research**, 2012.

BEN HAHA, M.; LOTHENBACH, B.; SAOUT, G. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag - Part I: Effect of MgO. **Cement and Concrete Research**, v. 2011, [S.d.].

BERNARD, Laetitia; LEEMANN, Andreas. Assessing the potential of ToF-SIMS as a complementary approach to investigate cement-based materials - Applications related to alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 68, p. 156–165, 2015.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 12, p. 3764–3773, 2014.

BINAL, Adil. The Pessimum Ratio and Aggregate Size Effects on Alkali Silica Reaction. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 15, p. 725–731, 2015.

BODDY, A. M.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1263–1268, ago. 2003.

BOUZABATA, Hassina *et al.* Swellings due to alkali-silica reaction and delayed ettringite formation: Characterisation of expansion isotropy and effect of moisture conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 349–356, mar. 2012.

CADORE, D. E.; ANGULSKI DA LUZ, C.; FARIAS DE MEDEIROS, M. H. An investigation of the carbonation of alkaline activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 117–125, 30 nov. 2019.

CAI, Jingming *et al.* Thermal and compressive behaviors of fly ash and metakaolin-based geopolymer. **Journal of Building Engineering**, v. 30, 1 jul. 2020.

CAMPA, Brian; MCMULLIN, Kerry; GILBERT, Patrick. Sixth Street Viaduct Replacement Project. **Structure Magazine**, 2020.

CBC NEWS. Mactaquac Dam replacement cost could hit \$5B, says NB Power. 2014.

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. COP 30: oportunidade para o setor da construção contribuir para a agenda climática no Brasil. 2025.

CHAPPEX, Théodore; SCRIVENER, Karen. Alkali fixation of C-S-H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 8, p. 1049–1054, ago. 2012a.

CHAPPEX, Théodore; SCRIVENER, Karen L. The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1645–1649, dez. 2012b.

CHAPPEX, Théodore; SCRIVENER, Karen L. The effect of aluminum in solution on the dissolution of amorphous silica and its relation to cementitious systems. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 96, n. 2, p. 592–597, fev. 2013.

CHAUDHRY, Rabia Hameed. **Determination of Air Voids, Capillary, and Gel Porosity in Hardened Concrete using Mass-Based Saturation Techniques**. Thesis—Toronto: University of Toronto, 2018.

CHEN, W.; BROUWERS, H. J. H. The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 2, p. 428–443, 2007.

CHEN, Y. Alkali aggregate reaction in alkali slag cement mortars. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, p. 60–62, 2002.

CHI, Jack M.; HUANG, Ran; YANG, C. C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 14–20, 2002.

CHI, Maochieh; HUANG, Ran. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 291–298, 2013.

CHICA, Lina; ALZATE, Albert. Cellular concrete review: New trends for application in construction. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 637–647, 2018.

CHINDAPRASIRT, Prinya; RATTANASAK, Ubolluk; TAEBUANHUAD, Sompop. Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymers. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 46, n. 3, p. 375–381, 2013.

CHRISP, T. M.; WALDRON, P.; WOOD, J. G. Development of a non-destructive test to quantify damage in deteriorated concrete. **Magazine of Concrete Research**, p. 247–256, 1993.

COLLINS, Frank; SANJAYAN, J. G. Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1401–1406, 2000.

COSTA, U.; MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A. E. Minimizing alkali leaching in the concrete prism expansion test at 38 °C. **Construction and Building Materials**, p. 547–554, 2017.

CROUCH, R. S.; WOOD, J. G. M. Damage evolution in AAR affected concretes. **Engineering Fracture Mechanics**, p. 211–218, 1990.

CYR, M.; POUHET, R. Resistance to alkali-aggregate reaction (AAR) of alkali-activated cement-based binders. **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**, p. 397–422, 2015.

DAVIDOVITS, J. Cimentos de alto teor alcalino para concretos do século XXI. **ACI Special Publication**, p. 383–398, 1994.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and sustainable Development. **The Poly (sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry**, 2005.

DE FILIPPIS, Ugo; PRUD'HOMME, Elodie; MEILLE, Sylvain. Relation between activator ratio, hydration products and mechanical properties of alkali-activated slag. **Construction and Building Materials**, v. 266, 10 jan. 2021a.

DE FILIPPIS, Ugo; PRUD'HOMME, Elodie; MEILLE, Sylvain. Relation between activator ratio, hydration products and mechanical properties of alkali-activated slag. **Construction and Building Materials**, v. 266, 10 jan. 2021b.

DE MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias *et al.* Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 2, n. 1, 1 dez. 2017.

DE SOUZA, D. J.; ANTUNES, L. R.; SANCHEZ, L. F. M. The evaluation of Wood Ash as a potential preventive measure against alkali-silica reaction induced expansion and deterioration. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, p. 131984, 15 jul. 2022.

