



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
INFRAESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

RODRIGO FRANCKLIN LOPES FIGUEIREDO

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: POTENCIAL REATIVO DOS AGREGADOS  
MIÚDOS PROVINDOS DAS JAZIDAS DOS MUNICÍPIOS DE FERREIRA GOMES,  
MACAPÁ E PORTO GRANDE NO ESTADO DO AMAPÁ

Tucuruí - PA

2024

RODRIGO FRANCKLIN LOPES FIGUEIREDO

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: POTENCIAL REATIVO DOS AGREGADOS  
MIÚDOS PROVINDOS DAS JAZIDAS DOS MUNICÍPIOS DE FERREIRA GOMES,  
MACAPÁ E PORTO GRANDE NO ESTADO DO AMAPÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Tucuruí – PA

2024

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

---

F475r Figueiredo, Rodrigo Francklin Lopes.  
Reação álcali-agregado: potencial reativo dos agregados  
miúdos provindos das jazidas dos municípios de Ferreira  
Gomes, Macapá e Porto Grande no Estado do Amapá /  
Rodrigo Francklin Lopes Figueiredo. — 2024.  
101 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2024.

1. Reação álcali-agregado. 2. potencial reativo. 3.  
agregado miúdo. I. Título.

CDD 624

---

RODRIGO FRANCKLIN LOPES FIGUEIREDO

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: POTENCIAL REATIVO DOS AGREGADOS  
MIÚDOS PROVINDOS DAS JAZIDAS DOS MUNICÍPIOS DE FERREIRA GOMES,  
MACAPÁ E PORTO GRANDE NO ESTADO DO AMAPÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Aprovado em 29 de fevereiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

---

Doutor / Paulo Sérgio Lima Souza / UFPA - Orientador

---

Doutora / Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro / UFPA

---

Doutor / Alexandre Silva de Vargas / UFSM

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha gratidão à minha mãe, pai, namorada e familiares pelo apoio constante, incentivo e fortaleza que me proporcionam.

Ao meu Orientador Dr. Paulo Sérgio Lima Souza, por ter aceito meu projeto, pelas orientações, e por tê-lo adequado e lapidado até chegamos nesta pesquisa, agradeço imensamente pelos contatos realizados para viabilização do projeto, e por sua contribuição na minha formação científica e profissional.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Alexandre Silva de Vargas e Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À UFPA, IFAP, UNIFAP e Empresa CMT, pela liberdade na utilização dos equipamentos do laboratório de engenharia, assim como a equipe técnica dos laboratórios, pela disponibilidade e auxílio técnico na realização deste trabalho.

À FINEP e à rede LABNANO-AMAZON/UFPA pelo apoio através das instalações de MEV utilizadas no presente trabalho.

Um agradecimento especial à equipe docente do PPGINDE por compartilhar sabedoria e oferecer suporte e incentivo durante minha jornada acadêmica.

Ao Setor Produtivo Mineral do Amapá, pelo fornecimento de dados e localização das jazidas.

A todos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O concreto é um dos materiais mais empregados na engenharia, seu desempenho e durabilidade podem ser alterados por vários processos de deterioração, sendo imprescindível que materiais utilizados em sua composição sejam analisados e adequados para cada tipo de obra. Dentre estes processos tem-se a reação álcali-agregado (RAA) que é conceituada como um processo químico que ocorre entre os componentes alcalinos do cimento e certos tipos de agregados reativos, podendo resultar no surgimento de produtos expansivos que causem danos estruturais ao concreto (Neville, 1997). O objetivo deste trabalho é analisar o potencial reativo dos agregados miúdos, especificamente o potencial álcali-reativo de 8 amostras de areia oriundas das principais jazidas dos municípios de Ferreira Gomes, Macapá e Porto Grande no Estado do Amapá (AP), a motivação desta pesquisa se deu devido à falta de dados referentes a reatividade dos agregados miúdos no Estado e como forma de prevenção da ocorrência da reação álcali-sílica (RAS). Para esta avaliação, o primeiro ensaio utilizado foi o método acelerado de barras de argamassa seguindo a NBR 15577 – 4 (ABNT, 2018). Além deste, de forma auxiliar foi empregado o método químico seguindo a NBR 9774 (ABNT, 2008), assim como a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplada, estes a fim de observar a microestrutura das barras, verificar a presença ou não de produtos que evidenciem a ocorrência da RAA e através da análise química elementar semiquantitativa identificar as substâncias presentes nas barras. Os resultados apontaram no método acelerado que as amostras coletadas não possuem potencial deletério, pois as barras não alcançaram 0,19% de expansão, o maior percentual de expansão foi de 0,12% na Jazida Translima (J7), este comportamento inócuo foi ratificado com o emprego do método químico. Quanto a utilização do MEV, não se constatou a formação do gel relacionado a RAS. Ao final realizou-se o mapeamento dos agregados reativos e constatou-se que os agregados são inócuos e podem ser utilizados de maneira satisfatória no que se refere a RAS.

**Palavras-chave:** Reação álcali-agregado; potencial reativo; agregado miúdo.

## ABSTRACT

The concrete is one of the most employed materials in engineering, its performance and durability can be altered by various deterioration processes, making it essential that materials used in its composition be analyzed and suitable for each type of construction. Among these processes, there is the alkali-aggregate reaction (AAR), which is defined as a chemical process that occurs between the alkaline components of cement and certain types of reactive aggregates, which can result in the emergence of expansive products that cause structural damage to concrete (Neville, 1997). The objective of this work is to analyze the reactive potential of fine aggregates, specifically the alkali-reactive potential of 8 sand samples from the main deposits in the municipalities of Ferreira Gomes, Macapá, and Porto Grande in the state of Amapá (AP). The motivation for this research arose due to the lack of data regarding the reactivity of fine aggregates in the state and as a preventive measure against the occurrence of alkali-silica reaction (ASR). For this evaluation, the first test used was the accelerated mortar bar method following NBR 15577 - 4 (ABNT, 2018). In addition to this, the chemical method following NBR 9774 (ABNT, 2008) was employed as an auxiliary, as well as scanning electron microscopy (SEM) with energy-dispersive spectroscopy (EDS) attached, in order to observe the microstructure of the bars, verify the presence or absence of products that evidence the occurrence of AAR, and through semi-quantitative elemental chemical analysis, identify the substances present in the bars. The results indicated in the accelerated method that the collected samples do not have deleterious potential, as the bars did not reach 0.19% expansion; the highest percentage of expansion was 0.12% in the Translima Deposit (J7), this innocuous behavior was confirmed with the use of the chemical method. Regarding the use of SEM, the formation of the gel related to ASR was not observed. Finally, the mapping of reactive aggregates was carried out, and it was found that the aggregates are innocuous and can be used satisfactorily regarding ASR.

**Keywords:** Alkali-aggregate reaction; reactive potential; fine aggregate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores mais relevantes para a ocorrência da reação álcali-agregado (RAA) .....	22
Figura 2 – Representação da estrutura do dióxido de silício cristalino (a) e do dióxido de silício não cristalino (b).....	24
Figura 3 - Esquema do Processo da RAS .....	27
Figura 4 - Etapas do processo da reação álcali-agregado.....	28
Figura 5 - Identificação dos elementos da barra de argamassa para realização do ensaio experimental .....	29
Figura 6 - Morfologias típicas da RAS obtidos com MEV – microscópio eletrônico de varredura e EDS - Espectroscopia de energia dispersiva .....	31
Figura 7 - Relação entre ganho de massa e tempo utilizando cimento Portland e agregado reativo .....	32
Figura 8 - Fissuras em forma de mapa decorrentes da RAS em um píer.....	33
Figura 9 – Características petrográficas de testemunhos da estrutura com RAS apresentando fissuras e descolamento em distintas áreas da argamassa.....	33
Figura 10 - Exemplos de minerais que podem conter sílica reativa.....	37
Figura 11 - Efeito da umidade na expansão do concreto devido à RAA.....	38
Figura 12 - Expansão para diferentes composições de ligantes feitas com agregado miúdo reativo (TX).....	40
Figura 13 - Utilização de SCMs no combate a RAS.....	41
Figura 14 – A) Registro do MEV nos pontos que a microscopia Raman foi utilizada; B) relação do Cálcio nos produtos da RAS medidas por EDS.....	43
Figura 15 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa .....	46
Figura 16 - Localização dos municípios no estado do Amapá, destaque para os municípios de Ferreira Gomes, Macapá e Porto Grande onde foram coletados os agregados miúdos.....	47
Figura 17 - Vista geral dos locais de coleta dos agregados miúdos utilizados na pesquisa, contemplando as jazidas: J1; J2; J3; J4; J5; J6; J7 e J8 .....	48
Figura 18 - Registros macroscópicos e microscópicos da amostra de areia da J2, submetida a análise petrográfica pela NBR 7389-1 (ABNT, 2009) .....	52
Figura 19 - Execução das etapas do método acelerado de barras de argamassa conforme NBR 15577-4 (2018).....	54

Figura 20 – Equipamentos utilizados no método acelerado em barras de argamassa: Pórtico, termorregulador e comparador de comprimentos .....	56
Figura 21 - Reatores utilizados para colocação das amostras de agregados miúdos na execução do método químico .....	57
Figura 22 - Equipamentos utilizados durante a execução do método químico seguindo NBR 9774 (2008) .....	58
Figura 23 – MEV com EDS acoplado para realização da análise morfológica e análise química semiquantitativa, respectivamente .....	59
Figura 24 - Fragmentos da demolição das amostras submetidas ao método acelerado de barras de argamassa utilizados na investigação morfológica .....	60
Figura 25 - Resultados individualizados da expansão das barras de argamassa em função do tempo.....	62
Figura 26 - Síntese dos resultados da expansão das barras de argamassa em função do tempo, contendo a classificação do grau de reatividade do agregado seguindo NBR 15577-1 (2018).....	63
Figura 27 - Registro da análise visual da barra de argamassa após método acelerado, A) Conforme Tiecher (2006); B) Segundo Costa e Tiecher (2018) .....	65
Figura 28 - Registro da análise visual da barra de argamassa J7-I após o método acelerado em barras de argamassa .....	65
Figura 29 - Produtos semelhantes ao gel da RAS presentes na amostra compostos por silicato de potássio-sódio-cálcio .....	72
Figura 30 - Micrografia da superfície de fratura da barra J7-I. A) ampliação de 2000x; B) mapeamento dos elementos ferro (verde claro), cálcio (laranja), alumínio (amarelo), silício (verde) e oxigênio (vermelho); C) Espectro da soma de mapas .....	73
Figura 31 – Micrografia da superfície de fratura da barra J7-II. A) ampliação de 2000x; B) mapeamento dos elementos cálcio (azul), oxigênio (verde) e silício (vermelho); C) Espectro da soma de mapas .....	75
Figura 32 - Micrografia da superfície de fratura da barra J8-II. A) ampliação de 4000x; B) mapeamento dos elementos enxofre (verde escuro), silício (laranja), alumínio (azul), oxigênio (verde claro) e cálcio (vermelho); C) Espectro da soma de mapas..	77
Figura 33 - Micrografia da superfície de fratura da barra J8-III. A) ampliação de 1000x; B) mapeamento dos elementos magnésio (roxo), alumínio (verde escuro), cálcio (azul), oxigênio (verde claro) e silício (vermelho); C) Espectro da soma de mapas..	78

Figura 34 - Micrografia da superfície de fratura da barra J8-III. A) ampliação de 2500x; B) mapeamento dos elementos rubídio (roxo), cálcio (verde escuro), silício (laranja), oxigênio (verde claro) e carbono (vermelho); C) Espectro da soma de mapas .....80

Figura 35 - Mapeamento dos agregados quanto a reatividade .....81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades químicas do CPV ARI.....	49
Tabela 2 - Propriedades físicas do CPV ARI.....	50
Tabela 3 - Caracterização dos agregados miúdos .....	51
Tabela 4 - Média das expansões das três barras de argamassas das amostras J1 à J8, com classificação da potencialidade reativa .....	61

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Métodos de avaliação da ocorrência da RAS .....	44
Quadro 2 - Coordenadas geográficas das jazidas onde foram coletadas as amostras de agregado miúdo para os ensaios de reatividade potencial com suas respectivas nomenclaturas.....	47
Quadro 3 - Resultados dos ensaios de determinação da potencialidade reativa .....	81

## LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al - Alumínio

$Al_2O_3$  - Óxido de Alumínio

ANM - Agência Nacional de Mineração

AP - Amapá

C - Carbono

$C_6AS_3H_{32}$  - Etringita

Ca - Cálcio

$Ca(OH)_2$  - Portlandita

CaO - Óxido de Cálcio

CCP - Concreto de Cimento Portland

Cl - Cloro

CP's - Corpos de Prova

CPV ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Cs - Césio

C-S-H – Silicatos de cálcio hidratados

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva

Fe - Ferro

$Fe_2O_3$  - Óxidos de Ferro

Fr - Frâncio

HCL – Ácido clorídrico

K - Potássio

$K^+$  - Íons de Potássio

$K_2O$  - Óxido de Potássio

KOH - Hidróxido de potássio

Li - Lítio

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

Mg - Magnésio

MgO - Óxido De Magnésio

Na - Sódio

$Na^+$  - Íons de Sódio

Na<sub>2</sub>O - Óxido de Sódio

Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> - Equivalente Alcalino ( $0,658 \times K_2O\% + Na_2O\%$ )

NaOH - Hidróxido de Sódio

NBR - Norma Regulamentadora Brasileira

O – Oxigênio

OH<sup>-</sup> - Íons Hidroxila

PF - Perda ao fogo

R<sub>a</sub> - Redução da Alcalinidade

RAA - Reação Álcali-Agregado

RAC - Reação Álcali-Carbonato

RAS - Reação Álcali-Sílica

RASS - Reação Álcali-Silicato

Rb – Rubídio

RI - Resíduo Insolúvel

S - Enxofre

SCMs - Materiais de Cimentação Suplementares

S<sub>d</sub> - Determinações da Sílica Dissolvida

Si - Silício

SiO<sub>2</sub> – Dióxido de Silício

SiOH - Silanol

SO<sub>3</sub> - Anidrido Sulfúrico

Ti -Titânio

Zn – Zinco

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	20
1.1.1 Objetivo geral .....	20
1.1.2 Objetivos específicos .....	20
1.2 LIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	20
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO</b> .....	<b>22</b>
2.1 DEFINIÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	22
2.2 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	23
2.2.1 Reação álcali-sílica (RAS) .....	23
2.2.2 Reação álcali-carbonato (RAC) .....	25
2.3 MECANISMOS DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA .....	26
2.3.1 Processo da RAS .....	26
2.3.2 Argamassa e o produto da RAS .....	28
2.3.3 Efeitos nocivos mais frequentes resultantes da RAS .....	32
2.4 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM A RAA .....	34
2.4.1 Álcalis no cimento .....	35
2.4.2 Agregados .....	36
2.4.3 Umidade e temperatura .....	37
2.4.4 Adições minerais .....	39
2.4.5 Cálcio.....	42
2.5 MÉTODOS UTILIZADOS PARA INVESTIGAÇÃO DA RAS .....	43
<b>3 ETAPA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>46</b>
3.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	46
3.2 DETERMINAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	49
3.2.1 Cimento .....	49
3.2.2 Água .....	50
3.2.3 Agregado miúdo .....	50
3.3 REATIVIDADE POTENCIAL - MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA.....	53
3.3.1 Granulometria requerida da areia, preparação da argamassa e molde das barras .....	53
3.3.2 Cura inicial, aceleração da reação e leituras das barras.....	55
3.4 REATIVIDADE POTENCIAL - MÉTODO QUÍMICO.....	56

3.5 ANÁLISE DA ARGAMASSA PELA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROMETRIA POR ENERGIA DISPERSA (EDS).....	58
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>61</b>
4.1 REATIVIDADE POTENCIAL – MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA .....	61
4.2 REATIVIDADE POTENCIAL – MÉTODO QUÍMICO AUXILIAR .....	66
4.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA COM AUXÍLIO DO MEV E COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR SEMIQUANTITATIVA POR MEIO DO EDS .....	71
4.3.1 MEV com EDS - Agregado encoberto por frações de pasta cimentícia.....	73
4.3.2 MEV com EDS - Composição do agregado miúdo.....	74
4.3.3 MEV com EDS - Formação dos produtos portlandita e etringita resultantes da hidratação do cimento .....	76
4.3.4 MEV com EDS - Zona de transição entre pasta e agregado .....	78
4.3.5 MEV com EDS - Microfissuras na argamassa.....	79
4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS E MAPEAMENTO DOS AGREGADOS REATIVOS .....	81
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>82</b>
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A princípio, o concreto projetado e executado de maneira adequada possui alta durabilidade, contudo no decorrer de sua utilização suas propriedades e sua microestrutura podem ser alteradas, devido principalmente aos materiais utilizados na composição, assim como por meio das interações ambientais sofridas ao longo do tempo.

Segundo Kolawole, Combrinck e Boshoff (2020), Kolawole *et al.* (2020), Fanijo, Babafemi e Arowojolu (2020) o concreto de cimento Portland (CCP) é composto por aproximadamente 70% de agregados. Conexo a isso, há elementos que podem induzir o aparecimento de fissurações em estruturas de concreto, os fatores ligados a estes aparecimentos vão desde corrosão das armaduras e carbonatação até ataques por sulfatos e reação álcali-agregado. O último citado tem sido objeto de constantes estudos, sendo o precursor de sua investigação Stanton (1940). Neste marco na história, Stanton conduziu análises na barragem de Parker Dam, nos EUA, após sua construção que finalizou em 1938. Nos estudos desta obra, o pesquisador identificou reatividade nas fases não cristalinas dos agregados com os álcalis presentes no cimento.

Priszkulnik (2005) cita que no Brasil a RAA foi identificada e estudada a partir da década de 60 na construção da barragem de Jupia, no qual pesquisadores realizando análises nos agregados utilizados no concreto e constataram a presença de minerais reativos com os álcalis do cimento. A partir desse marco, as pesquisas e ensaios relacionados a reação álcali-agregado vem em crescente escala nacional, andando em paralelo com a procura e refinamento de técnicas de prevenção e mitigação para minimizar os efeitos deletérios dessa complexa reação.

Aproximadamente 90 anos após o primeiro registro da ocorrência, progressões foram alcançadas sobre tal reação, estudos e ensaios abrangendo métodos para identificação da RAA, tal qual ensaios para a avaliação da reatividade dos agregados. Poole (1992) cita alguns fatores que interferem para o início da expansão do gel, tais como teor de álcalis no cimento e condições de temperatura e umidade. No entanto, ainda não há métodos que comprovem a interrupção da reação de maneira eficaz, sendo assim, a prevenção e investigação das condições locais e dos materiais é o direcionamento adotado por pesquisadores e trabalhadores do ramo.

Fanijo, Kolawole, Almakrab (2021) e RILEM (2021) afirmam que a reação química identificada como reação álcali-agregado resulta na formação de um

composto, especificamente um gel da reação álcali-sílica (RAS), que ao entrar em contato com a água se expande, gerando tensões e conseqüentemente fissurações no concreto. Ainda segundo os autores, a presença de estruturas amorfas ou mal cristalizadas reativas oriundas de determinados agregados naturais, quando associadas aos íons hidroxila presentes no cimento Portland e eventuais aditivos, desencadeiam a reação na presença da solução nos poros do concreto.

Furnas (1997) explana quais os fenômenos mais notórios decorrentes da reação, sendo eles: presença de manchas e exsudação do gel na superfície do concreto, fissuras não sistemáticas na superfície da estrutura assumindo padrões de mapa, e até mesmo deslocamento de elementos estruturais. Para Fanijo, Kolawole, Almakrab (2021), a reação prejudicial provoca um incremento de volume devido ao gel formado, desta forma provocando fissurações no concreto, fatos que possuem potencial de resultar em uma deterioração considerável nas estruturas de concreto.

Os materiais à base de cimento Portland estão sujeitos a processos químicos, físicos e mecânicos, podendo levar a deterioração do material. Neste contexto, o foco deste estudo recai sobre um processo químico, especificamente a reação álcali-sílica, fenômeno que desencadeia reações químicas internas nas estruturas de concreto, envolvendo a água, elementos provenientes do cimento que são os hidróxidos alcalinos e elementos oriundos dos agregados que são os minerais reativos. Estas interações contribuem para a redução da vida útil do material.

No Estado do Amapá há análises pontuais acerca dos agregados em relação a sua reatividade, contudo em laboratórios fora do Estado realizadas pelas construtoras interessadas na reatividade do agregado. Mediante esta situação, e sabendo que qualquer estrutura de concreto que tenha agregado reativo e esteja em ambiente úmido está sujeita a deterioração pela reação álcali-agregado, há necessidade de um estudo mais abrangente e sistemático visando identificar a presença de agregados miúdos reativos no Estado.

Lima e Oliveira (2020) apontam a ocorrência dessa reação química devido a interação dos álcalis presentes no cimento Portland e agregados reativos com a presença constante de umidade, e destacam que esses aspectos tornam as pesquisas que analisam e identificam os agregados de extrema relevância, pois as características destes mudam dependendo da região e do local que são extraídas.

Portanto este trabalho tem como objetivo identificar a presença de agregados miúdos reativos nos municípios de Ferreira Gomes/AP, Macapá/AP e Porto

Grande/AP, considerando os aspectos regionais, o clima marcado por elevada umidade, temperaturas consistentemente elevadas, atividade extrativista mineral e relações sociais e econômicas. Desta forma, tem-se a localização destes municípios dentro da microrregião de Macapá.

As Microrregiões Geográficas se delimitam como partes das Mesorregiões, sendo caracterizadas por suas especificidades quanto à estrutura da produção industrial, pesqueira, agropecuária e extrativa mineral. Para compreender as especificidades da estrutura produtiva, também se faz uso de informações sobre o quadro natural e a respeito de relações sociais e econômicas particulares, as quais compõem a vida de relações locais pela possibilidade de atender à população mediante setores sociais básicos, comércio de varejo ou atacado (Nascimento, Souza, Oliveira, 2021).

Nesse contexto, os autores destacam que a composição da microrregião de Macapá engloba os municípios de Macapá, Porto Grande, Ferreira Gomes, Cutias, Itaúbal, Santana, Serra do Navio e Pedra Branca do Amapari. A escolha específica por municípios dentro desta microrregião é justificada não apenas pela sua representatividade geográfica, mas também pela relevância dos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes, que se destacam como principais fornecedores de agregados para a construção civil, e por Macapá ser a capital do Estado. Estes municípios desempenham um papel importante no abastecimento de insumos para obras civis e de pavimentação em todo o Estado (Oliveira, 2010).

Jongprateep *et al.* (2018) enfatizam em sua pesquisa que quartzo intensamente deformado ou materiais amorfos, como vidro vulcânico, são mais propensos ao desenvolvimento da reação álcali-sílica (RAS). Este destaque realizado pelo autor reforça a essencialidade da análise da areia, sabendo que o quartzo emerge como elemento fundamental da reação, sendo componente principal dos agregados miúdos, emergindo como material importante a ser analisado para assegurar a qualidade e segurança das obras.

Torna-se evidente a importância de análises aprofundadas e com mapa amostral abrangente dos agregados miúdos utilizados no Estado, passando pela caracterização e delimitação das jazidas, para alcançar como resultado a diminuição das possibilidades de incidência da RAA no concreto e avaliar as propriedades destes agregados. Esse enfoque permitirá a obtenção de dados que contribuem substancialmente para a compreensão das características dos agregados miúdos utilizados no estado do Amapá. A NBR 15577 (ABNT, 2018), com suas respectivas

partes, normatiza e estabelece os procedimentos para avaliação da reatividade e contempla possibilidades de mitigação de ocorrências desta reação.

Esse trabalho torna-se relevante e inovador no meio acadêmico devido o ineditismo no Estado ao tema reação álcali-agregado em diferentes agregados miúdos. Diversos aspectos foram abordados, como: a análise da potencial ocorrência do fenômeno; a determinação da reatividade dos agregados, com uma compreensão detalhada da RAS; e a avaliação da microestrutura dos agregados, incluindo a análise dos minerais presentes.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial reativo das amostras de agregados miúdos provindos das principais jazidas dos municípios de Ferreira Gomes, Macapá e Porto Grande, através do método acelerado de barras de argamassa seguindo a NBR 15577 - 4 (ABNT, 2018).

### 1.1.2 Objetivos específicos

E tendo como objetivos específicos:

- Classificar os agregados segundo o critério de potencialidade reativa frente aos álcalis do cimento;
- Analisar o emprego do ensaio químico como método auxiliar na verificação da reatividade potencial dos agregados miúdos;
- Analisar a morfologia e a composição química elementar das barras de argamassa com o auxílio de MEV-EDS;
- Mapear os agregados miúdos quanto a sua reatividade ou não conforme os métodos utilizados de identificação da RAS.

## 1.2 LIMITAÇÃO DA PESQUISA

Em relação ao aspecto geográfico, um fator limitante pode ser citado, apenas as principais jazidas fornecedoras dos municípios de Ferreira Gomes, Macapá e Porto Grande foram estudadas. Também pode-se citar que a pesquisa teve como foco os estudos voltados para as jazidas fornecedoras de agregado miúdo.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em capítulos, de tal modo que:

O primeiro capítulo apresenta a introdução com considerações iniciais, contextualizando e justificando o tema, contendo como subcapítulos a importância da pesquisa, objetivo e limitações da pesquisa, e por fim, a estruturação do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a reação álcali-agregado, e contempla elementos como a definição, tipos de reação, mecanismo de reação, a importância que o gel da reação tem no processo de fissuração das estruturas, e ao final os fatores que influenciam em sua ocorrência.

O programa experimental está contido no terceiro capítulo, apresenta-se a captação do material utilizado, caracterização das amostras e materiais utilizados para composição da argamassa. Ainda neste tópico, há o preparo das amostras para a determinação da reatividade potencial pelo método acelerado, utilização do método químico de forma auxiliar, e ao final, análises morfológicas das argamassas e composição química elementar semiquantitativa, por meio do MEV e do EDS respectivamente.

No quarto capítulo, é feita uma análise dos resultados obtidos, realizando a condensação dos mesmos em tabelas, quadros, imagens e gráficos. E ao final, o mapeamento com a identificação de todas as jazidas contempladas neste estudo apontando a presença ou não de material com reatividade potencial.

No quinto capítulo, é apresentada as conclusões alcançadas deste trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

### 2.1 DEFINIÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A RAA é um fenômeno químico que pode ocorrer quando há interação entre específicos tipos de agregados e componentes alcalinos contidos no concreto. A reação álcali-agregado pode originar expansão no concreto, trazendo a possibilidade de aparecimento de fissuras e rachaduras que comprometem a integridade estrutural das obras. A compreensão da reação é importante para a construção e manutenção das obras que utilizam o concreto. A definição da RAA está na NBR 15577-1 (ABNT, 2018) sendo:

A reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) associados com os componentes alcalinos sódio e potássio, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, com certas fases minerais que podem estar presentes em agregados graúdos ou miúdos, que, sob certas condições, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa (ABNT, 2018).

A RAA pode ser decomposta em duas categorias, reação intrínseca e extrínseca. A primeira é a mais prevalente e é amplamente associada a diversos patologias no concreto e se manifesta quando há agregados reativos no próprio concreto. Por outro lado, a extrínseca envolve o solo ou a água subterrânea contendo substâncias alcalinas em interação com o concreto (Diamond, 1995). É possível obter as condições necessárias para a ocorrência da reação, que incluem alta concentração de hidróxidos alcalinos, a presença de um agregado reativo e umidade interna no concreto. A Figura 1 apresenta um esquema que ilustra os fatores mais relevantes para ocorrência da RAA.

Figura 1 - Fatores mais relevantes para a ocorrência da reação álcali-agregado (RAA)



Fonte: Couto (2008)

Segundo Qiu *et al.* (2022), a reação química ocorre de maneira esquemática, iniciando a reação pela dissolução da sílica mediante a ação dos íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ), a progressão dessa sequência química é regulada pela taxa de dissolução da sílica, o término da RAS decorre quando a concentração de álcalis na solução porosa não alcança um patamar consideravelmente elevado.

## 2.2 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A categorização dos tipos de reação é essencial para a eficiente implementação de medidas preventivas, visando evitar a expansão do fenômeno. Outrossim, tal classificação permite a identificação de características peculiares referente a cada tipo de reação, potencializando a compreensão e capacidade de resposta para mitigação dos eventuais danos estruturais associados a RAA.

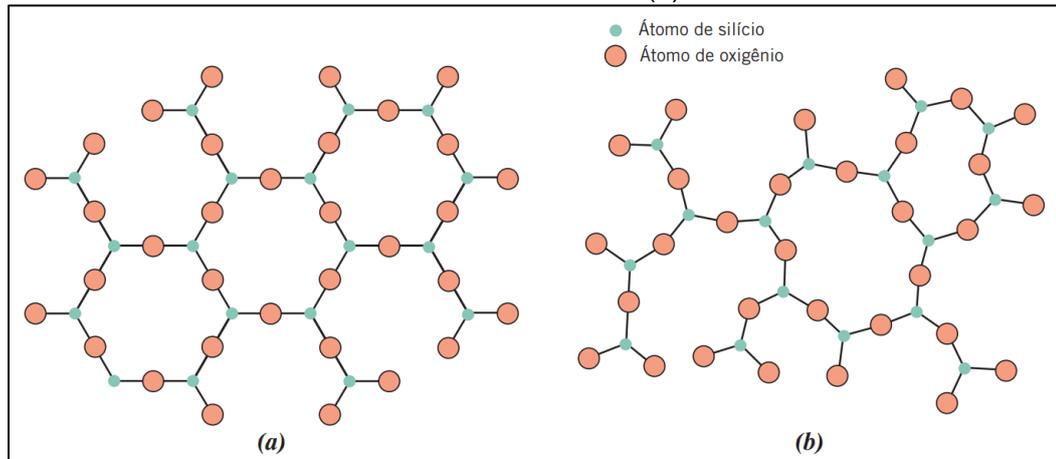
Para Hobbs (1988), Poole (1992) e Furnas (1997), a categorização e o processo de degradação química do concreto induzido pela RAA podem ser divididos em diferentes tipos, podendo ser reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato, tendo como critério de separação a mineralogia do agregado reativo.

Sob outra perspectiva a NBR 15577-1 (ABNT, 2018) afirma que, "a reação álcali-agregado pode ser classificada de acordo com a fase mineral envolvida na reação em: álcali-sílica e álcali-carbonato". A referida norma tem como base para a classificação a composição mineralógica e a presença do produto da reação, que no caso da reação álcali-sílica, se trata do gel da RAS.

### 2.2.1 Reação álcali-sílica (RAS)

Conforme estabelecido pela norma NBR 15577-1 (2018), a reação álcali-sílica configura-se como um tipo específico de reação álcali-agregado. A primeira citada ocorre quando a sílica reativa dos agregados interage com os álcalis presentes, em conjunto com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, gerando a formação de um gel expansivo. Nesse contexto, Callister e Rethwisch (2016) ilustram diferentes estruturas do dióxido de silício, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Representação da estrutura do dióxido de silício cristalino (a) e do dióxido de silício não cristalino (b).



Fonte: Callister e Rethwisch (2016)

A ocorrência frequente da reação álcali-agregado se dá pela interação dos hidróxidos alcalinos como hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) provenientes do cimento com os agregados, especificamente compostos por sílica amorfa ou pouco cristalina, citando como exemplos os vidros vulcânicos, tridimita, opala, cristobalita e o quartzo (Fournier e Bérubé, 2000).

A interação desses elementos somada a absorção de água possui potencial de provocar expansão do concreto, podendo comprometer a integridade estrutural das construções. Conforme destacado por Silva (2007), a principal preocupação está relacionada à capacidade do gel expansivo em absorver umidade, resultando no aumento de seu volume e consequentemente causando patologias, como fissuras. O autor também destaca que a reação álcali-sílica é amplamente reconhecida em escala global e documentada de maneira abrangente devido à sua prevalência e composição.

Conforme a NBR 15577-1 (2018), a reação álcali-silicato é caracterizada como um tipo particular de reação álcali-sílica, que ocorre entre os álcalis presentes no cimento e certos tipos de silicatos. Segundo Mindess, Darwin e Young (2003), a detecção precoce da reação álcali-sílica é fundamental para assegurar a integridade estrutural do concreto e permite a implementação de medidas preventivas antes que ocorra qualquer colapso na estrutura. Os autores destacam que é viável identificar essa reação por meio de ensaios de expansão em barras de concreto, microscopia eletrônica de varredura e análise petrográfica.

Existem minerais que possuem substancialmente composições químicas idênticas, porém com estruturas cristalinas distintas, ocasionando propriedades morfológicas e físicas diferentes (Madureira Filho; Atencio; McCreath, 2000). Para

Arrais (2011), os minerais participantes na reação álcali-silicato comumente manifestam com arranjo estrutural desorganizado, abrangendo o quartzo, muitas vezes deformado em decorrência de forças geológicas, exibindo extinção ondulante. Adicionalmente, a presença de quartzo microcristalino e cristais de silicatos distorcidos também contribui para intensificar a reatividade.

As estruturas naturais da sílica amorfa apresentam uma característica desorganização estrutural, uma vez que seus íons se encontram dispersos em uma rede sem estrutura tridimensional ordenada a longa distância. Isto leva ao surgimento de lacunas nesta estrutura, aumentando assim sua área específica e a reatividade em contato com soluções aquosas (Carman, 1940).

### 2.2.2 Reação álcali-carbonato (RAC)

Conforme estabelecido pela norma NBR 15577 – 1 (ABNT, 2018), a reação álcali-carbonato (RAC) é um fenômeno em que os álcalis hidróxidos originados de fontes como o cimento Portland, interagem com agregados calcários dolomíticos argilosos. Esta reação é caracterizada pela desdolomitização, não resultando na formação de gel expansivo.

Conforme Albertini (2014), a reação álcali-carbonato é descrita como um tipo específico de fenômeno de reação álcali-agregado, que abrange a interação entre álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A manifestação mais reconhecida dessa reação é a desdolomitização da rocha, resultando na fragilização da ligação entre a pasta e o agregado, com o acúmulo de cristais nos poros em vez da formação de gel expansivo. Este processo de desdolomitização instiga alterações na estrutura do calcário, promovendo aumento de volume, e persiste até que a concentração de álcalis seja reduzida por meio de reações secundárias.

Isto posto, cabe destaque que a desdolomitização na estrutura do calcário não é suficiente para qualificar a ocorrência da RAC, só sendo possível caracterizar como tal, caso venha acompanhada por um aumento volumétrico no calcário. Este incremento volumétrico se torna um fator crítico, tendo em vista que contribuirá para o desarranjo entre a pasta cimentícia e os agregados, ocasionado a formação de fissuras NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

## 2.3 MECANISMOS DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

### 2.3.1 Processo da RAS

É descrito a seguir a simplificação realizada por Rajabipour *et al.* (2015), da reação de alcalinidade-sílica em dois processos. A divisão em processos distintos proporciona uma compreensão mais aprofundada do mecanismo da reação e de como evolui até a fissuração da matriz cimentícia.

- 1º Etapa: Álcali + Sílica Reativa → Gel Álcali-Sílica; reação química em si, entre álcalis e sílica reativa para formar o produto reativo de gel;
- 2º Etapa: Gel Álcali-Sílica + Umidade → Expansão; reação entre o produto reativo de gel e umidade resultando em expansão.