DE SOUZA, D. J.; SANCHEZ, L. F. M.; DE GRAZIA, M. T. Evaluation of a direct shear test setup to quantify AAR-induced expansion and damage in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 229, 30 dez. 2019.

DE SOUZA, Diego J.; SANCHEZ, Leandro F. M. Evaluating the efficiency of SCMs to avoid or mitigate ASR-induced expansion and deterioration through a multi-level assessment. **Cement and Concrete Research**, v. 173, 1 nov. 2023.

DE SOUZA, Diego J.; SANCHEZ, Leandro F. M.; BIPARVA, Alireza. Influence of engineered self-healing systems on ASR damage development in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 147, 1 mar. 2024.

DESCHENES, Richard A. *et al.* Effects of moisture, temperature, and freezing and thawing on Alkali-Silica reaction. **ACI Materials Journal**, v. 115, n. 4, p. 575–584, 1 jul. 2018.

DIAB, S. H.; SOLIMAN, A. M.; NOKKEN, M. R. Effect of triggering material, size, and casting direction on ASR expansion of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 269, n. 2, 2021.

DIAMOND, Sidney. **A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms i. alkalies in cements and in concrete pore solutions**. *cement and concrete research*. [S.I.]: Pergamon Press, Inc, 1975.

DONATELLO, Shane; CHEESEMAN, Christopher R. **Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review**. **Waste Management**, nov. 2013.

DUAN, Weiwei *et al.* Mitigation of alkali-silica reaction in blast-furnace slag-based alkaline activated material through incorporation of alum water treatment residue. **Construction and Building Materials**, v. 406, 24 nov. 2023.

DURAN ATIŞ, Cengiz *et al.* Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 548–555, jan. 2009.

DUXON, P. E. A. Geopolymer technology: the current state of the art. **J Mater Sci**, 2007.

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

DUXSON, Peter *et al.* Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Physicochem. Eng. Aspects**, v. 269, p. 47–58, 2005.

EKER, Hasan; DEMİR ŞAHİN, Demet; ÇULLU, Mustafa. Effect of Reduced Fineness of Fly Ash Used on the Alkali–Silica Reaction (ASR) of Concrete. **Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering**, v. 47, n. 4, p. 2203–2217, 1 ago. 2023.

EKİNCİ, Enes. The effects of different production parameters (NaOH concentration, curing regime and replacement ratio of recycled aggregate) on fresh, hardened and elevated temperature performance of geopolymer mortar samples. **Journal of Building Engineering**, v. 76, p. 107052, 2023.

ELIE, Kamseu *et al.* Dependence of the geopolymerization process and end-products to the nature of solid precursors: Challenge of the sustainability. **Journal of Cleaner Production** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2021.

EXETER MEMORIES. Royal Devon and Exeter Hospital. 2014.

FENNELL, P. S.; DAVIS, S. J.; MOHAMMED, A. Decarbonizing cement production. **Joule**, v. 5, n. 6, p. 1301–1305, 16 jun. 2021.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, A. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 3055–3065, maio 2007.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F. The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. **Cement and Concrete Research**, p. 1019–1024, 2002.

FIGUEIRA, R. B. *et al.* Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 20 out. 2019.

FILHO, Juarez Hoppe *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (Parte ii): índice de atividade pozolânica com cimento portland (IAP), difração de raios-x (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Revista Materia**, v. 22, n. 3, 2017.

FORSTER, S. W. State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity Reported by ACI Committee. **ACI Committee 221**, p. 1–31, 1998.

FOURNIER, Benoit; BÉRUBÉ, Marc-André. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. 167–191, 2000.

FRANÇOIS, Raoul; LAURENS, Stéphane; DEBY, Fabrice. Steel Corrosion in Reinforced Concrete. **Corrosion and its Consequences for Reinforced Concrete Structures**, p. 1–41, 1 jan. 2018.

FRANK, Heinrich Theodor. Guia de Minerais Transparentes ao Microscópio Petrográfico. **Porto Alegre: UFRGS**, 2018.

FRARE, A. et al. Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil. **Revista ALCONPAT**, v. 13, p. 1–27, 2022.

FRARE, A. et al. Systematic review on alkali-aggregate reactions: comparative overview of studies carried out in Canada and Brazil. **Revista Alconpat**, v. 13, n. 1, p. 1–27, 1 jan. 2023.

FRARE, A. et al. Study of SiO₂/Al₂O₃ and CaO/SiO₂ Relationships in Activated Alkali Cements. **Rev. IBRACON Estrut. Mater**, v. 17, n. 3, p. e17313, 2024a.

FRARE, Andreza et al. Study of SiO₂/Al₂O₃ and CaO/SiO₂ relationships in alkali-activated cements. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, n. 3, 2024b.

FRARE, Andreza; ANGULSKI DA LUZ, Caroline; FARIA DE MEDEIROS, Marcelo Henrique. Influência de metacaulins brasileiros em cimentos álcali-ativados, com mistura ternária de escória de alto-forno e cinza de casca de arroz regionais. **Revista Eixo**, v. 13, n. 3, p. 141–152, 2024.

FRARE, Andreza; LUZ, Caroline Angulski Da. Activated alkali cements: Effect of thermal curing on the development of mechanical strength. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

FRÝBORT, A. et al. Variations in the composition and relations between alkali-silica gels and calcium silicate hydrates in highway concrete. **Materials Characterization**, v. 137, p. 91–108, 1 mar. 2018.

FUNAHASHI, Eduardo et al. **Deterioração do concreto de barragens e usinas hidrelétricas devido ao ataque combinado de raa/def-estudos de casos concrete deterioration of dams and hydroelectric power plants due to the joint attack of aar/def-case studies**. Foz do Iguaçu - PR: [S.n.].

GALLO, G. et al. Medidas preventivas para a reação álcali-agregado (RAA) no concreto. **Concreto & Construção**, v. 46, p. 22–28, 2007.

GAO, X.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Assessing the porosity and shrinkage of alkali activated slag-fly ash composites designed applying a packing model. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 175–184, 30 ago. 2016.

GAO, Xuan *et al.* Alkali-silica reaction of high-magnesium nickel slag fine aggregate in alkali-activated ground granulated blast-furnace slag mortar. **Construction and Building Materials**, v. 406, 24 nov. 2023.

GARCIA-LODEIRO, I. *et al.* Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. **Cement and Concrete Research**, p. 923–931, 2011.

GARCIA-LODEIRO, Inés *et al.* Hydration of hybrid alkaline cement containing a very large proportion of fly ash: A descriptive model. **Materials**, v. 9, n. 8, 2016.

GCCA. **Indústria global de cimento e concreto anuncia roteiro para alcançar emissões inovadoras de co2 “net zero” até 2050.**

GHIASVAND, Ebrahim *et al.* Evaluation of the durability of concretes containing alkali-activated slag exposed to the alkali-silica reaction by measuring electrical resistivity. **Construction and Building Materials**, v. 367, 27 fev. 2023.

GHOLIZADEH-VAYGHAN, Asghar; RAJABIPOUR, Farshad. Quantifying the swelling properties of alkali-silica reaction (ASR) gels as a function of their composition. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, n. 8, p. 3801–3818, 1 ago. 2017.

GIFFORD, J. E.; GILLOTT, P. M. Reação alcalino-sílica (ASR) e reação alcalino-carbonato (ACR) em concreto ativado de escória de alto-forno (ABFSC). **Cement and Concrete Research**, p. 21–26, 1996.

GILLOTT, J. E. **Alkali-aggregate reactions in concrete** *Engineering Geology*. [S.l.: S.n.]

GLOBAL HIGHWAYS. UK: Overnight bridge demolition job. 2023.

GOLMAKANI, F.; HOOTON, R. Comparison of laboratory performance tests used to assess alkali-silica reactivity. **Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering**, p. 1–7, 2019.

GOMES DA SILVA, Maristela; GOMES DA SILVA, Vanessa; MENG, Arch. **Brazilian experience in recycling steel slags in civil construction: discussion and methodology proposal**. Campinas: [S.n.].

GRUSKOVNIJAK, A. E. A. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement. **Cement and Concrete Research**, p. 983–992, 2008.

HASKETT, M. *et al.* ., Evaluating the shear-friction resistance across sliding planes in concrete. **Engineering Structures**, p. 1357–1364, 2011.

HASPARYK, N. P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, v. 2, n. 3, p. 21–63, 2022.

HE, Pingping *et al.* Recycling of Glass Cullet and Glass Powder in Alkali-Activated Cement: Mechanical Properties and Alkali–Silica Reaction. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 12, p. 7159–7169, 1 dez. 2020.

HENRIQUE, Paulo; ROLIM, Borba. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil-PPGEC reação álcali-agregado: avaliação do método químico de ensaio. [S.I.: S.n.]

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese (Doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

HOPPE FILHO, J. et al. Reactivity assessment of residual rice-husk ashes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 1–7, 2017.

HOVER, Kenneth C. **The influence of water on the performance of concrete.** **Construction and Building Materials**, jul. 2011.

HUANG, G. et al. . A influência dos métodos de cura na resistência das argamassas ativadas por álcalis à base de cinzas de fundo MSWI: o papel da lixiviação de OH⁻ e álcalis livres. **Construction and Building Materials**, p. 978–985, 2018.

HUANG, Guodong et al. The influence of curing methods on the strength of MSWI bottom ash-based alkali-activated mortars: The role of leaching of OH⁻ and free alkali. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 978–985, 20 out. 2018.

HUET, B. Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution. **Electrochimica Acta**, p. 172–180, 2005.

HÜNGER, Klaus Jürgen. The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with greywacke. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 8, p. 1193–1205, ago. 2007.

IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL. Informativo Econômico Mensal – Janeiro de 2025. Brasília: Instituto Aço Brasil, 2025.

IBRAHIM, Mohammed et al. **A review on utilization of industrial by-products in the production of controlled low strength materials and factors influencing the properties.** **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 28 mar. 2022.

ICHIKAWA, Tsuneki. Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 8, p. 716–726, ago. 2009.

IDEKER, Jason H. et al. The current state of the accelerated concrete prism test. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 550–555, abr. 2010.

ISLAM, Md Hafijul et al. Development of Sustainable Geopolymer Concrete Using GGBS, Fly Ash, and Recycled Aggregates to Reduce Environmental Impact. **AIP Conference Proceedings**, v. 3262, n. 1, 5 fev. 2025.

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

JAROONVECHATAM, N. Fabrication of highly porous mortar to alleviate failure caused by alkali-silica reaction (ASR). **Materiaux et Techniques**, 2017.

JEGAN, M.; ANNADURAI, R.; KANNAN RAJKUMAR, P. R. A state of the art on effect of alkali activator, precursor, and fibers on properties of geopolymer composites. 2023.

JENSEN, A. D. Studies of alkali-silica reaction – part II effect of air-entrainment on expansion. **Cement and Concrete Research**, p. 311–314, 1984.

JUENGER, M. C. G. E. A. Advances in Alternative Cementitious Binders. **Cemente and Concrete Research**, p. 1232–1243, 2011.

KALINA, Lukáš *et al.* Blastfurnace hybrid cement with waste water glass activator: Alkali-Silica reaction study. **Materials**, v. 13, n. 16, 1 ago. 2020.

KASHANI, Alireza *et al.* The interrelationship between surface chemistry and rheology in alkali activated slag paste. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 583–591, 2014.

KASTIUKAS, Gediminas *et al.* Development of precast geopolymer concrete via oven and microwave radiation curing with an environmental assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, 10 maio 2020.

KHAN, Md Nabi Newaz; SAHA, Ashish Kumar; SARKER, Prabir Kumar. Evaluation of the ASR of waste glass fine aggregate in alkali activated concrete by concrete prism tests. **Construction and Building Materials**, v. 266, 10 jan. 2021.

KOMKOVA, Anastasija; HABERT, Guillaume. Environmental impact assessment of alkali-activated materials: Examining impacts of variability in constituent production processes and transportation. **Construction and Building Materials**, v. 363, 11 jan. 2023.

KOMNISTSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry. **Miner Eng**, 2007.

KONG, Daniel L. Y.; SANJAYAN, Jay G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 334–339, fev. 2010.

KRIVENKO, P. *et al.* Alkali-aggregate reaction in alkali-activated cement concretes. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 660, n. 1, p. 012002, 1 nov. 2019.

KRIVENKO, P. *et al.* Mecanismo de prevenção da reação álcali-agregado em concretos de cimento alcalino ativados. **Cement and Concrete Composites**, p. 157–165, 2014.

KRIVENKO, Pavel *et al.* Mechanism of preventing the alkali-aggregate reaction in alkali activated cement concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 45, p. 157–165, 2014.

LANGARO, E. A. *et al.* A influência da composição química e da finura no desempenho de cimentos álcali ativados obtidos com escórias de alto forno. **Revista Matéria**, p. 1–11, 2017.

LANGARO, E. A. et al. Use of slag (GBFS) generated in charcoal blast furnace as raw material in alkali-activated cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 142, n. 3, p. 1223–1231, 1 nov. 2020.

LANGARO, E. A. **Estudo de diagnóstico e inibição da reação álcali-sílica utilizando cinza volante e proteção de superfície com silicatos**. Curitiba - PR: Universidade Federal do Paraná, 2023.

LANGARO, E. A. et al. **Use of slag (GBFS) generated in charcoal blast furnace as raw material in alkali-activated cement**. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2020.

LARIVE, C.; LAPALUD, A.; COUSSY, O. The role of water in alkali-silica reaction. **Proceedings of the eleventh international conference on aar**. Québec City, 2000.

LEE, N. K.; JANG, J. G.; LEE, H. K. Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 239–248, 2014.

LEEMANN, Andreas et al. ASR prevention - Effect of aluminum and lithium ions on the reaction products. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 192–201, 15 jun. 2015.

LEEMANN, Andreas; MÜNCH, Beat. The addition of caesium to concrete with alkali-silica reaction: Implications on product identification and recognition of the reaction sequence. **Cement and Concrete Research**, v. 120, p. 27–35, 1 jun. 2019.

LEEMANN, Andreas; SHI, Zhenguo; LINDGÅRD, Jan. Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 137, 1 nov. 2020a.

LEEMANN, Andreas; SHI, Zhenguo; LINDGÅRD, Jan. Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 137, 1 nov. 2020b.

LEI, Jiawei; KUMAR, Dhanendra; YANG, En Hua. Effect of pore solution alkalinity on alkali-silica reaction (ASR) in metakaolin-based geopolymer. **Structural Concrete**, 2024.