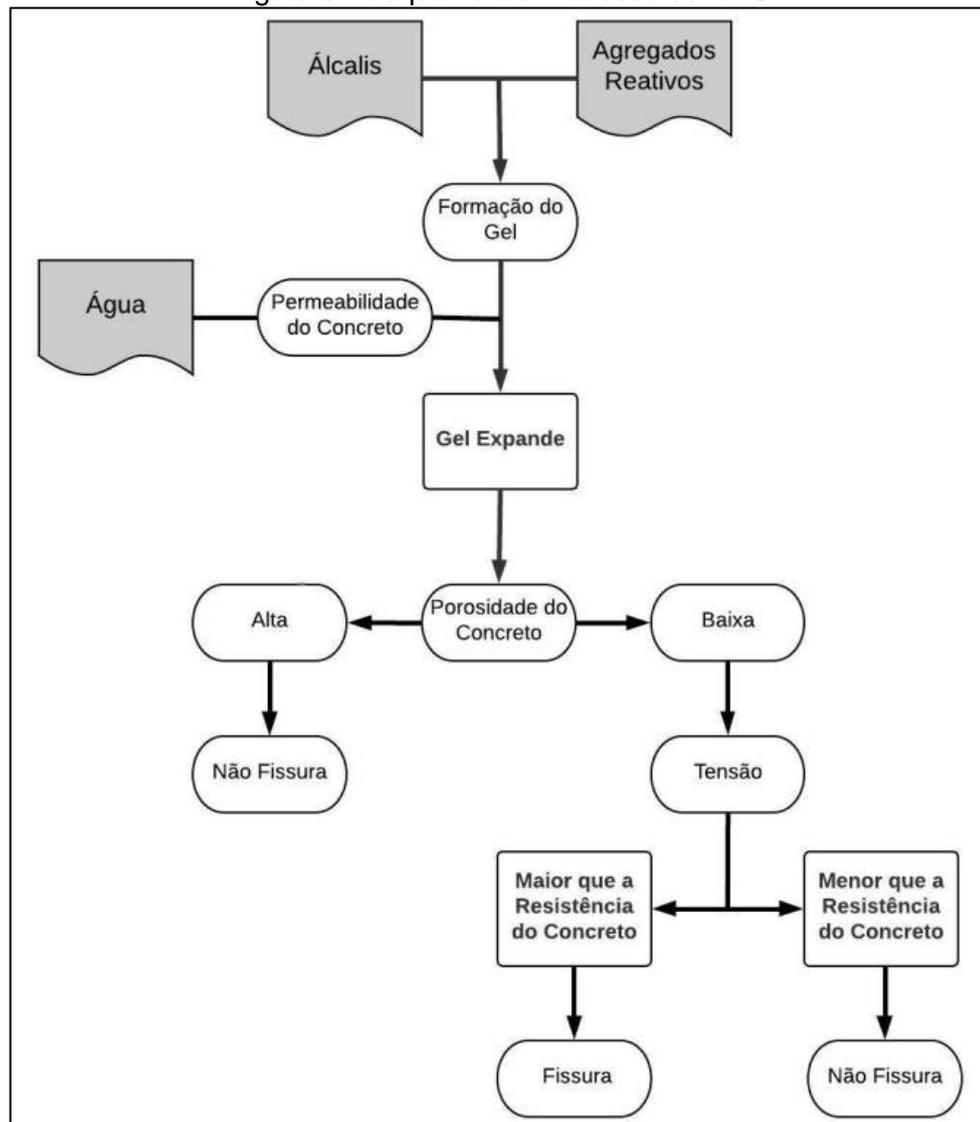
Segundo autores como Tiecher (2006), Hasparyk (2005), Tapas *et al.* (2021) e Sun *et al.* (2021), diversos elementos estão diretamente envolvidos na ocorrência da RAA. Sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) são alguns destes elementos, que provenientes de argilas e xistos presentes no cimento acarretam a presença de íons alcalinos, íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) e alguns minerais reativos encontrados nos agregados, especialmente a sílica amorfa.

Segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), os álcalis de sódio e/ou potássio, podem originar-se tanto de fontes internas quanto externas ao concreto, e quando em contato com água apresentam uma rápida solubilização nos poros ou no decorrer do tempo. Nesse sentido, Pedroso (2021) complementa que a interação dos álcalis com as sílicas reativas no concreto com presença de umidade, leva a formação de produtos expansivos no interior da estrutura, ocasionando fissuração e deterioração da peça.

No quartzito, que faz parte da gama de variedades de rochas, há uma predominância do aparecimento do gel decorrente da RAS na superfície do agregado, originando produtos enriquecidos com cálcio e sílica. Geralmente, os álcalis percorrem as camadas superficiais de maneira mais eficaz do que o cálcio propiciando a desintegração do agregado e a constituição do gel provindo da RAS. Essa etapa persistente direciona à expansão do concreto por meio de forças de tração internas na zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento (Mohammadi, Ghiasvand, Nili, 2020).

A Figura 3 apresenta um resumo das fases da reação, destacando a utilidade desse tipo de simplificação no âmbito acadêmico, pois viabiliza uma compreensão dos mecanismos subjacentes aos processos.

Figura 3 - Esquema do Processo da RAS



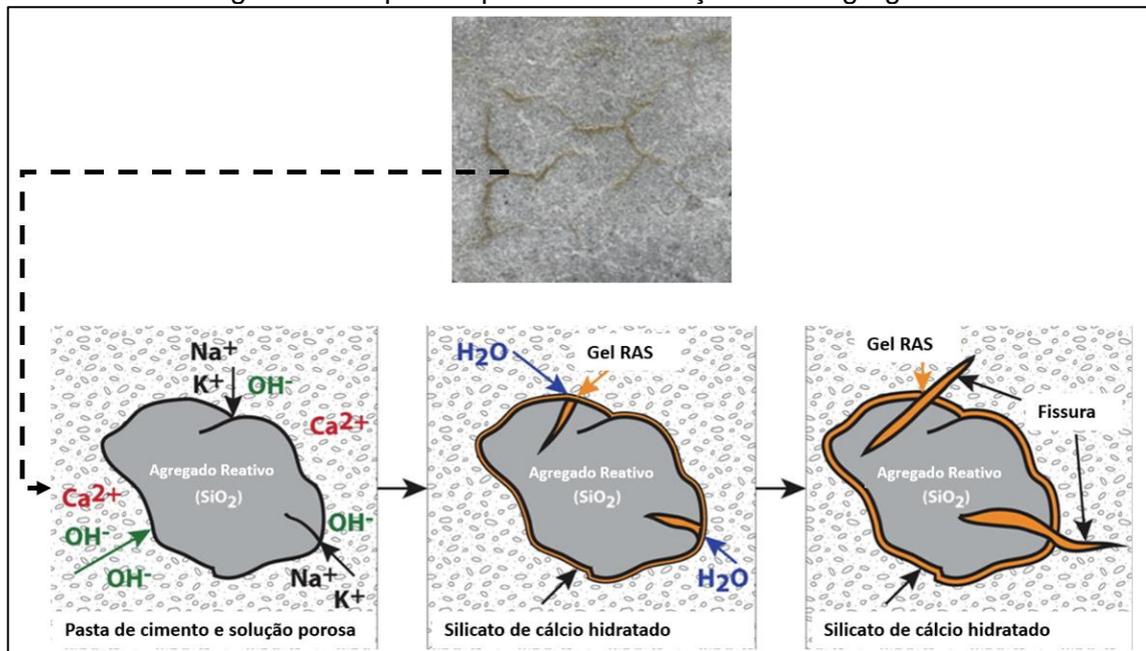
Fonte: Valduga (2002)

A predisposição ao um aumento volumétrico está diretamente ligada a quanto o gel está exposto à umidade. Durante o processo da RAS, Neville (2016) e Figueira *et al.* (2019) afirmam que o gel resultante da reação álcali-silicato é único por apresentar um crescimento incessante, uma vez que é higroscópico e capaz de atrair um maior número de moléculas de água, resultando em incremento volumétrico. Este diz que há uma diferença no potencial químico entre o gel e as substâncias contidas nos poros do concreto.

Além disto Neville (2016) corrobora com Lacasse, Labossiere, Neale (2003), todos ressaltam que o gel se encontra contido pela matriz de cimento hidratado, ocasionando pressões internas. O último acrescenta que essas pressões são estimadas em 6 a 7 MPa, quando geralmente o concreto apresenta resistência à

tração na faixa entre 2 e 3 MPa. Na Figura 4 é apresentada as etapas da RAS, que representa um processo com potencial impacto na integridade das estruturas de concreto.

Figura 4 - Etapas do processo da reação álcali-agregado



Fonte: Adaptado Figueira *et al.* (2019)

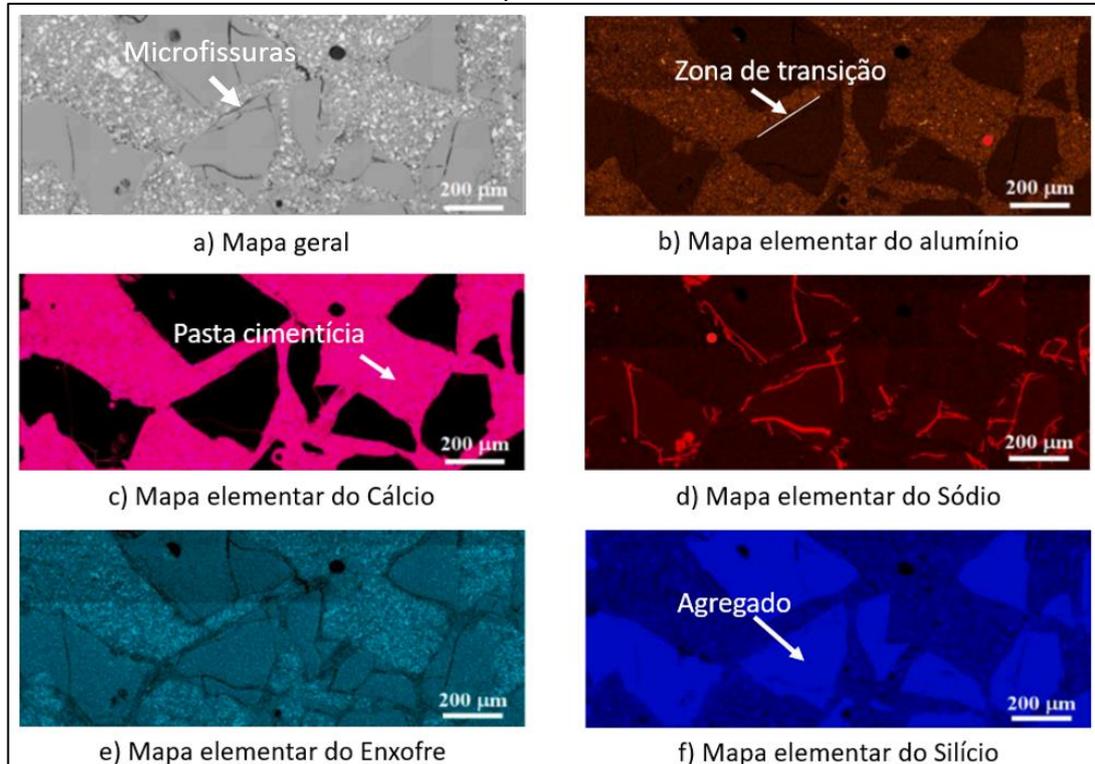
Por isso destaca-se as propriedades do gel formado na reação álcali-silica, a particularidade de atrair moléculas de água tornando-o propenso ao aumento volumétrico, as pressões internas geradas pelo referido elemento propiciam o surgimento de outras manifestações, haja vista a facilitação da penetração de agentes agressivos por meio dessas aberturas (Figueira *et al.*, 2019). Esses aspectos são fundamentais para uma compreensão maior da interação entre os distintos materiais envolvidos, razão pela qual vários ensaios acelerados têm sido empregados globalmente no diagnóstico da suscetibilidade de agregados.

### 2.3.2 Argamassa e o produto da RAS

Balachandran *et al.* (2023), utilizaram parâmetros dos métodos de verificação de comprimento de barras de argamassa ASTM C1260 (2021) e ASTM C 1293 (2020) sendo o último utilizado apenas no que se refere ao aumento dos álcalis das amostras e as condições de exposição. Neste ensaio experimental, destacaram a análise realizada por meio de elétrons retroespalhados e seus respectivos mapas de elementos químicos, que revelam a presença de diversos componentes, conforme Figura 5, em que se tem a presença do cálcio, sódio, silício, alumínio e enxofre, este

último elemento característico do cimento Portland Branco conforme sinalizado pelos autores.

Figura 5 - Identificação dos elementos da barra de argamassa para realização do ensaio experimental



Fonte: Adaptado Balachandran *et al.* (2023)

Em decorrência da distribuição não homogênea dos elementos químicos, há diferenciação quanto as propriedades dos produtos resultantes da reação álcali-sílica. Deste modo, haverá variabilidade na configuração do composto gerado pela RAS, pois as condições locais sejam no interior do grão de quartzo ou na matriz da pasta de cimento ou nos espaços vazios de ar, exercem uma influência preponderante na composição química desses produtos (Balachandran *et al.*, 2023).

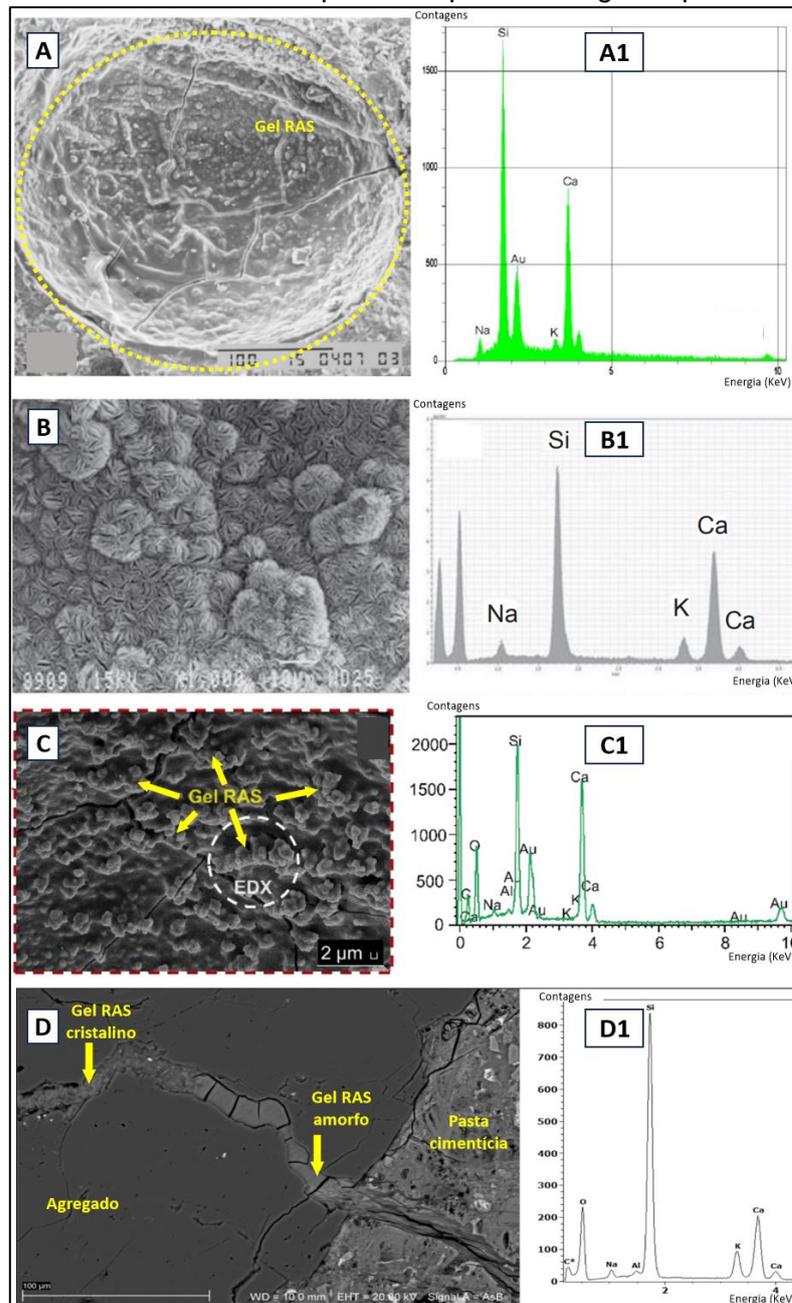
Sobre o gel da RAS, Shi e Lothenbach (2019), Leemann, Shi e Lingard (2020) e Glinicki *et al.* (2022) observaram uma correlação significativa entre a concentração de cálcio no produto resultante da reação álcali-sílica e a distância em relação à fronteira do grão do agregado em direção à pasta cimentícia. Com base nestas constatações, apontam que o aumento da distância entre o gel da RAS e os grãos do agregado está associado a um incremento na concentração de cálcio, e que esta tendência pode ser atribuída, em parte, à composição química intrínseca da matriz cimentícia.

Investigações realizadas por Figueira *et al.* (2019), evidenciaram maior reatividade dos hidróxidos de sódio em relação aos hidróxidos de potássio, quando submetidos a idênticas condições ambientais. As relações de Na/Si e K/Si no gel quando aumentadas estão correlacionadas positivamente com o coeficiente de absorção de água assim como em relação a expansão do produto.

A distribuição espacial dos produtos da RAS é modulada pela taxa de dissolução da sílica e pela porosidade do agregado. Em condições de baixa taxa de dissolução de sílica e porosidade reduzida, observa-se a formação interna dos produtos da RAS no interior do agregado. À medida que a taxa de dissolução de sílica aumenta, verifica-se uma transição na localização dos produtos da RAS, deslocando-se do interior do agregado para a zona de transição (Qiu *et al.*, 2022).

A Figura 6 apresenta diversas pesquisas sobre os produtos da reação álcali-sílica, elas evidenciam a morfologia típica de diferentes amplitudes dos produtos da RAS. No que tange a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) nos géis abaixo mencionados pelos autores, constatou-se que se tratam de géis de silício provenientes da reação álcali-sílica, como pode-se observar na Figura 6-A1; 6-B1; 6-C1 e 6-D1.

Figura 6 - Morfologias típicas da RAS obtidos com MEV – microscópio eletrônico de varredura e EDS - Espectroscopia de energia dispersiva



**Fonte:** Adaptado: A e A1 (Munhoz, 2007); B e B1 (Cyr e Pouhet, 2015); C e C1 (Junior, 2022); D e D1 (Glinicki *et al*, 2022).

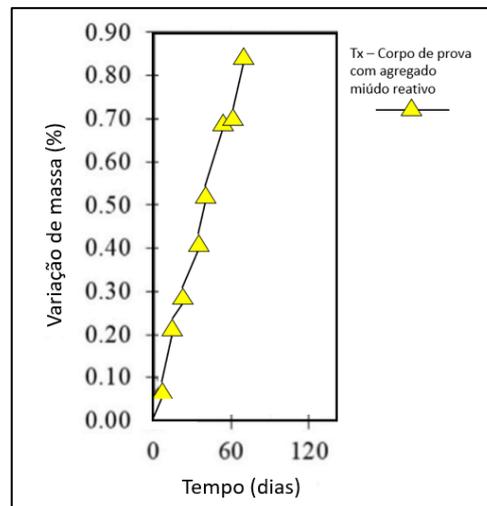
Por meio da visualização em escalas microscópicas da RAS tem-se a Figura 6-A, que apresenta por meio do MEV em uma ampliação de 350x o detalhe do poro preenchido por gel da RAS, tal preenchimento contribui para a redução da porosidade da argamassa (Munhoz, 2007). Cyr e Pouhet (2015) citam diferenças entre géis jovens e mais antigos, sendo o primeiro tendo característica de textura suave, quanto o segundo conforme Figura 6-B geralmente cristalizam em forma de roseta.

Junior (2022), por meio da ampliação realizada pelo MEV em um poro com aspecto de gel maciço gretado, constatou fissuras gretadas e a formação de gel com estrutura cristalina muito fina, conforme Figura 6-C. Em uma outra abordagem, tendo como objetivo a constatação da existência das duas formas do produto da RAS, tem-se a investigação de Glinicki *et al.* (2022), que apresentaram a diferenciação entre o produto em forma cristalina encontrado em fissuras nos grãos dos agregados, e o produto na forma amorfa presente na matriz do cimento assim como próximos as bordas dos grãos dos agregados, conforme Figura 6-D.

### 2.3.3 Efeitos nocivos mais frequentes resultantes da RAS

No que diz respeito à variação de massa na argamassa, de acordo com a investigação conduzida por Souza e Sanchez (2023), é possível constatar um acréscimo na massa específica da amostra em decorrência da manifestação da reação, particularmente quando o ligante utilizado é o cimento Portland, conforme Figura 7.

Figura 7 - Relação entre ganho de massa e tempo utilizando cimento Portland e agregado reativo



Fonte: Adaptado Souza e Sanchez (2023)

Nesse contexto, a elevação da massa da amostra pode acarretar desvantagens para o concreto, uma vez que isso resulta em um aumento de peso não previamente dimensionado, comprometendo assim, a estabilidade das estruturas. A Figura 7 ilustra claramente o ganho de massa da amostra relacionado à mistura de agregados miúdos reativos, em que o cimento é o único material ligante presente.

Estudos conduzidos por Hobbs (1988), Poole (1992), Furnas (1997) e Godart e Rooij (2017) destacam os efeitos prejudiciais mais comuns da RAA em estruturas

de concreto, que envolvem a formação de fissuras em padrão tipo "mapa"; a exsudação de gel na superfície do concreto, nas extremidades ou ao redor dos agregados; o preenchimento de poros pelo gel; a ocorrência de microfissuras; e a descoloração do concreto. Esses sinais da RAS coincidem com aqueles mencionados por Mehta e Monteiro (2008), que também incluem manchas esbranquiçadas. Assim, na Figura 8 a seguir, Kristufek *et al.* (2022) registra uma dessas manifestações.

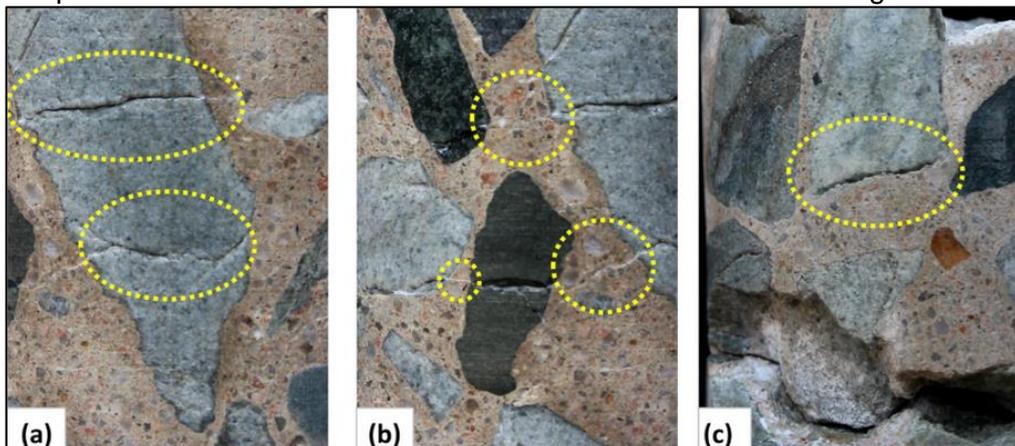
Figura 8 - Fissuras em forma de mapa decorrentes da RAS em um píer



**Fonte:** Kristufek *et al.* (2022)

Kanjee, Ballim e Otieno (2023) identificaram por meio de inspeção visual em uma ponte ferroviária de concreto fissuras relevantes em formato de mapa, exsudações brancas ao redor dessas fissuras e presença de umidade em áreas específicas. Esses indícios sugerem uma potencial deterioração devido à RAS. Desta forma, conduziram uma análise detalhada extraíndo testemunhos e realizando registros destes, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Características petrográficas de testemunhos da estrutura com RAS apresentando fissuras e descolamento em distintas áreas da argamassa



**Fonte:** Adaptado Kanjee, Ballim, Otieno (2023)

Conforme imagens locais da superfície cilíndrica do núcleo de concreto, ilustrado anteriormente, as Figuras 9-a, 9-b e 9-c apresentam fissuras na parte interna do agregado, fissuras na pasta de cimento e com presença de exsudações brancas ao redor destas sugerindo a presença de substância gelatinosa incolor, e sinais de aumento de volume variáveis levando ao deslocamento do agregado, respectivamente. Tais manifestações são decorrentes da elevada umidade presente na estrutura, devido a sua função natural, além de, os agregados utilizados serem grosseiros de quartzo e xisto, ambos conhecidos como agregados reativos na região (Kanjee, Ballim e Otieno, 2023).

Deste modo, conforme estabelecido pela norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018), é necessário examinar as condições de exposição da estrutura, suas dimensões e o nível de reatividade do agregado, para realizar uma avaliação do risco associado à ocorrência da reação.

#### 2.4 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM A RAA

A identificação de indícios da reação álcali-agregado ou danos em uma estrutura demandam um intervalo de tempo variável, influenciado por diversos fatores como: o tipo e a proporção dos agregados, o teor de álcalis no cimento, a composição do gel, as condições de temperatura, umidade e outros elementos pertinentes (Diamond, 1976; Kihara, 1986; Poole, 1992).

No que tange as circunstâncias locais, algumas medidas preventivas podem ser descartadas inicialmente, devido a inviabilidade de ajustar a estrutura às condições ideais. Por isso, a seleção criteriosa dos agregados e o entendimento dos demais materiais utilizados no concreto emergem como elementos fundamentais para a mitigação eficaz da reação.

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) considera a determinação da classe dos agregados e a compreensão das condições ambientais em que a estrutura estará exposta como norte para a seleção dos agregados. Isso implica a avaliação de variáveis como a umidade do ambiente, se a estrutura está enterrada, submersa ou exposta a condições úmidas, bem como se há contato com água ou substâncias alcalinas. Neste contexto, serão discutidos fatores que se mostraram contribuintes para o mecanismo de expansão da reação álcali-agregado.

#### 2.4.1 Álcalis no cimento

Recomendava-se com o intuito de evitar a RAS, a utilização de cimento contendo no máximo 0,6 % de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  e uma dosagem em cimento que limitasse a quantidade de álcalis em 3 kg/m<sup>3</sup> de concreto, com o objetivo de ter um cimento com baixo teor de álcalis. Contudo, posteriormente verificou-se que tais parâmetros não eram suficientes para garantir expansões mínimas e abaixo dos limites para provocar danos no concreto. Assim sendo, a adoção destas ações de maneira exclusiva passou a ser rejeitadas com o passar dos anos (Hasparyk, 2011).

A alcalinidade da solução dos poros figura como um elemento de importância na dinâmica da RAS, com o cimento Portland emergindo como a principal fonte primária de álcalis em contextos estruturais no concreto (Silveira, 2006; Tiecher, 2006; Fanijo, Kolawole e Almakrab, 2021). O conceito de álcalis refere-se aos metais alcalinos lítio (Li), sódio (Na), potássio (K), rubídio (Rb), célio (Cs) e frâncio (Fr), do grupo 1 da tabela periódica.

Segundo Silveira (2006) e Tiecher (2006), o sódio e o potássio são os mais encontrados e apenas eles estão presentes no cimento em quantidades substanciais, exercendo uma influência direta no pH do concreto. Para Peterson (2000), os álcalis presentes no cimento originam-se do processo de calcinação do clínquer, onde íons  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  são vaporizados a altas temperaturas. Durante o transporte lento do clínquer através do forno, esses íons condensam-se sobre o material, formando uma camada superficial de álcalis. Ainda segundo autor, enquanto alguns íons permanecem na superfície, outros penetram na estrutura do clínquer.

Os álcalis provenientes da hidratação do concreto tornam-se disponíveis mais rapidamente se estiverem na superfície do clínquer, enquanto os internos se tornam disponíveis ao longo do processo de hidratação (Peterson, 2000). De acordo com Biczok (1972), Poole (1992) e Roy *et al.* (2003), a velocidade, a intensidade e a proporção de íons hidroxila na solução dos poros do concreto são influenciadas pela quantidade de teor alcalino no cimento, resultando em expansões mais significativas.

Roy *et al.* (2003) acrescentam que os concretos produzidos com cimentos de baixo teor de álcalis apresentam concentrações de íons hidroxila cerca de 10 vezes menores em comparação com os concretos elaborados com cimento de alto teor de álcalis. Além disso, sustenta que o pH elevado facilita e intensifica a dissolução de certas formas de sílica, contribuindo assim, para a formação do gel. Segundo Neville (2016), para que a prevenção da RAA seja eficaz ao restringir o teor de álcalis no

cimento, é fundamental que duas condições sejam atendidas: a inexistência de outras fontes de álcalis no concreto e a ausência de concentração desigual de álcalis em diferentes regiões.

Em síntese, a proporção de cimento enriquecido com álcalis presente no concreto exerce influência na RAS. Cabe ressaltar, que cimentos com baixos teores de álcalis não garantem a inibição da reação, tendo em vista que em sua composição há quantidades substanciais de sódio e potássio (Stanton, 1940 *apud* Hasparyk, 2011). Devido esses fatores, a substituição parcial do cimento por adições minerais ou artificiais configura-se como uma estratégia que visa reduzir o consumo de cimento por metro cúbico de concreto, ganhando significativa relevância.

#### 2.4.2 Agregados

A literatura não é unânime para determinar a suscetibilidade de agregados silicosos à reação álcali-agregado. Portanto, surge a necessidade de avaliar o potencial reativo desses agregados para sua utilização ou conduzir estudos que visem mitigar os efeitos adversos resultantes de sua aplicação. Portella *et al.*, (2021) realizaram uma investigação dos agregados finos de areia natural por diferentes métodos, e indicaram que as principais causas de expansão ou manifestações patológicas pela RAS resultaram principalmente da presença de deformação intracristalina nos grãos de quartzo.

Neville e Brooks (2010) apontam que agregados podem ser classificados em diferentes categorias, como rochas sedimentares, rochas ígneas e rochas metamórficas. Quanto à natureza dos agregados, Hasparyk (2005) afirma que a presença de sílica amorfa é um forte indicador de reatividade agregada porque os substratos reagentes de grupos silanol ( $\text{SiOH}$ ) estão presentes em tais grupos minerais.

Paulon (1981) indicou que a presença de sílica amorfa é comum em diversos grupos minerais, uma vez que o silício é abundantemente encontrado na Terra, assim como água e nitrogênio. Em uma abordagem diferente sobre os agregados, Sanchez (2008) destacou o basalto como um agregado naturalmente inócuo em comparação com quartzitos e miolitos, devido ao seu teor de sílica ser inferior a 52%. Foi observado que o basalto meláfiro e porfírico apresentam uma considerável quantidade de vidros vulcânicos pouco cristalizados. Nixon e Sims (2003) apontam fases de sílica potencialmente reativas aos álcalis, como quartzo, opala, vidro vulcânico, cristobalita

e tridimita. Akhavan (2022) apresenta esses tipos de minerais que geralmente apresentam em sua estrutura sílicas reativas, conforme Figura 10.

Figura 10 - Exemplos de minerais que podem conter sílica reativa



**Fonte:** Adaptado Akhavan (2022)

Quanto à medição de tamanho de partícula, Valduga (2002) destacou que quanto menor a granulometria, maior será sua reatividade potencial, pois sua área de superfície específica é maior.

A seleção dos agregados requer critérios técnicos rigorosos, a fim de assegurar a qualidade e durabilidade do concreto. No que tange aos agregados miúdos, objeto principal deste trabalho, ressalta-se que no contexto brasileiro a normativa que regula a avaliação da reatividade potencial dos agregados é a NBR 15577 (ABNT, 2018), ao todo com sete partes, abrangendo definições, métodos de ensaio e estratégias de mitigação dos efeitos da RAA.

#### 2.4.3 Umidade e temperatura

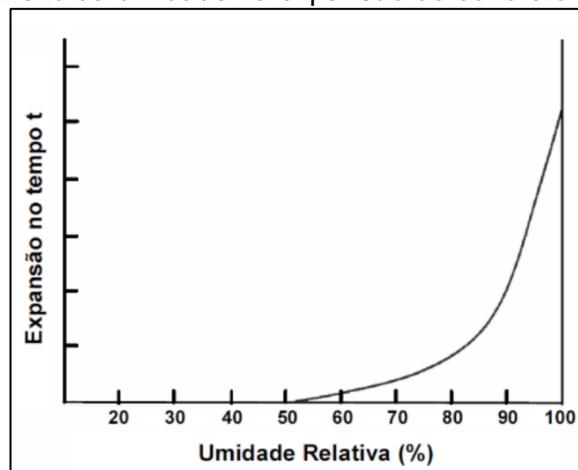
Com a presença de água nos poros do concreto, ocorre o transporte mais rápido de íons e moléculas, especialmente quando os poros estão completamente saturados (Poole, 1992). Nesse contexto, a relação água/cimento emerge como um fator relevante, pois o excesso de água além do necessário para a hidratação do cimento permanece nos poros, tornando-se um facilitador da reação.

Para ocorrência da RAA é necessário que a umidade esteja em aproximadamente 80%, este fator é devido a maior intensificação da migração e solubilização dos íons alcalinos na solução dos poros propiciando a expansão, é

possível que a reação não ocorra quando o patamar de umidade está abaixo desses valores (Kihara, 1986; Poole, 1992; Figueirôa e Andrade, 2007; Sanchez, 2008).

Ratificando a conexão direta entre a elevada umidade relativa do concreto e o fenômeno de expansão, Poole (1992) apresentou por meio de um gráfico os resultados de seus estudos de caso e ensaios laboratoriais. O gráfico evidencia sua conclusão de que um nível de umidade de 80% ocasiona uma expansão consideravelmente maior em comparação a percentuais mais baixos, conforme apresentado na Figura 11. Contudo, para o método acelerado, que se estende por aproximadamente um mês, as condições são consideradas extremas, com uma umidade de 100%.

Figura 11 - Efeito da umidade na expansão do concreto devido à RAA



Fonte: Poole (1992)

Kanjee, Ballim e Otieno (2023) conduziram análises em uma ponte localizada na capital da África do Sul, construída na década 40, que utilizava quartzito como agregado. Atualmente, sabe-se que esse agregado é propenso à reação álcali-sílica. Os concretos retirados de elementos expostos diretamente à umidade na ponte apresentaram níveis mais elevados de danos internos, como fissuras no agregado, na pasta de cimento e desprendimento de agregados, em comparação com aqueles provenientes de áreas mais secas da estrutura. Os resultados obtidos pelos pesquisadores corroboram a eficácia dos dados apresentados na Figura 11, confirmando que maiores níveis de umidade aumentam a possibilidade de ocorrência da reação.

Hobbs (1988) discorre que, para além da umidade, fatores externos como a temperatura desempenham um papel significativo como condicionantes no processo deletério. Neste contexto se faz necessário uma abordagem singularizada no que

tange a temperatura, a literatura científica consolida a concordância quanto ao impacto acelerador de altas temperaturas na reação álcali-agregado.

Menéndez *et al.* (2022), em seu estudo sobre liberação de álcalis de agregados, observou que houve aumento na liberação de álcalis com o aumento da temperatura. O aumento da temperatura ambiente resulta em uma aceleração da ocorrência da RAA, uma vez que as reações químicas são potencializadas na presença de calor, dado que a temperatura atua como catalisador em muitas reações, ela, por conseguinte, acelera as reações de expansão e a formação de gel higroscópico (Biczok, 1972; Furnas, 1997; Silveira, 2006).

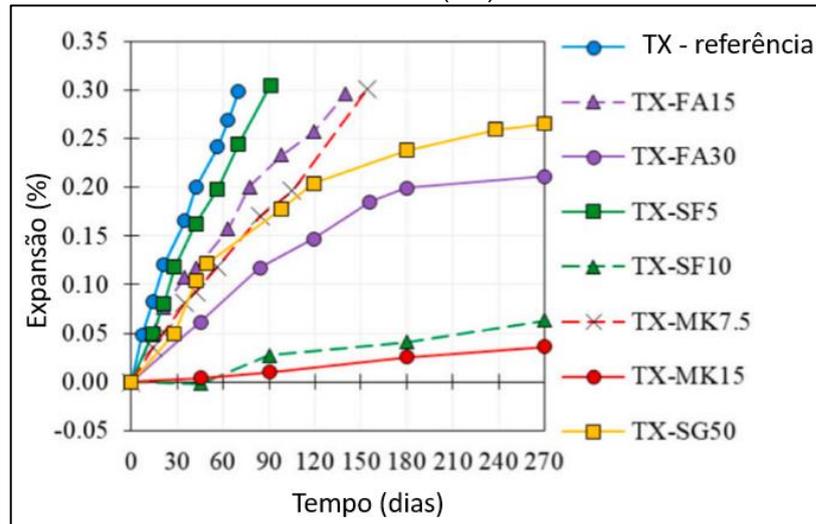
Em linhas gerais, a temperatura está diretamente relacionada ao aumento das expansões, justificando assim as orientações do ensaio de reatividade em barras de argamassa pelo método acelerado. Pois este método envolve a aplicação de uma temperatura de 80° graus Celsius em algumas etapas do processo. Esse procedimento enfatiza a relevância da umidade e da temperatura no desenvolvimento das reações álcali-agregado, indicando que, embora haja concordância na literatura de que temperaturas elevadas aceleram essas reações, os valores empregados no ensaio acelerado são considerados exagerados devido ao tempo de exposição das barras no ensaio.