LI, Chen et al. Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective. **Cement and Concrete Composites**, v. 139, 1 maio 2023.

LI, Ning; FARZADNIA, Nima; SHI, Cajun. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 100, p. 214–226, 1 out. 2017.

LI, Zhenming et al. Chemical deformation of metakaolin based geopolymer. **Cement and Concrete Research**, v. 120, p. 108–118, 1 jun. 2019a.

LI, Zhenming et al. Mitigating the autogenous shrinkage of alkali-activated slag by metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 30–41, 1 ago. 2019b.

LINDGÅRD, J.; RODUM, E.; PEDERSEN, B. Field experience from Alkali-Silica Reactions in Concrete—Relationship between Water Content and Observed Damage on Structures. **Paper submitted to the Seventh CANMET.** In: **ACI International Conference on Durability of Concrete**, 2006.

LINDGÅRD, Jan et al. Alkali-silica reaction (ASR) - Performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 68–90, 2013.

LINGARD, J. et al. Alkali–silica reaction (ASR)— performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 68–90, 2013.

MACIOSKI, Gustavo. **Aplicação de sensores em fibra ótica com rede Bragg na avaliação da reação álcali-sílica**. Curitiba - PR: [S.n.].

MAHANAMA, D. Avaliação do efeito do GGBFS na reação alcalino-sílica em argamassa geopolimérica com teste de barra de argamassa acelerada. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 1–11, 2019.

MARQUES, M. **Estudo da reação álcali-agregado na tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais**. Tese (Doutorado)—[S.I.]: Universidade Estadual Paulista, 2009.

MARTIN, Renaud Pierre et al. Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal Swelling Reaction (ISR) mechanisms in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 956–964, 15 dez. 2017.

MARZOUK, H.; LANGDON, S. The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, p. 549–556, 2003.

CCARTNEY DA FONSECA, Juliana Maria et al. Alkali-Aggregate Reaction: Definition, Influence and Control. **Engineering and Applied Sciences**, v. 3, n. 1, p. 12, 2018.

MEDEIROS, M. H. F. et al. **Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve**. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, 2017.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. [S.I. : S.n.]

MOHAMMADI, Afshin; GHIAVAND, Ebrahim; NILI, Mahmoud. **Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review**. **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 20 out. 2020.

MORAES, M. C. et al. Alkali-Activated Cement Subject to Alkali-Aggregate Reaction. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 5, 1 set. 2021.

MOREIRA, Kelvy Maria de Vasconcelos *et al.* Alkali-silica reaction: understanding the phenomenon. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 1, 1 dez. 2021.

MOSESON, A. *et al.* Socio-political dimensions of introducing novel green cement for slum development in Mumbai, India. **Presented at the 18th International Sustainable Development Research Conference, University of Hull**, 2012.

MULTON, Stéphane; TOUTLEMONDE, François. Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 6, p. 924–934, jun. 2010.

MUSEU DE MINERAIS, Minérios e Rochas Heinz Ebert. Banco de Dados do Museu Heinz Ebert. 2017.

NAJAFI KANI, Ebrahim; ALLAHVERDI, Ali; PROVIS, John L. Efflorescence control in geopolymers binders based on natural pozzolan. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 25–33, jan. 2012.

NAQI, Ali; JANG, Jeong Gook. **Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: A review**. **Sustainability (Switzerland)** MDPI, , 21 jan. 2019.

NASIR, Muhammad *et al.* Magnesium sulfate resistance of alkali/slag activated silico-manganese fume-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 265, 30 dez. 2020.

NATH, S. K.; KUMAR, Sanjay. Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 924–930, jan. 2013.

NEDELJKOVIĆ, Marija *et al.* Carbonation Resistance of Alkali-Activated Slag Under Natural and Accelerated Conditions. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 4, n. 1, p. 33–49, 1 mar. 2018.

NEDELJKOVIĆ, Marija; LI, Zhenming; YE, Guang. Setting, strength, and autogenous shrinkage of alkali-activated fly ash and slag pastes: Effect of slag content. **Materials**, v. 11, n. 11, 29 out. 2018.

OLAJIDE, Olusola D.; NOKKEN, Michelle R.; SANCHEZ, Leandro F. M. **Alkali–Silica Reactions: Literature Review on the Influence of Moisture and Temperature and the Knowledge Gap**. **Materials** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 jan. 2024.

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

PAGAN HASPARYK, Nicole. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul Escola De Engenharia Programa De Pós Graduação Em Engenharia Civil Investigação De Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado E Caracterização Avançada Do Gel Exsudado. [S.I.: S.n.]

PALACIOS, M.; PUERTAS, F. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 691–702, maio 2007.

PALOMO, A. et al. **Portland Versus Alkaline Cement: Continuity or Clean Break: “A Key Decision for Global Sustainability”**. Frontiers in ChemistryFrontiers Media S.A., , 11 out. 2021.

PARUTHI, Sagar et al. A review on material mix proportion and strength influence parameters of geopolymers concrete: Application of ANN model for GPC strength prediction. 2022.

PAUDEL, Shree Raj; YANG, Mijia; GAO, Zhili. pH Level of Pore Solution in Alkali-Activated Fly-Ash Geopolymer Concrete and Its Effect on ASR of Aggregates with Different Silicate Contents. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 9, set. 2020.

PAYÁ, J. et al. Alternative activators in alkali-activated cements. **Revista Alconpat**, v. 12, n. 1, p. 16–31, 1 jan. 2022.

PELISSER, Fernando et al. Compressive strength, modulus of elasticity and hardness of geopolymers cement synthesized from non-calcined natural kaolin. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, 20 jan. 2021.

PENTTALA, V. **Causes and mechanisms of deterioration in reinforced concrete**. [S.l.]: Woodhead Publishing Limited, 2009.

PERILLI, D. Update on cement at COP28. **Analysis, Global Cement**, 2025.

PUERTAS, F. et al. Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 5, p. 277–284, maio 2009.

PUERTAS, F. et al. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, n. 12, p. 2043–2056, 2011.

QIAN, Yuanshun et al. Alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in Portland cement and alkali-activated slag mortars: Pessimum effect investigation. **Journal of Building Engineering**, v. 89, 15 jul. 2024.

RAFFETTI, Elena; TRECCANI, Michele; DONATO, Francesco. **Cement plant emissions and health effects in the general population: a systematic review**. ChemosphereElsevier Ltd, , 1 mar. 2019.

RAJABIPOUR, F. Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, p. 130–146, 2015.

RASHAD, A. Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil Engineer – an overview. **Constr Build Mater**, 2013.

RAUT, Ashwin Narendra; LAL MURMU, Anant; ALOMAYRI, Thamer. Physico-Mechanical and thermal behavior of prolong heat Cured geopolymer blocks. **Construction and Building Materials**, v. 370, p. 130309, 2023.

RIVARD, Patrice *et al.* Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1147–1153, ago. 2003.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael A. *et al.* Eco-house prototype constructed with alkali-activated blocks: Material production, characterization, design, construction, and environmental impact. **Materials**, v. 14, n. 5, p. 1–20, 1 mar. 2021.

RODRÍGUEZ, E. *et al.* Alternative concrete based on alkali-activated slag. **Materiales de Construcción**, v. 58, p. 53–67, 2008.

RUIZ-NUÑEZ, Fernanda; WEI, Zichao. **Infrastructure Investment Demands in Emerging Markets and Developing Economies**. [S.I.: S.n.]. Disponível em: <<http://econ.worldbank.org/>>.

SAHOO, Soumyaprakash; SINGH, Suresh Prasad. Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers. 2022.

SAN NICOLAS, R. Distinctive microstructural features of aged sodium silicate-activated slag concretes. **Cement and Concrete Research**, p. 41–51, 2014.

SANCHEZ, L. F. **Contribuição Ao Estudo Dos Métodos De Ensaio Na Avaliação Das Reações Álcali-Agregado Em Concretos**. Dissertação (Mestrado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

SANCHEZ, L. F. et al. . Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**, p. 213–229, 2014.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 74–92, 2015a.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 20–32, 15 fev. 2015b.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Tools for assessing damage in concrete affected by AAR coming from fine and coarse aggregates. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 1, p. 84–91, fev. 2017.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* **Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates**. **Cement and Concrete Research**, 2014.

SANCHEZ, L. F. M. et al. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). *Cement and Concrete Research*, 2015.

SANCHEZ, L. F. M. et al. Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction. *Construction and Building Materials*, 2016a.

SANCHEZ, L. F. M. et al. Use of Damage Rating Index to Quantify Alkali-Silica Reaction Damage in Concrete: Fine versus Coarse Aggregate. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 2016b.

SANCHEZ, L. F. M.; KUPERMAN, S. C.; HELENE, P. Uso do método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT) para avaliação da reação álcali-agregado (RAA). *IBRACON Structures and Materials Journal*, p. 575–581, 2011.

SATO, F. H. Monitoramento de umidade em concreto de barragem de usina hidroelétrica para estudo de reação álcali-agregado e utilização de correlação de imagens digitais. Tese (Doutorado)—[S.I.]: Universidade Estadual Paulista, 2017.

SHEHATA, H. S. M.; THOMAS, M. D. A. The role of alkali content of Portland cement on the expansion of concrete prisms containing reactive aggregates and supplementary cementing materials. *Cement and Concrete Research*, p. 621–628, 2015.

SHEHATA, Medhat H.; THOMAS, Michael D. A. Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 3, p. 341–349, mar. 2002.

SHI, Caijun et al. A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with alkali-reactive aggregates. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 48, n. 3, p. 621–628, 2015a.