#### 2.4.4 Adições minerais

Para Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são caracterizadas por serem finamente moídas e obtidas a partir de fontes como por exemplo: usinas termoelétricas e fornos metalúrgicos. Esses materiais são benéficos para o concreto, uma vez que podem aumentar sua resistência contra ataques químicos, bem como a mitigação da reação álcali-agregado, mesmo quando adicionados ao cimento Portland.

Para Fournier *et al.* (2016), os materiais de cimentação suplementares (SCMs) não evitam totalmente a ocorrência de RAS, mas apenas a atrasa. Tem-se utilizado diferentes tipos de materiais cimentícios suplementares, como exemplificado por Souza e Sanchez (2023), em que foram utilizados: escória de alto-forno – SG; cinza volante classe F - FA, sílica ativa - SF e metacaulim – MK, contudo nota-se que a expansão da argamassa não foi evitada, apesar dos dois últimos citados destacarem-se por retardar consideravelmente a expansão, conforme Figura 12.

Figura 12 - Expansão para diferentes composições de ligantes feitas com agregado miúdo reativo (TX)



Fonte: Souza e Sanchez (2023).

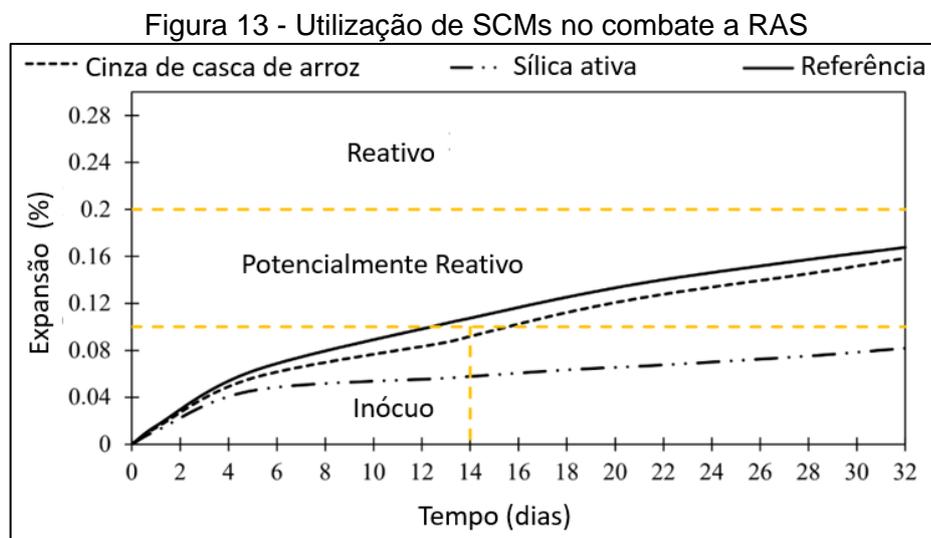
Na Figura 12 acima, vale destacar o desempenho da sílica ativa e do metacaulim como retardante da expansão. Segundo Fraga *et al.* (2020), há um aumento na resistência mecânica dos produtos cimentícios com sílica ativa, esta característica influencia na criação de uma estrutura compacta, com diminuição da porosidade e no refinamento da disposição do tamanho dos poros nos compósitos cimentícios. Outro fator relevante se dá quando a sílica ativa adicionada ao concreto, reage quimicamente com hidróxido de cálcio, resultando incremento na resistência do concreto devido a composição gerada de silicato de cálcio hidratado (Santos, 2018).

Estudos realizados por Medeiros *et al.* (2017) apontaram redução na expansão para amostras de cimento Portland com adições e substituições parciais de metacaulim e sílica ativa quando comparadas ao CPV-ARI. Para Abbas *et al.*, (2017), essas adições minerais pozzolânicas resultam em ganhos na microestrutura das barras de argamassa, levando a diminuição da porosidade, a permeabilidade, resultando em um material mais denso com melhores propriedades mecânicas e químicas. Essa reação gera um produto estável (silicato de cálcio hidratado pozzolânico), o que contribui para a diminuição dos danos causados pela RAS, bem como reduzindo o pH da solução dos poros.

A pesquisa de Souza e Sanchez (2023) mostrou-se satisfatória durante o período estudado, contudo, se a análise parasse ao 30º dia, estaria divulgando um resultado equivocado em relação a eficácia do método, pois as expansões continuaram ao longo dos dias analisados. Logo, ensaios que simulem condições para

alteração na expansão do gel precisam ser longos, ou acelerem o processo das reações para que sejam alcançados valores confiáveis.

É notório que a utilização de adições minerais representa uma estratégia relevante para conferir resistência contra a reação álcali-agregado, sendo tais adições e suas composições ligantes objetos de estudos de acordo com as regiões e disponibilidade de materiais. Na Figura 13, de acordo com as investigações de Langaro *et al.* (2021), destaca-se a relevância de adições minerais na melhoria das propriedades do concreto, tornando-o mais resistente à RAS e a outros tipos de deterioração.



**Fonte:** Langaro *et al.* (2021)

Segundo Langaro *et al.* (2021) e em concordância com Souza, Medeiros e Filho (2020), os materiais cimentantes suplementares silicosos, como a sílica ativa (SF) e a cinza de casca de arroz (CCA), consistem principalmente de  $\text{SiO}_2$  de tamanho de partícula fina, apresentando uma atividade pozolânica relativamente alta. Esses materiais são amplamente empregados para melhorar a resistência à compressão, resistência à abrasão e durabilidade do concreto.

No entanto, ao substituir 10% do cimento Portland por esses materiais, conforme demonstrado na Figura 13, especificamente a CCA, observou-se uma mitigação da reação em comparação com a barra de referência. Com a SF, a reatividade foi mitigada, resultando em um comportamento não reativo conforme a ASTM C 1260 (Langaro *et al.*, 2021). No entanto, é importante notar um crescimento constante da expansão em ambos os casos, indicando que os materiais de

cimentação suplementares não necessariamente eliminam a reação, mas sim retardam seu processo de expansão.

Após o desencadeamento da reação, inexistem métodos ou técnicas rigorosas para sua completa interrupção, comumente apenas se mostra factível retardar a taxa de progressão (Helene, Carvalho, Pacheco, 2017).

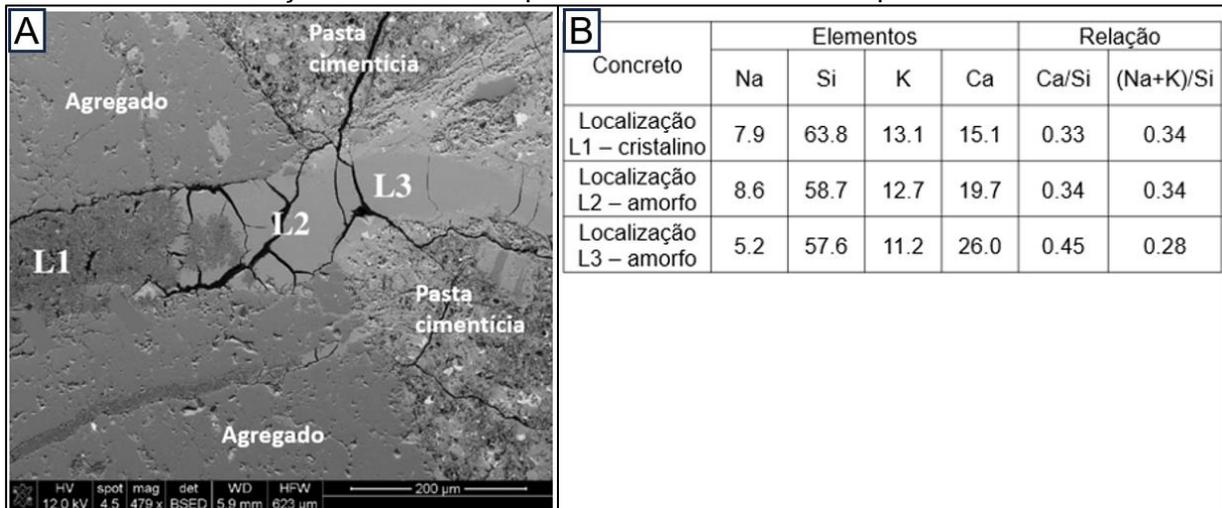
#### 2.4.5 Cálcio

A variabilidade do cálcio em contextos diferentes pode ocasionar alterações no processo de formação do gel. Os estudos de Shi *et al.* (2018) e Shi e Lothenbach (2019) são exemplos notáveis da relevância do cálcio na RAS. Os primeiros sugerem que a expansão da reação álcali-sílica foi significativamente menor ou inexistente em argamassas ativadas alcalinamente com baixo teor de cálcio e metacaulim, apesar do uso de teores elevados de álcali na preparação das argamassas. Os outros autores destacam que na ausência de cálcio, a sílica reativa apenas se dissolve e permanece na solução.

Segundo Shi *et al.* (2019), a quantidade de cálcio nos produtos da RAS parece aumentar com o tempo, sendo frequentemente mais enriquecido na pasta de cimento em comparação com os produtos formados nos agregados reativos. Em outra vertente de análise dos produtos da RAS contendo cálcio, Leemann (2016) aponta que a identificação destes se faz por meio de suas características superficiais, podendo ser classificado como cristalino ou amorfo, sendo visualizado texturizado ou de forma lisa e não texturizada, respectivamente.

Para Leemann (2017), o método adequado para revelar informações sobre a estrutura do gel da RAS é a espectroscopia Raman, que com a dispersão inelástica da luz monocromática, que fornece informações sobre os modos vibracionais do material investigado. Desta forma, o autor apresenta na Figura 14-A o registro do MEV indicando os locais, sendo estes L1, L2 e L3, onde os espectros de Raman foram obtidos. Já na Figura 14-B, tem-se a classificação do produto em cristalino ou amorfo conforme estudo do autor em 2016 citado anteriormente, assim como, por meio da aplicação do EDS um parâmetro de como a relação Ca/Si interfere na formação dos produtos resultantes da reação.

Figura 14 – A) Registro do MEV nos pontos que a microscopia Raman foi utilizada; B) relação do Cálcio nos produtos da RAS medidas por EDS



Fonte: Adaptado Leemann (2017)

A análise combinada das informações fornecidas pelos autores, somada à pesquisa de Leemann (2017), permite sugerir que um fator preponderante na formação dos produtos resultantes da reação álcali-sílica é a presença de cálcio. A Figura 14-B, apresentada anteriormente, evidencia nos pontos L1 e L2, inicialmente localizados dentro do agregado, a relação inversa entre a quantidade de cálcio (Ca/Si) e a relação (Na+K)/Si, indicando que quanto menor a razão Ca/Si, maior é a razão (Na+K)/Si, e vice-versa, como exemplificado pelo ponto L3.

## 2.5 MÉTODOS UTILIZADOS PARA INVESTIGAÇÃO DA RAS

Os danos diretos e subsequentes no concreto decorrentes da reação álcali-silica tem se tornado um desafio metodológico para sua compreensão. Essa realidade é geradora da evolução contínua de métodos de avaliação, abordagens antiquadas são constantemente refinadas. Com o avanço tecnológico tem-se empregado novas técnicas e ferramentas para a avaliação e o monitoramento dessa reação. Cada método de identificação e análise dos efeitos da RAS demandam condições particulares, como laboratórios específicos para sua realização.

A combinação de ensaios para alcançar objetivos relacionadas à RAS é comumente utilizada pelos pesquisadores. Essa combinação oferece uma abordagem abrangente por meio de métodos distintos que permitem a comparação e validação cruzada dos dados, causando a consolidação de resultados mais robustos e confiáveis. Há ensaios que podem ter concentração exclusiva nos agregados e

existem ensaios que examinam amostras de concreto e argamassa, assim como há combinação dos métodos para avaliar tanto o cimento quanto o agregado.

Alguns dos métodos mencionados a seguir são amplamente reconhecidos internacionalmente, enquanto outros são vanguardistas que ainda não alcançaram uma ampla disseminação. No Quadro 1, estão apresentados diversos ensaios relacionados a RAS, apontando suas respectivas normas ou referenciando alguns autores que os empregaram.

Quadro 1 - Métodos de avaliação da ocorrência da RAS

(continua)

Método de Ensaio	Síntese do Método	Referência Bibliográfica
C 1260 - Método de teste padrão para potencial reatividade alcalina de agregados	Este procedimento de ensaio oferece uma abordagem para identificar a capacidade de um agregado destinado a ser utilizado no concreto de passar por uma reação álcali-sílica, resultando em uma possível expansão interna prejudicial.	ASTM (2021)
C 289 - Cancelada* - Método de teste padrão para potencial de reatividade álcali-sílica de agregados	Conduzido através da análise das medidas de sílica dissolvida, esse procedimento de ensaio oferece uma forma de identificar a propensão de um agregado, designado para ser utilizado em concreto, a desencadear uma reação álcali-sílica.	ASTM (2007)
Difração de raios X (DRX)	Possibilita a investigação das fases microconstituintes do material, incluindo a determinação do parâmetro de rede e do tipo de rede cristalina, a identificação das fases cristalinas presentes, a quantificação das frações relativas dessas fases em um material multifásico.	Neto <i>et al.</i> (2014); Tiecher <i>et al.</i> (2018); Abbas <i>et al.</i> (2019)
German concrete method	São avaliadas a expansão dos prismas de concreto e a largura máxima da fissura no cubo durante um teste com duração de 270 a 273 dias. Os prismas de concreto e um cubo são mantidos em uma câmara de névoa a 40°C, com medições feitas imediatamente, sem período de resfriamento.	Comitê Alemão para Concreto Armado (2013)
Método de Tomografia aprimorada	Uma análise quantitativa da evolução dos produtos da reação álcali-agregado e das redes de fissuras dentro da mesoestrutura do concreto é conduzida. BaSO <sub>4</sub> e CsNO <sub>3</sub> são potencialmente incorporados ao projeto da mistura de concreto com a finalidade de aprimorar o contraste duplo em tomografia de raios-X em escala laboratorial.	Shakoorioskooie (2022)
Método norueguês do prisma de concreto.	Teste acelerado de expansão por 12 meses. Prismas de concreto, utilizando o agregado e um cimento de alto teor de álcalis como referência, são acondicionados individualmente em recipientes e mantidos em uma sala com temperatura de 38°C e 100% de umidade relativa. As medições são realizadas subsequentemente a uma temperatura de 20°C.	Associação Norueguesa de Concreto (2005)

Quadro 1 - Métodos de ensaio da ocorrência da RAS

(conclusão)

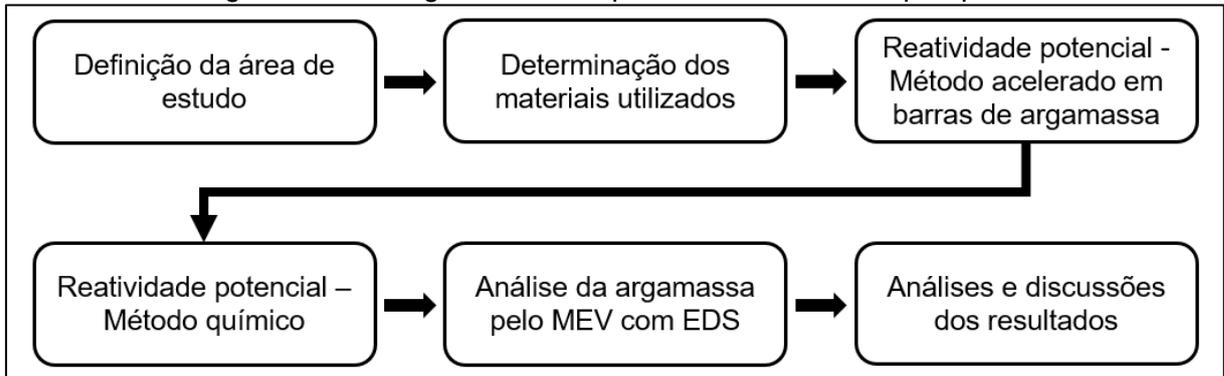
Método de Ensaio	Síntese do Método	Referência Bibliográfica
MEV com EDS acoplado (Técnica analítica)	As amostras passam por uma exposição a um feixe de elétrons, permitindo a obtenção de informações a partir dos sinais gerados. Isso visa analisar as microestruturas das barras, avaliar possíveis mudanças na composição, examinar as características mineralógicas dos agregados, observar morfologias típicas e a composição dos produtos da RAA.	Leemann e Munch (2019); Zapala- Slaweta e Swit (2019); Yazici <i>et al.</i> (2019)
NBR 15577 - 3 - Análise petrográfica por microscopia óptica	Método que envolve a observação macroscópica da amostra, classificando-a conforme o tipo, enquanto também são analisadas suas propriedades físico-mecânicas. Esse procedimento visa identificar a presença de fases minerais reativas, sendo importante mencionar que não é aplicável aos agregados miúdos.	Munir <i>et al.</i> (2018); Tiecher <i>et al.</i> (2018); Abbas <i>et al.</i> (2019)
NBR 15577 - 4 - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado	Procedimento acelerado utilizado para avaliar a tendência de um agregado em participar da reação expansiva álcali-silica na presença dos íons hidroxila ligados aos álcalis (sódio e potássio). Esse método baseia-se na variação de comprimento de barras de argamassa e utiliza um cimento-padrão como parte do processo de avaliação.	ABNT (2018)
NBR 9774 - Cancelada* - Verificação da reatividade potencial do agregado pelo método químico	Procedimento químico empregado para avaliar a potencial reatividade de agregados com os álcalis presentes no cimento Portland. Esse método consiste na reação entre o agregado previamente preparado e uma solução de hidróxido de sódio 1 N, realizada ao longo de 24 horas, sob temperatura de 80°C.	ABNT (2008)
O método dinamarquês Chatterji.	A medida da reatividade entre a sílica no agregado e o KCl é estabelecida por meio da avaliação da alcalinidade após 24 horas de reação, comparando-a com um padrão não reativo.	Chatterji (1988)
RILLEM AAR - 2 - Método acelerado de barras de argamassa.	A avaliação da expansão das barras é realizada por meio de barras de argamassa contendo o agregado e um cimento de alta alcalinidade de referência. Essas barras são submetidas ao armazenamento em NaOH 1M a 80°C, e a expansão é monitorada durante um período de 14 dias. Dois tamanhos alternativos de prismas são empregados.	Nixon e Sims (2016a)
RILLEM AAR - 4.1 - Método acelerado de prismas de concreto.	Discernir entre agregados pouco reativos e altamente reativos é realizado por meio de um teste de expansão que se estende por 20 semanas. Prismas de concreto, compostos pelo agregado em questão e um cimento de alta alcalinidade de referência (com 1,25% ± 0,05% de equivalente de óxido de sódio), são armazenados em recipientes individuais dentro de um reator a 60°C, sendo posteriormente medidos a 20°C.	Nixon e Sims (2016b)

Fonte: Autor (2024)

### 3 ETAPA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas as etapas executadas de forma sequencial, tendo como objetivo a padronização e identificação de cada parte do programa experimental. Desta forma, foi elaborado o fluxograma apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa



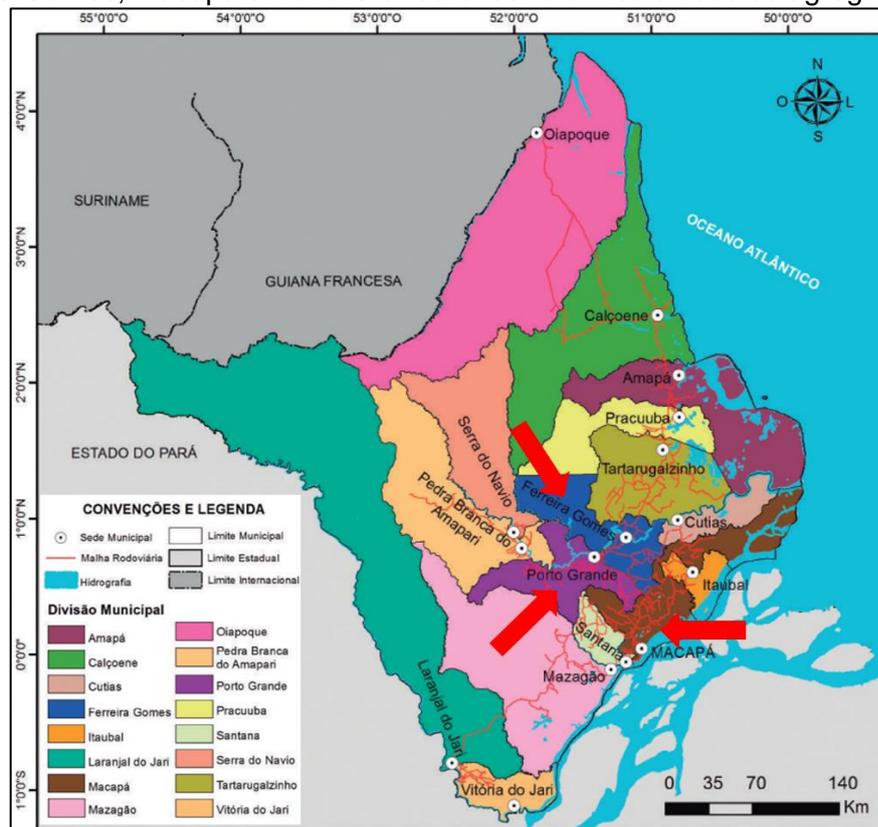
Fonte: Autor (2024)

#### 3.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O objeto de estudo são amostras de agregados miúdos das jazidas localizadas nos municípios de Ferreira Gomes/AP, Macapá/AP e Porto Grande/AP. Ao todo, foram selecionadas 8 jazidas, tal denominador foi alcançado por meio de informações da Agência Nacional de Mineração (ANM) através da plataforma SIGMINE (2023), e além disso, teve-se contato com os responsáveis dos locais para coleta autorizada. De forma adicional, dados coletados por Oliveira (2010) puderam acrescentar informações das jazidas já identificadas até aquele momento.

A preparação e coleta dos agregados avaliados nesta pesquisa foram conforme recomendações da NBR 15577-2 (ABNT, 2018), foram coletados diretamente das jazidas selecionadas 20 kg de cada amostra. Para as coletas das amostras de areia, destinadas aos ensaios de laboratório, teve-se como base a NBR 16915 (ABNT, 2021), pois estabelece procedimentos da amostragem, contemplando a extração, redução, armazenamento e transporte das amostras representativas deste agregado para o concreto. A seguir, a Figura 16, apresenta os municípios de coleta das matérias-primas dos ensaios.

Figura 16 - Localização dos municípios no estado do Amapá, destaque para os municípios de Ferreira Gomes, Macapá e Porto Grande onde foram coletados os agregados miúdos



Fonte: Adaptado Junior et al. (2022)

Macapá, a capital do Estado do Amapá, é abastecida em grande maioria pelas jazidas localizadas por estes 3 municípios destacados na Figura 16. As jazidas que compõem este trabalho estão devidamente inseridas no Quadro 2, com a identificação do nome usual, localidade e coordenadas geográficas, relacionando esses dados com suas respectivas nomenclaturas, as quais são utilizadas nas citações no decorrer desta pesquisa.

Quadro 2 - Coordenadas geográficas das jazidas onde foram coletadas as amostras de agregado miúdo para os ensaios de reatividade potencial com suas respectivas nomenclaturas

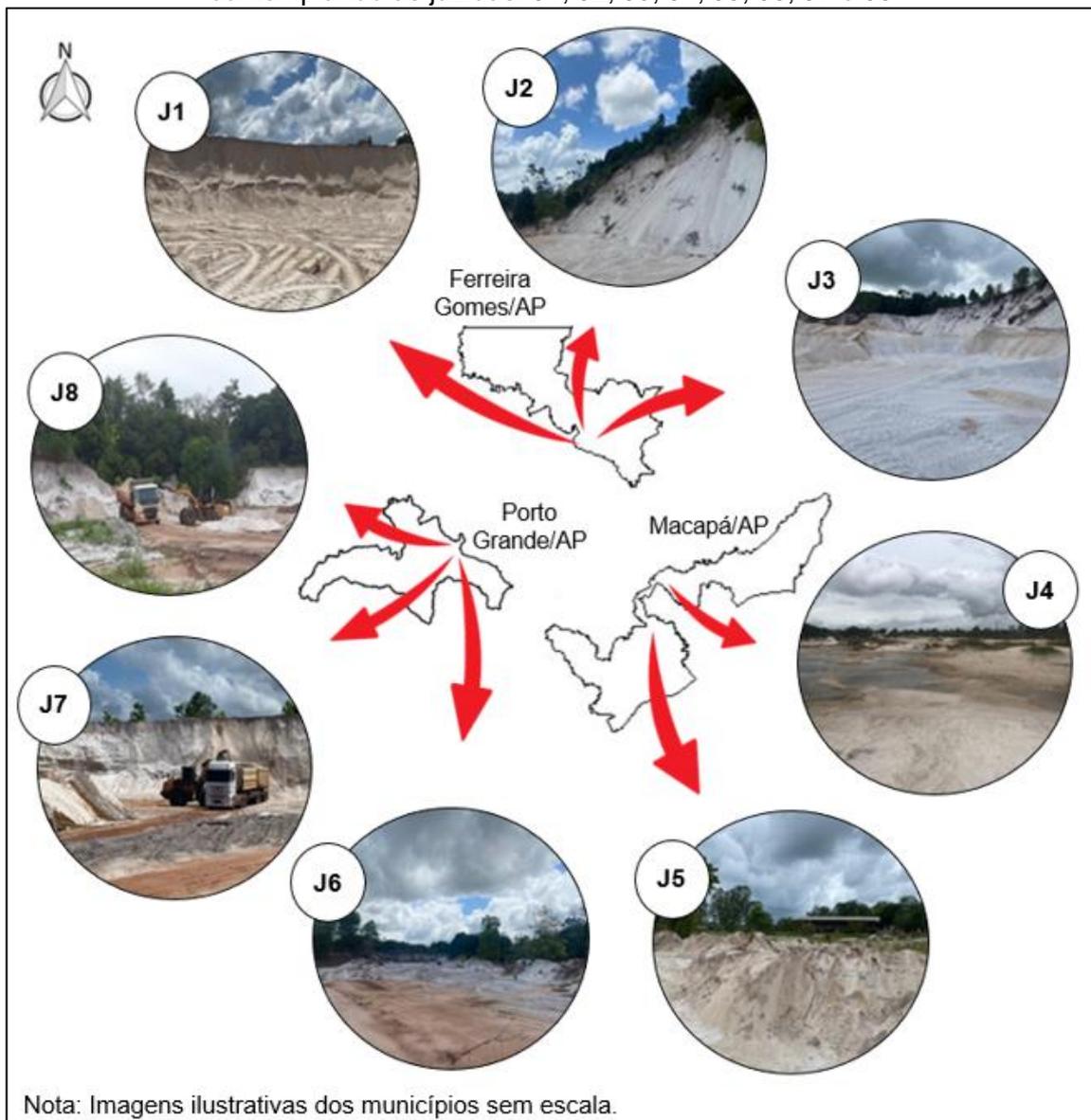
Nomenclatura	Nome da Jazida	Localidade	Coordenadas Geográficas	
J1	Areal Monte Sião	Ferreira Gomes/AP	0°42'14"N	51°19'46"W
J2	Areal Morro Branco	Ferreira Gomes/AP	0°42'31"N	51°19'59"W
J3	Areal Rio Pedreira	Ferreira Gomes/AP	0°42'26"N	51°20'20"W
J4	Areal do Trevo	Macapá /AP	0°33'09"N	50°51'04"W
J5	Areal Corre Água	Macapá /AP	0°45'25"N	50°50'27"W
J6	Areal do Rômulo	Porto Grande/AP	0°40'05"N	51°24'04"W
J7	Areal Translima	Porto Grande/AP	0°40'06"N	51°24'51"W
J8	Construtora Rio Pedreira	Porto Grande/AP	0°41'39"N	51°22'23"W

Fonte: Autor (2024)

Constatou-se que as jazidas atendem a necessidade da região em diferentes proporções, no qual as localizadas dentro dos municípios de Ferreira Gomes/AP e Porto Grande/AP são as maiores fornecedoras. Ademais, as jazidas localizadas em Macapá/AP, possuem como características atender população em pequena quantidade, pois não possuem grande estrutura para a extração em grande volume, sendo assim possível afirmar, que suas principais extrações são voltadas as obras próximas do local.

Na Figura 17 a seguir, são apresentados os panoramas das jazidas as quais foram coletadas as amostras de areia nos municípios de Ferreira Gomes/AP, Macapá/AP e Porto Grande/AP.

Figura 17 - Vista geral dos locais de coleta dos agregados miúdos utilizados na pesquisa, contemplando as jazidas: J1; J2; J3; J4; J5; J6; J7 e J8



Fonte: Autor (2024)

### 3.2 DETERMINAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Na confecção das argamassas foram utilizados materiais como o cimento, água e agregado miúdo. Sendo que estes materiais serão detalhados nos subtópicos seguintes.

#### 3.2.1 Cimento

Decidiu-se utilizar o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI) devido à sua elevada pureza e ausência de adições que possam regular a reação álcali-agregado. Os dados sobre as propriedades químicas do cimento foram adquiridos diretamente do fabricante, enquanto as informações sobre as propriedades físicas foram obtidas por meio de testes laboratoriais em conformidade com as normas NBR 16605 (ABNT, 2017); NBR 16372 (ABNT, 2015); NBR 11579 (ABNT, 2013); NBR 16607 (ABNT, 2018); NBR 16606 (ABNT, 2018); NBR 7215 (ABNT, 2019). Ambos os conjuntos de dados são apresentados nas Tabelas 1 e 2, sendo comparados com os requisitos definidos pela norma em vigor.

Tabela 1 - Propriedades químicas do CPV ARI

Composição Química	NBR	Unidade	Limites	CIMENTO
			NBR 16697	CPV ARI
CaO livre (CaOL)	NBR NM 13	%	-	1,37
Resíduo Insolúvel (RI)	NBR16697	%	≤ 3,5	1,26
Perda ao Fogo (PF)	NBR16697	%	≤ 6,5	5,52
Anidrido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	NBR16697	%	≤ 4,5	2,65
Óxido de Magnésio (MgO)	NBR 14656	%	-	3,02
Óxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )	NBR 14656	%	-	17,28
Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	NBR 14656	%	-	3,95
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	NBR 14656	%	-	4,18
Óxido de Cálcio (CaO)	NBR 14656	%	-	58,59
Óxido de Sódio (Na <sub>2</sub> O)	NBR 14656	%	-	0,1
Óxido de Potássio (K <sub>2</sub> O)	NBR 14656	%	-	0,35
Equivalente Alcalino em Na <sub>2</sub> O (0,658 x K <sub>2</sub> O% + Na <sub>2</sub> O%)			-	0,33

**Fonte:** Dados fornecidos pelo fabricante (2023)

Tabela 2 - Propriedades físicas do CPV ARI

Composição Física		CPV ARI	
		Valor	Limites NBR 16697/2018
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,24	-
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4,692	-
Finura na peneira #200 (%)		0,18	-
Finura na peneira #325 (%)		1,67	-
Tempo de Pega	Inicial (min)	150	≥ 60
	Final (min)	200	≤ 600
Consistência normal (%)		28	-
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	16,20	≥ 14
	03 dias	26,45	≥ 24
	07 dias	34,18	≥ 34
*Expansibilidade *Nota: Dados do fabricante (2023)	Quente	0,5	≤ 0,5

Fonte: Autor (2024)

### 3.2.2 Água

A água utilizada para a preparação das argamassas do referido trabalho foi isenta de íons, isto significa, deionizada.

### 3.2.3 Agregado miúdo

Os ensaios de caracterização tecnológica dos agregados foram: massa unitária; massa específica e composição granulométrica, em conformidade respectivamente com as normas NBR 16972 (ABNT, 2021); NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 17054 (ABNT, 2022). Os agregados utilizados nesta pesquisa foram obtidos das jazidas mencionadas no Quadro 2 e classificados de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), que define como agregados miúdos aqueles retidos entre 0,15mm e 4,75mm.

Em relação a composição granulométrica das amostras de agregados miúdos tem-se os módulos de finura e as dimensões máximas características (DMC), que são apresentadas na Tabela 3. Por meio das análises dos agregados miúdos para o concreto, teve-se como resultado a curva granulométrica em diferentes zonas, mas todos os agregados atenderam ao preconizado pela NBR 7211 (ABNT, 2022).

Tabela 3 - Caracterização dos agregados miúdos

	<b>Massa unitária g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Massa específica g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Módulos de finura</b>	<b>DMC mm</b>
J1	1,5321	2,62	2,66	2,36
J2	1,4560	2,60	2,36	2,36
J3	1,4590	2,63	2,84	4,75
J4	1,5180	2,64	1,66	2,36
J5	1,6229	2,63	2,28	2,36
J6	1,5165	2,62	2,36	2,36
J7	1,3929	2,60	1,97	2,36
J8	1,5718	2,63	2,44	2,36

**Fonte:** Autor (2024)

A NBR 15577-4 (ABNT, 2018) preconiza uma granulometria padrão para a realização do ensaio, estabelecendo uma quantidade do material em cada intervalo de peneiras. Neste sentido uma diferença considerável foi observada, foi realizado o peneiramento de aproximadamente 5 kg da amostra J4 para atender aos critérios normativos, por outro lado a amostra J8 com graduação aberta exigiu cerca de 20 kg para alcançar os valores estipulados pela NBR.

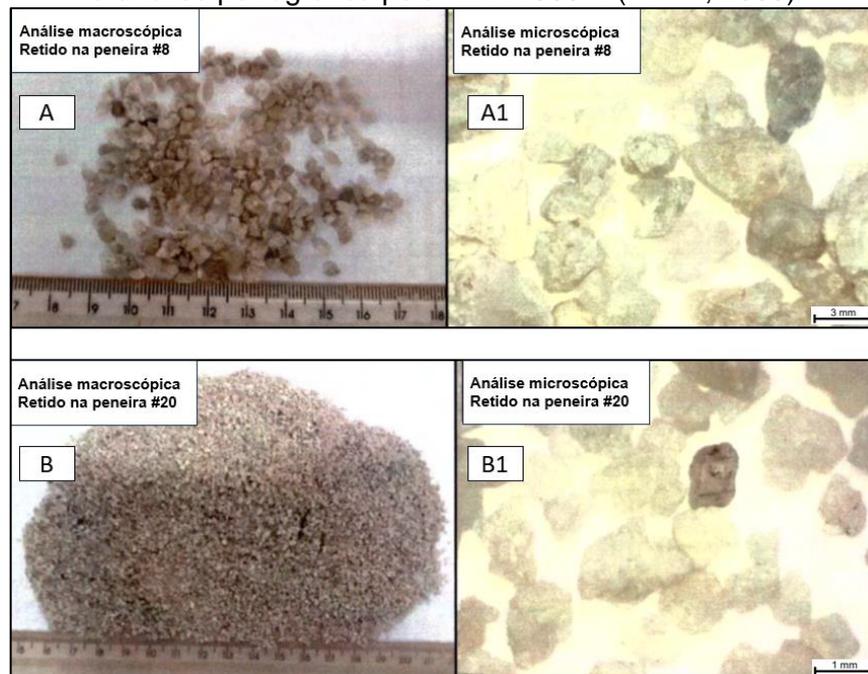
Nota-se que, ao estabelecer tal padrão, negligencia-se as características individuais de cada jazida, que podem conter areias bem graduadas, de graduação aberta e até mesmo de graduação uniforme. Quando o agregado não é bem graduado, conforme amostra J8 supracitada, há um baixo entrosamento e são encontrados diversos vazios na matriz (Pinto, 2006). Mehta e Monteiro (2014) complementam que a granulometria do agregado influencia na trabalhabilidade, consumo de água e cimento em matrizes cimentícias.