SHI, Caijun; FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.; PALOMO, Angel. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. 2011.

SHI, Z. Comparison of alkali-sílica reactions in alkali-activated slag and Portland cement mortars. *Materials and Structures*, p. 743–751, 2015.

SHI, Z. Effect of alkali dosage on alkali-silica reaction in sodium hydroxide activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, p. 743–751, 2017.

SHI, Z. Effects of alkali dosage and silicate modulus on alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, p. 104–115, 2018.

SHI, Zhenguo et al. Comparison of alkali-silica reactions in alkali-activated slag and Portland cement mortars. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 48, n. 3, p. 743–751, 2015b.

SILVA, P. N. Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso/CHESF. Influência da reação nas propriedades do concreto. Tese (Doutorado)—[S.I.]: Universidade de São Paulo, 2007.

ŠIMONOVÁ, Hana *et al.* Mechanical fracture and fatigue characteristics of fine-grained composite based on sodium hydroxide- activated slag cured under high relative humidity. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 1, p. 1–20, 1 jan. 2021.

SINGH, Jagmeet; SINGH, S. P. Evaluating the alkali-silica reaction in alkali-activated copper slag mortars. **Construction and Building Materials**, v. 253, 30 ago. 2020.

SINHA, Arkabrata; WEI, Jianqiang. Phase evolution and mechanical-hydroscopic properties of alkali-silica reaction gels modified by magnesium nitrate. **Cement and Concrete Composites**, v. 144, p. 105283, 1 nov. 2023.

SINNO, N.; PIERSANTI, M. H.; SHEHATA, M. H. Effect of sample geometry and aggregate type on expansion due to alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 738–747, 2019.

ŚŁOSARCZYK, Agnieszka *et al.* A literature review of the latest trends and perspectives regarding alkali-activated materials in terms of sustainable development. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 25, p. 5394–5425, 1 jul. 2023.

SMAOUI, N. et al. Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. Part I: Experimental study. **Canadian Journal of Civil Engineering**, p. 826–845, 2004.

SONG, Keum Il *et al.* Carbonation characteristics of alkali-activated blast-furnace slag mortar. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, 2014.

SOUZA, D. J. D. **Avoiding & Mitigating alkali-aggregate reaction (AAR) in concrete structures**. Tese (Doutorado)—Ottawa, Canadá: University of Ottawa, 2022.

SUN, Jianwei; CHEN, Zhonghui. Effect of silicate modulus of water glass on the hydration of alkali-activated converter steel slag. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, n. 1, p. 47–56, 1 out. 2019.

SWENSON, E. G.; GILLOT, J. Alkali-Carbonate Rock Reaction. **Highway Research Record**, p. 21–40, 1964.

TALLING, B.; BRANDSTETR, J. Present State and Future of Alkali-Activated Slag Concretes. **ACI Special Publication**, p. 1519–1546, 1989.

TANESI, Jussara. What You Should Know About Alkali-Silica Reactivity in Concrete. **TEAM AET**, 2021.

TÄNZER, R.; JIN, Y.; STEPHAN, D. Efeito dos álcalis inerentes da escória ativada por álcali no risco de reação de sílica alcalina. **Cement and Concrete Research**, p. 82–90, 2017.

TASHIMA, M. M. *et al.* Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica High reactive rice husk ash (RHA): production method and pozzolanic reactivity. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 151–163, 2012.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. [S.I.]: Thomas Telford Publishing, 1997.

TERÁN-CUADRADO, Glenda *et al.* Current and potential materials for the low-carbon cement production: Life cycle assessment perspective. **Journal of Building Engineering**, v. 96, p. 110528, 1 nov. 2024.

THOMAS, M. D. A. The effect of supplementary cementing materials on alkalisilica reaction: A review. **Cement and Concrete Research**, p. 1224–1231, 2011.

THOMAS, M. et al. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 1842–1856, 2006.

THOMAS, Michael *et al.* Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1842–1856, out. 2006.

VILLENEUVE, V. **Determination De L'Endommagement Du Béton Par Méthode Pétrographique quantitative**. Dissertação (Mestrado)—Quebec: Université Laval, 2011.

WAIDNER, M. C. **Identifying Damage, Predicting Expansion, and Determining the Effectiveness of Sealers on Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction and Freeze-Thaw**. Tese (Doutorado)—Arkansas: [S.n.]

WALSH, J. B. The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks. **Geophys Res**, 1965.

WANG, Q. *et al.* Effect of alkali-activator on alkali-aggregate reaction of slag-based geopolymer. In: RILEM Publications SARL, 2010.

WANG, Wei *et al.* Influence of volcanic glass powder on alkali-silica reaction expansion in alkali-activated slag mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 152, 1 set. 2024.

WANG, Wei *et al.* Understanding the influence of slag fineness and water-to-binder ratio on the alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 157, 1 mar. 2025.