Por outro lado, a norma vem corroborando com o entendimento de Luz e Almeida (2012), pois afirmam que se melhor distribuído granulometricamente o agregado, menor o consumo do cimento hidráulico, dado que o entrosamento acarreta mais plasticidade a matriz diminuindo assim a quantidade de cimento, e consequentemente o teor de álcalis presente no concreto.

Além das caracterizações obtidas, considera-se como fator importante a análise petrográfica dos agregados miúdos, conforme NBR 7389-1 (ABNT, 2009). Esta é realizada por investigações das frações granulométricas selecionadas, sob lupa estereoscópica e identificação e quantificação das fases minerais contidas em cada fração, conforme sua potencial reatividade com o concreto, assim como da análise da forma dos grãos (Frasca e Paraguassu, 2017).

Nesse contexto, tem-se a análise petrográfica do agregado miúdo de Porto Grande, da jazida Morro Branco, sinalizada neste trabalho como J2, dados estes fornecidos pela empresa Falcão Bauer (2018), seguindo a NBR 7389-1 (ABNT, 2009). A seguir na Figura 18, são apresentadas imagens dos registros macroscópicos (Figura 18-A e 18-B) e microscópicos (Figura 18-A1 e 18-B1) da amostra em diferentes peneiras.

Figura 18 - Registros macroscópicos e microscópicos da amostra de areia da J2, submetida a análise petrográfica pela NBR 7389-1 (ABNT, 2009)



Fonte: Adaptado Falcão Bauer (2018)

Desta forma tendo como base as análises microscópicas, constatou-se o grau de esfericidade predominante como baixo, o grau de arredondamento predominante como anguloso, e superfície predominante como rugosa. Além disso o tipo de rocha constatado foi sedimentar. Sobre a composição mineralógica do material retido com porcentagem em número de grãos, o relatório aponta para composição predominante de elementos inócuos, como: turmalina 0,07%, feldspato 0,05%, magnetita 0,95%, e 89,01% de quartzo (Falcão Bauer, 2018).

Continuando, o único elemento identificado como deletério, a calcedônia representou apenas 0,09 % da fração total, e no que se refere a elementos potencialmente deletérios o quartzo policristalino representou 3,51% e a rocha 1,57% da fração da amostra investigada. Os matérias friáveis foram, mica 4,11%, torrões de argila 0,03% e fragmentos de conchas 0,61% (Falcão Bauer, 2018). Ressalta-se que a classificação quanto a potencialidade reativa do agregado segue os limites de

elementos estipulados pela NBR 15577-3 (2018). Nesse sentido, os dados sinalizados auxiliarão a explicar os comportamentos observados no ensaio de expansão.

### 3.3 REATIVIDADE POTENCIAL - MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA

A abordagem realizada pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018) para o método acelerado em barras de argamassa aponta que o resultado desse procedimento é a obtenção da média de expansão das três barras de argamassa. Caso a expansão seja inferior a 0,19% no 30º dia, o agregado é classificado como inócuo, enquanto valores iguais ou acima de 0,19% indicam uma classificação potencialmente reativa.

A NBR 15577 - 4 (ABNT, 2018) trata da avaliação direta e precisa da propensão de um agregado em participar da reação expansiva álcali-sílica quando exposto aos íons hidroxila provenientes dos álcalis presentes no cimento. Engloba-se neste método a fabricação, moldagem, dosagem, cura, relação água/cimento e quantidade de amostras, centrando-se na medição da variação de comprimento das barras, isto é, na expansão das barras de argamassa.

Para a eficácia e precisão dos resultados, algumas condições são fundamentais a serem consideradas no que diz respeito à interação dos materiais utilizados nos ensaios laboratoriais com o ambiente do laboratório, pois variações de temperatura e umidade interferem diretamente na precisão dos resultados. Por conseguinte, a norma estabelece que a temperatura dos materiais secos deve permanecer em  $24 \pm 4$  °C; a sala de moldagem deve situar-se em uma temperatura de  $24 \pm 4$  °C, com umidade relativa maior ou igual a 50%; a água de amassamento precisa ser mantida à temperatura de  $23 \pm 2$ °C; a câmara úmida deve permanecer a uma temperatura de  $23 \pm 2$ °C, com umidade relativa maior ou igual a 95%; e o banho termorregulador deve armazenar as barras de argamassa a uma temperatura de  $80 \pm 2$ °C.

#### 3.3.1 Granulometria requerida da areia, preparação da argamassa e molde das barras

Para a produção da fração miúda de 990 gramas do ensaio RAA foi utilizado peneiras de série normal 0,15 mm a 4,75 mm, até se obter as dimensões e quantidades necessárias, conforme NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

Observou-se durante os ensaios que todas as amostras de agregados miúdos atendem aos critérios estabelecidos na Tabela 5, deste modo não houve necessidade da utilização de porcentagem acumulada do material até aquela fração. Foram

executadas a separação dos materiais, e após finalizada a etapa da obtenção de quantidades adequadas das amostras de agregados, água e cimento para a condução dos ensaios, os demais processos foram executados, envolvendo: a preparação da argamassa e moldagem das barras, seguindo fluxograma apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Execução das etapas do método acelerado de barras de argamassa conforme NBR 15577-4 (2018)



Fonte: Autor (2024)

As dimensões das barras de argamassa foram de 25 X 25 X 284 mm. Há presença de pontos de fixação para pinos de aço inoxidável nos moldes destinados à moldagem dos corpos de prova (CPs), esses pinos foram utilizados como referência para as medições de expansão após a desmoldagem.

O método acelerado possui variações na dosagem da argamassa dependendo dos valores obtidos da massa específica dos agregados. Como a massa específica das amostras de todas as jazidas foram superiores a 2,45 g/cm<sup>3</sup> conforme evidenciado no item 3.2.3, a dosagem foi ajustada da seguinte forma: uma parte de cimento para 2,25 partes de agregado, em termos de massa, e uma relação água/cimento de 0,47, também em massa. Como resultado, foram empregados 440 g de cimento, 990 g de agregado e 206,8 g de água.

### 3.3.2 Cura inicial, aceleração da reação e leituras das barras

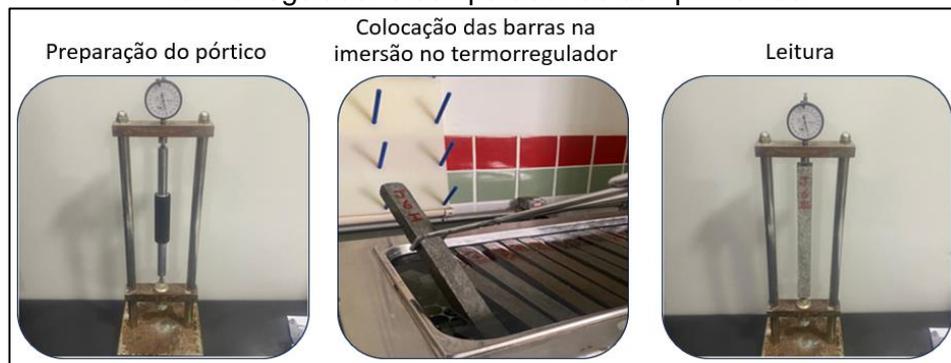
Após a moldagem, as barras de argamassa foram colocadas em uma câmara úmida mantida a uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C, por 24 horas. Concluída a fase de cura, estas foram retiradas dos moldes e devidamente marcadas, seguindo um padrão de identificação. Como exemplo a amostra J1, em que suas barras foram marcadas como J1-I, J1-II e J1-III.

Após 24 horas da desmoldagem as barras foram colocadas no banho-termorregulador submersas em água a uma temperatura de 80°C, seguindo nessas condições por mais 24 horas. Em ato contínuo houve a remoção das barras de forma individualizada do banho-termorregulador, e foram medidas com a utilização do relógio comparador, sendo essas consideradas as leituras zero. Nessa condição vale destacar que as barras foram continuamente posicionadas da mesma maneira e, antes de cada leitura diária, a leitura da barra-padrão foi realizada, conforme estipulado pela norma.

Posteriormente, as barras foram submergidas em uma solução de hidróxido de sódio com concentração de 1 molar, mantida a uma temperatura de 80°C, sem contato com o recipiente ou entre si e garantindo imersão completa. Para realizar a composição da solução de NaOH, foi feita a diluição de 40 g de hidróxido de sódio em 900 mL de água deionizada seguida pela adição de água até atingir 1 litro de solução. Ao final desta etapa, para encher o recipiente do banho termorregulador foram utilizados ao todo 10 litros de solução.

Foram realizadas leituras nas idades de 16 e 30 dias, e leituras intermediárias para identificar possíveis variações de comprimento nas barras de argamassa e avaliar o comportamento dos agregados miúdos frente a RAS, conforme Figura 20 a seguir. O método permite acelerar as reações aproveitando a presença de íons alcalinos na solução, proporcionando a obtenção de resultados em um curto período de tempo.

Figura 20 – Equipamentos utilizados no método acelerado em barras de argamassa: Pórtico, termorregulador e comparador de comprimentos



Fonte: Autor (2024)

As medições de expansão foram feitas por meio do relógio comparador digital marca e modelo Mitutoyo – Absolute com precisão de 0,001 mm. Sendo os resultados expressos em porcentagem de expansão, correspondendo às médias das três barras.

### 3.4 REATIVIDADE POTENCIAL - MÉTODO QUÍMICO

Foram utilizados outros procedimentos a fim de fortalecer a base técnica relacionada a esse fenômeno da RAS, na avaliação do agregado optou-se por utilizar também o método químico, que visa analisar a reatividade potencial das amostras ao considerar a relação entre a concentração de sílica dissolvida e a redução da alcalinidade. Por meio deste método, buscou-se averiguar se os resultados apontariam para o mesmo entendimento do método acelerado em barras de argamassa, e o ensaio mostrou-se ser rápido e exequível.

O método químico tem suas diretrizes estabelecidas pela NBR 9774 (ABNT, 1987), cancelada em 2008 sem substituição, sendo composto por 4 etapas, a primeira é sobre o preparo das soluções, seguida pelo preparo das amostras na etapa 2. Posteriormente, nas etapas 3 e 4 aborda-se o ataque das amostras, e as determinações da sílica dissolvida (Sd) e redução da alcalinidade (Ra), respectivamente. Salienta-se que a utilização de soluções se dá no ataque das amostras e também nas determinações dos parâmetros envolvidos.

As amostras foram preparadas, separando três porções do agregado na quantidade de 25 g e colocadas dentro de reatores distintos, juntamente com 25 ml de solução de NaOH na concentração 1N. Para cada amostra de jazida teve-se quatro reatores, sendo o reator IV o ensaio em branco (sem amostra) utilizado como referência, este serve como prova que o processo de execução e resultados não tiveram interferência decorrentes de contaminação das ferramentas utilizadas. Após

fechados os reatores, conforme Figura 21, foram levados para estufa e conservados por 24 horas a temperatura de 80° C.

Figura 21 - Reatores utilizados para colocação das amostras de agregados miúdos na execução do método químico



Fonte: Autor (2024)

Ato contínuo, iniciaram as determinações de Ra e Sd. Esta fase consiste na passagem de uma pequena quantidade da solução e da amostra de cada reator por meio de papel de filtração médio disposto no cadinho de *Gooch*. Ressalta-se que nesse processo foi empregado um kitassato, em conjunto com uma bomba de vácuo.

Logo após finalizada a etapa de filtração, o tubo de ensaio foi vedado com uma rolha de borracha. O filtrado foi agitado para homogeneização, e uma alíquota de 10 ml de cada filtrado foi transferida utilizando uma pipeta para um balão volumétrico de 200 ml, enchendo o recipiente com água. Todas as análises posteriores foram conduzidas com base nesse filtrado.

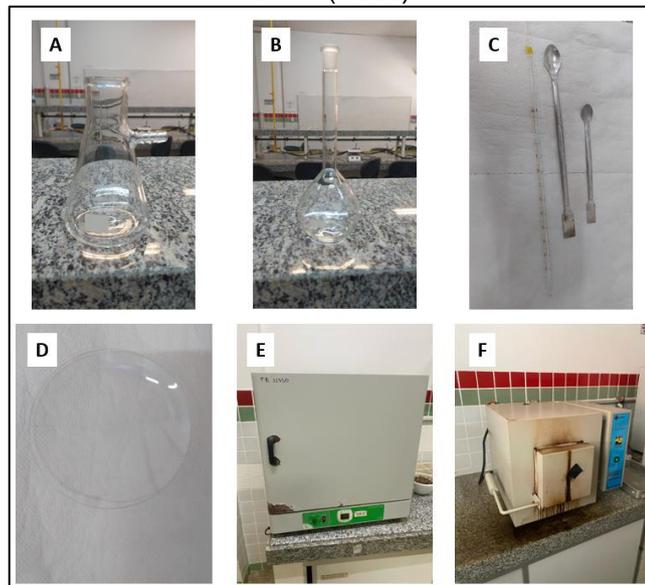
Para a redução da alcalinidade, se faz necessário o uso de 20 ml do filtrado, passando este para o frasco Erlenmeyer, e posteriormente adicionando dosagens de água, 3 gotas fenolftaleína e HCL (ácido clorídrico), quando a solução se tornou incolor, anotou-se o valor do ácido utilizado. A continuação do processo se deu com a adição de 3 gotas de solução de verde de bromocresol e feita a titulação de HCL até a mudança de cor da solução, anotando o volume de ácido consumido.

Já para a determinação da sílica dissolvida, se faz necessário transferir 100ml do filtrado do balão volumétrico para cápsula adicionando 10 ml de HCL deixando evaporar em banho maria até a secagem, posteriormente sobre o resíduo foi adicionado 20 ml de HCL e coberto com uma capsula de vidro, este resíduo permaneceu por 10 minutos sobre o banho maria. Seguindo, dilui-se a solução com um volume de água quente, filtrou-se em papel de filtração e dela separou-se a sílica, lavando-a com 3 porções de HCL quente e água quente até a eliminação dos cloretos.

Após a transferência do papel contendo o resíduo para o cadinho, ocorreu a calcinação, inicialmente com chama baixa até se alcançar à 1100°C até a massa permanecer constante. Por fim, realizou-se o tratamento da sílica com água, ácido sulfúrico e ácido fluorídrico, e após a evaporação destes, foi calcinado novamente por 10 min à 1000°C. Ressalta-se que as concentrações de HCL são diferentes em cada etapa do ensaio, e foram utilizadas tais concentrações de acordo com a NBR 9774 (2008).

Alguns dos equipamentos empregados no ensaio são apresentados na Figura 22, englobando: A - kitassato; B - balão volumétrico; C - pipeta e espátulas de aço; D - vidro de relógio; E - estufa; F - forno mufla.

Figura 22 - Equipamentos utilizados durante a execução do método químico seguindo NBR 9774 (2008)



Fonte: Autor (2024)

Com base na média dos resultados alcançados de cada amostra, elaborou-se um gráfico que expressa a reatividade do agregado, categorizando-o nas regiões do gráfico como: inócuo, potencialmente deletério e deletério.

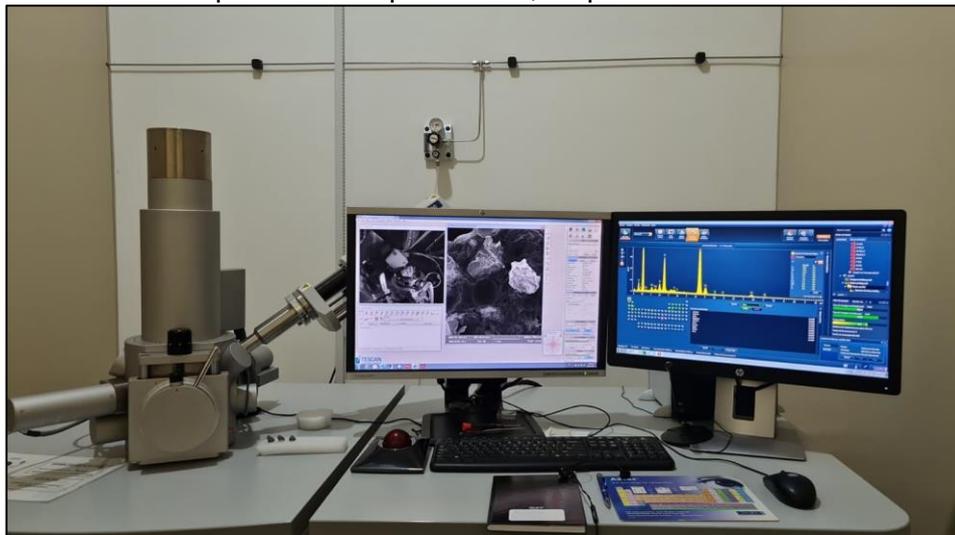
### 3.5 ANÁLISE DA ARGAMASSA PELA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROMETRIA POR ENERGIA DISPERSA (EDS)

Optou-se pela técnica analítica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectrometria por energia dispersiva (EDS) acoplado para a investigação do agregado e análises de possíveis compostos hidratados do cimento Portland e compostos expansivos.

A aplicação do MEV como técnica analítica serve para identificar a formação interna de gel expansivo e detectar possíveis minerais reativos. Segundo estudos realizados por Munhoz (2007), Cyr e Pouhet (2015), Shi *et al.* (2020), Giannini, Snyder, Drimalas (2021), Mello *et al.* (2021), Junior (2022), Glinicki *et al.* (2022), Leemann e Sanchez (2023), sua eficácia é comprovada para análise morfológica dos géis expansivos decorrentes dessa reação.

Os instrumentos utilizados consistem em um MEV da marca TESCAN, modelo VEGA3, e para análise química semiquantitativa dos elementos químicos um detector EDS marca OXFORD INSTRUMENTS, modelo X-MAX-80, como ilustrado na Figura 23. Estes equipamentos estão instalados no Laboratório Multiusuário de Microscopia e Litografia Eletrônica da UFPA.