WANG, Wei; NOGUCHI, Takafumi; MARUYAMA, Ippei. Mechanism understanding of alkali-silica reaction in alkali-activated materials system. **Cement and Concrete Research**, v. 156, 1 jun. 2022.

WANG, Wei; NOGUCHI, Takafumi; MARUYAMA, Ippei. Effects of alkali cations from silicate activators and exposure conditions on the alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars. **Construction and Building Materials**, v. 451, 15 nov. 2024.

WANG, Y. The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete. **Cement and Concrete Composites**, p. 353–359, 2008.

WANG, Y.; NOGUCHI, T. Alkali-silica reaction (ASR) in the alkali-activated cement (AAC) system: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, 2020.

WHITNEY, D. L. *et al.* Revised classification of metamorphic minerals: recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks. **American Mineralogist**, v. 95, p. 185–187, 2010.

WILLIAMSON, T.; JUENGER, M. C. G. O papel da concentração da solução ativadora na reação álcali-sílica em concreto de cinzas volantes ativado por álcali. **Cement and Concrete Research**, p. 124–130, 2016.

WINNEFELD, Frank *et al.* RILEM TC 247-DTA round robin test: sulfate resistance, alkali-silica reaction and freeze-thaw resistance of alkali-activated concretes. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 53, n. 6, 1 dez. 2020.

WONGSA, Ampol *et al.* Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1069–1080, 10 set. 2018.

WOOD, S. G. Five-hour autoclave test to determine the potential alkaline-silica reactivity of concrete aggregates: a multilaboratory study. **Advances in Civil Engineering Materials**, p. 550–563, 2017.

XIE, Z.; XIANG, W.; XI, Y. Potenciais ASR de agregados de vidro em argamassas de cinzas volantes e cimento Portland ativadas com vidro d'água. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 67–74, 2003.

XUE, Lili; ZHANG, Zuhua; WANG, Hao. **Hydration mechanisms and durability of hybrid alkaline cements (HACs): A review**. **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd., , 10 jan. 2021.

YAMAZAKI, Yuto *et al.* Physical and chemical relationships in accelerated carbonation conditions of alkali-activated cement based on type of binder and alkali activator. **Polymers**, v. 13, n. 4, p. 1–17, 2 fev. 2021.

YAN, Zhuhua *et al.* Mechanical performance and reaction mechanism of copper slag activated with sodium silicate or sodium hydroxide. **Construction and Building Materials**, v. 266, 10 jan. 2021.

YANG, Mijia; GAO, Zhili (Jerry). Alkali-aggregate reaction in alkali-activated cement concretes. In: PACHECO-TORGAL, Fernando; CHINDAPRASIRT, Prinya; OZBAKKALOGLU, Togay (Orgs.). **Handbook of Advances in Alkali-Activated Concrete**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2022. p. 403–429.

YANG, Shuqing *et al.* In-situ alkali-silica reaction evolution of lightweight aggregate concretes prepared with alkali-activated cement and ordinary portland cement assessed by X-ray micro computed-tomography. **Cement and Concrete Composites**, v. 140, p. 105108, 2023.

YANG, Shuqing; POON, Chi Sun; CUI, Hongzhi. Alkali-silica reactivity of lightweight aggregates in alkali-activated slag cement and ordinary Portland cement systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 390, 1 mar. 2023.

YANG, Tao *et al.* ASR potential of nickel slag fine aggregate in blast furnace slag-fly ash geopolymer and Portland cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 262, 30 nov. 2020.

YAO, Xupei *et al.* Academic Editors: Mingrui Du, Probabilistic Embodied Carbon Assessments for Alkali-Activated Concrete Materials. **Sustainability**, v. 17, n. 152, p. 1–23, 2024.

YOU-ZHI, Chen *et al.* **Alkali Aggregate Reaction in Alkali Slag Cement Mortars.** [S.I.: S.n.].

YUJIANG, W.; MIN, D.; MINGSHU, T. Alkali release from aggregate and the effect on AAR expansion. **Materials and Structures**, p. 159–171, 2008.

ZAKKA, Wyom Paul *et al.* A scientometric review of geopolymer concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124353, 2020.

ZAMBOTTO, D. **Estudo preliminar dos efeitos da reação álcali-agregado das respostas estruturais de pavimentos de concreto.** Tese (Doutorado)—[S.I.]: Universidade de São Paulo, 2014.

ZHANG, Binyu; HE, Pingping; POON, Chi Sun. Optimizing the use of recycled glass materials in alkali activated cement (AAC) based mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, 10 maio 2020.

ZHANG, Jian *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.

ZHANG, Su-Lei *et al.* Effect of a novel hybrid TiO₂-graphene composite on enhancing mechanical and durability characteristics of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, v. 275, p. 122154, 2021.

ZHENGUO, S.; BIN, M.; LOTHENBACH, M. Effect of Al on the formation and structure of alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, p. 153–173, 2021.