Figura 23 – MEV com EDS acoplado para realização da análise morfológica e análise química semiquantitativa, respectivamente



Fonte: Autor (2024)

A microscopia eletrônica de varredura com sonda EDS acoplada tem por objetivo contribuir para análises de compostos hidratados do cimento, assim como identificar possíveis presenças do gel expansivo da RAS. Para aquisição de imagens os elétrons secundários desempenham um papel crucial fornecendo informações topológicas sobre a amostra e sendo indispensáveis para a visualização de sua estrutura. Associadamente, os elétrons retroespalhados oferecem informações quanto o número atômico dos elementos presentes, enquanto os raios-X identificam e quantificam os elementos constituintes do material.

Devido à capacidade de ampliação das imagens, o MEV pode contribuir na identificação dos produtos resultantes da reação álcali-agregado (Diamond, 2004).

Para abrangência do mapeamento, foram coletados fragmentos de distintas regiões das argamassas para análise da morfologia, cabe ressaltar que as barras foram rompidas com idade de 34 dias e após serem submetidas ao método acelerado de barras de argamassa.

No que refere a fragmentação as barras a priori foi realizada o corte das barras com serra metálica circular, contudo notou-se que ao realizar tal procedimento a superfície da amostra era amplamente desgastada alterando suas características iniciais e comprometendo a análise pelo MEV tendo em vista que os componentes da barra estavam sendo “lixados”. Além disto, durante o corte eventuais produtos expansivos poderiam ser dissipados devido ao equipamento utilizado.

Desta forma, optou-se pela demolição das barras de argamassa com o auxílio de um martelo tipo unha para permitir maior preservação da superfície que seria analisada no MEV. Ato contínuo, os fragmentos foram selecionados, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Fragmentos da demolição das amostras submetidas ao método acelerado de barras de argamassa utilizados na investigação morfológica



Fonte: Autor (2024)

Após a metalização dos fragmentos com ouro, foi realizada a utilização do MEV com EDS para conduzir as identificações de feições ou características decorrentes da RAS, como: presença de gel nos poros, bordas de reação ao redor dos agregados e microfissuras. Com base nos dados, buscou-se compreender as razões pelas quais ocorreu ou não a reação álcali-agregado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 REATIVIDADE POTENCIAL – MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARAGAMASSA

Esse método é amplamente usado no reconhecimento de agregados reativos em diversos países, e tem se apresentado eficaz nas últimas décadas para identificação do comportamento reativo ou inócuo dos agregados, sendo que diversos trabalhos obtiveram dados relevantes (Valduga, 2002; Tiecher, 2006; Couto, 2008; Mizumoto, 2009; Sanchez *et al.*, 2017; Schovanz *et al.*, 2019).

Os resultados dos ensaios de cada amostra são demonstrados por meio de tabela e gráficos feitos a partir da média das variações de expansão das 3 barras durante o período de execução do método. São apresentados na Tabela 4 os valores médios de expansão das barras, designando os agregados como inócuos ou potencialmente deletérios de acordo sua potencialidade reativa no último dia de ensaio.

Durante todos os dias do ensaio, nenhuma amostra exibiu percentuais de expansão acima dos valores que a norma define como reativas, tendo em vista que não atingiram o patamar de 0,19% ao 30° dia. Não alcançar esse parâmetro indica comportamento inócuo das amostras. As amostras J7 e J8 apresentaram ao final das leituras, percentuais de expansão mais elevados ao registrarem 0,12% e 0,11% respectivamente, já as amostras que não apresentaram expansão foram J1, J2 e J6.

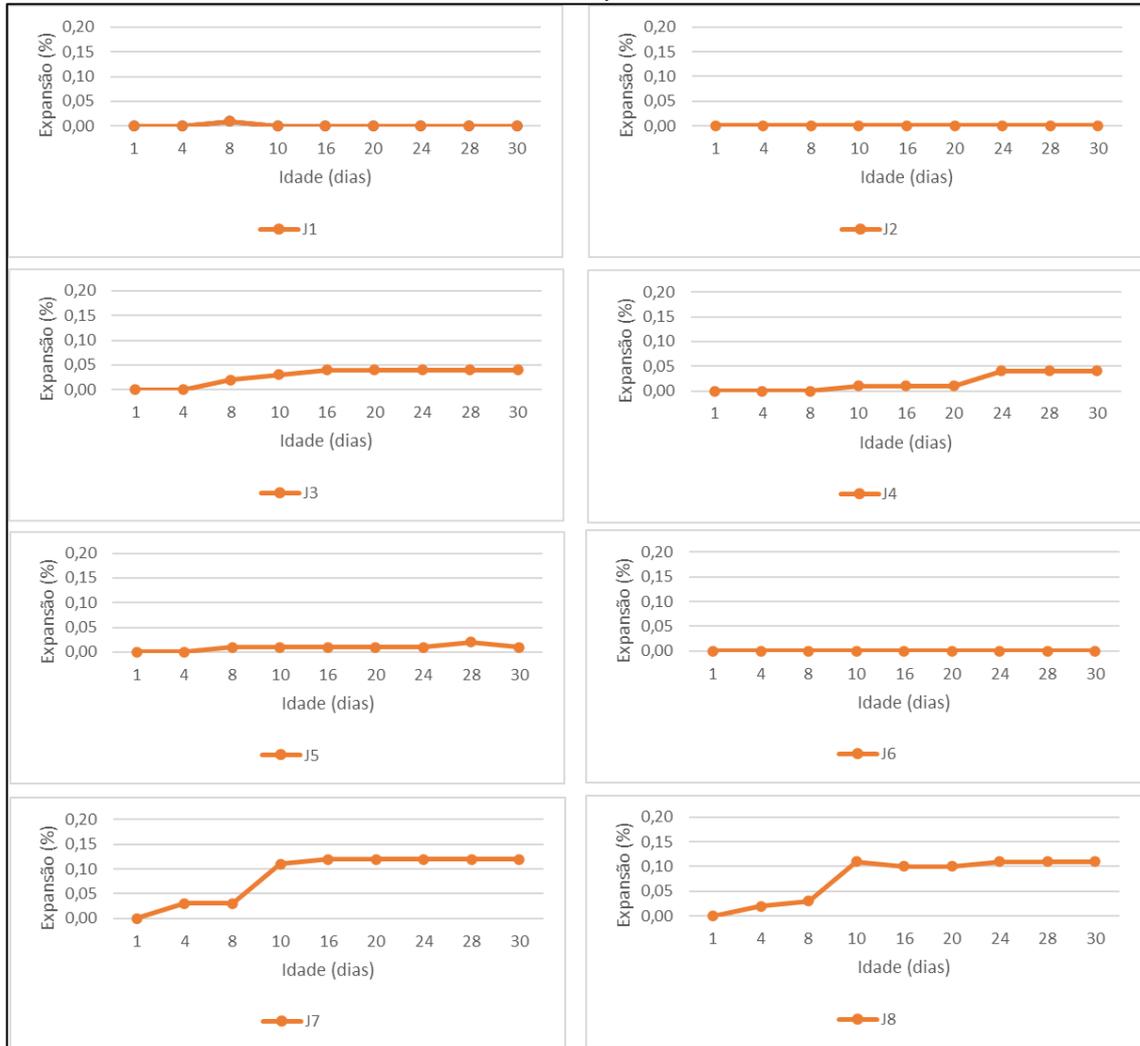
Tabela 4 - Média das expansões das três barras de argamassas das amostras J1 à J8, com classificação da potencialidade reativa

Idades (dias)	J1 (%)	J2 (%)	J3 (%)	J4 (%)	J5 (%)	J6 (%)	J7 (%)	J8 (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02
8	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03
10	0,00	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	0,11	0,11
<b>16</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,12</b>	<b>0,10</b>
20	0,00	0,00	0,04	0,01	0,01	0,00	0,12	0,10
24	0,00	0,00	0,04	0,04	0,01	0,00	0,12	0,11
28	0,00	0,00	0,04	0,04	0,02	0,00	0,12	0,11
<b>30</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>
<b>Resultado</b>	<b>Inócuo</b>							

Fonte: Autor (2024)

A Figura 25 apresenta os gráficos individualizados da expansão das barras de argamassas no decorrer do tempo, nota-se que as amostras não possuem potencial deletério.

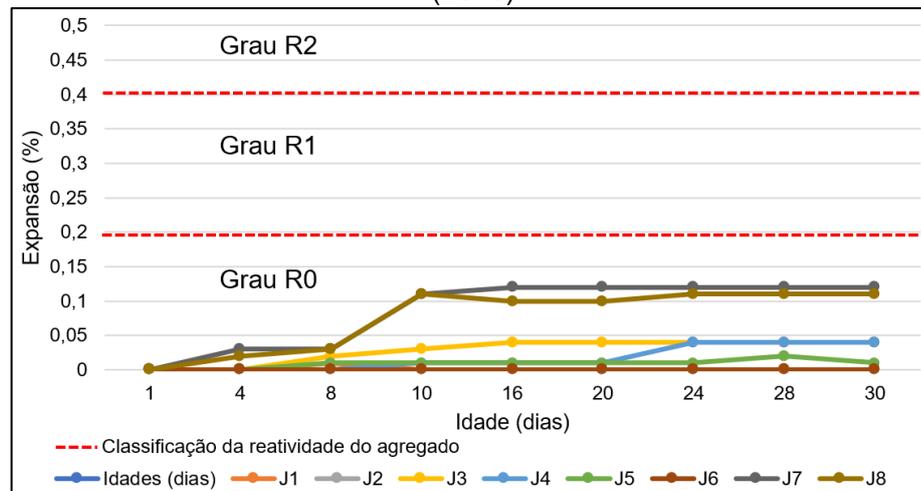
Figura 25 - Resultados individualizados da expansão das barras de argamassa em função do tempo



Fonte: Autor (2024)

Todas as amostras se distanciaram consideravelmente do percentual que poderia resultar em risco de utilização do agregado quanto a reatividade. Na Figura 26, no comparativo entre os diversos resultados, observa-se que oscilações ocorreram mas não ultrapassaram o limite para caracterizar os agregados como potencialmente deletério, permanecendo distante do grau R1 que são expansões de 0,19% a 40%, do grau R2 que ficam entre 0,41% e 0,60%, e do grau R3 que consiste em expansões superiores a 0,60%. Dessa forma, pode-se afirmar que os agregados miúdos de Ferreira Gomes/AP, Macapá/AP e Porto Grande/AP mostraram-se inócuos dentro das condições submetidas.

Figura 26 - Síntese dos resultados da expansão das barras de argamassa em função do tempo, contendo a classificação do grau de reatividade do agregado seguindo NBR 15577-1 (2018)



Fonte: Autor (2024)

As análises da reatividade do agregado partiram da necessidade de avaliação destes para utilização em diferentes tipos de obras no Estado. A partir dos resultados obtidos tem-se a verificação da utilização ou não dos agregados na preparação de concretos e argamassas em diferentes classes de estruturas de acordo com seu potencial reativo.

O grau de reatividade dos agregados deve ser determinado pelos ensaios previstos na NBR 15577-1 (ABNT,2018), tais agregados podem influenciar na ocorrência da RAS, a depender das demais propriedades dos elementos acrescidos no concreto, suas dimensões e das condições de exposição da peça ao ambiente. Ainda segundo a norma, as medidas preventivas são em função do grau de risco e da classe de estrutura.

Considerando que os resultados das análises das médias das 3 barras de argamassa de cada amostra foram inferiores à 0,19% de expansão no 30º dia, tem-se a classificação dos agregados como agregados potencialmente inócuos grau R0, evidenciado na Figura 26. Logo, o grau de risco de ocorrência da RAS nestas condições, é desprezível conforme NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

Atender as diretrizes normativas do método acelerado de argamassas é fundamental, sendo que alterações até nas frações granulométricas requeridas podem exercer influência no resultado final do ensaio. De acordo com Trottier *et al.* (2021a) e Trottier *et al.* (2021b), os agregados influenciam a geração e propagação de fissuras durante a RAS. Tal afirmação é melhor compreendida quando Grattan-Bellew (1996)

e Fournier e Bérubé (2000) afirmam que a diminuição das partículas em regra, está propensa a aumentar a reação em razão do aumento da superfície específica do agregado.

No que se refere ao tempo de execução do ensaio, Moreira (2021) afirma que se tem importância de analisar a evolução, e não somente a expansão na idade de 30 dias, isso ocorre devido a possibilidade de ocorrência de falsos negativos/positivos.

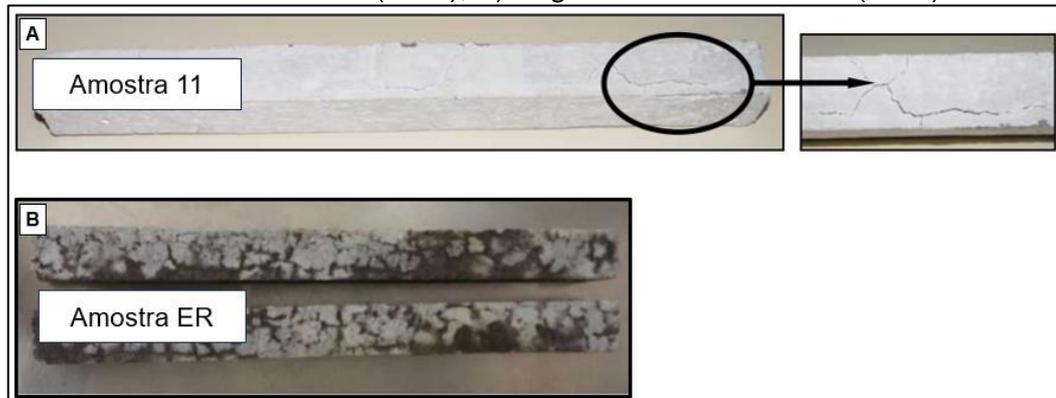
A confirmação da importância dos 30 dias de ensaio é visualizada pelos resultados de expansibilidade obtidos por Costa *et al.* (2015) com areias da região metropolitana de Fortaleza, e de Schovanz *et al.* (2019) com as areias do Estado do Rio Grande do Sul. No primeiro, todas as amostras, 6 ao todo, foram analisadas e classificadas como de comportamento inócuo, toda via, ocorreu importante variação nas leituras do 16° dia até o final do ensaio, mesmo não constatadas expansões superiores a 0,19% ao 30° dia. No segundo, ao final do ensaio todas as amostras apresentaram expansões que apontaram para potencial deletério, contudo ao 16° dia das 8 amostras, 3 ainda não apresentavam reatividade.

Nas jazidas do Estado do Amapá abordadas neste estudo, ocorreram variações das leituras do 16° dia em relação ao 30° nas jazidas J4 e J8. Logo, mostra-se que o atendimento total ao período de ensaio determinado pela norma deve ser cumprido para que dados corretos sobre o potencial deletério dos agregados sejam alcançados.

Após o ensaio de determinação da reatividade potencial pelo método acelerado de barras de argamassa e a análise de risco de ocorrência da RAS, procedeu-se uma análise visual para constatação dos aspectos das barras. Tal análise foi baseada nas investigações de Tiecher (2006) no qual utilizou a técnica de análise dos aspectos visuais em algumas barras de argamassa moldadas com o CPV-ARI após o ensaio acelerado, e identificou na amostra 11 que apresentou expansão de 1,05 % aos 16 dias, fissurações em formato de mapa, conforme Figura 27-A.

Costa e Tiecher (2018) ao utilizarem a mesma técnica, identificaram na amostra ER microfissuras mapeadas que estavam presentes em todo comprimento da barra, conforme Figura 27-B. Notadamente em ambos os casos, há presença da manifestação característica da RAS, que são as fissuras tipo mapa (Poole, 1992; Godart e Rooij, 2017).

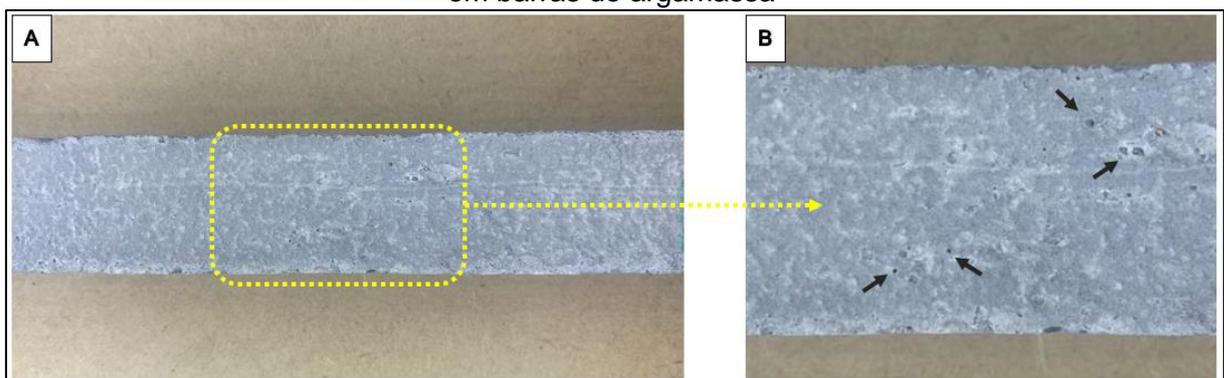
Figura 27 - Registro da análise visual da barra de argamassa após método acelerado, A) Conforme Tiecher (2006); B) Segundo Costa e Tiecher (2018)



**Fonte:** Adaptado: A) Tiecher (2006) e B) Costa e Tiecher (2018)

Correlacionado a isto, na barra confeccionada com agregados do município de Porto Grande que apresentou maior nível de expansão – J7-I, com 0,12% ao 30º dia foi submetida a análise visual e não foi identificado tal manifestação, conforme Figura 28-A. Ressalta-se que todas as barras de argamassa foram verificadas, e não apresentaram grandes mudanças, ficando isentas de fissuras, sejam elas em formato de mapas ou não, isentas de manchas superficiais e exsudações. Foi constatada uma pequena quantidade de poros, conforme Figura 28-B, possivelmente ocorrido durante o adensamento manual da argamassa na forma. De qualquer modo, não se constatou sinal de deterioração pela RAS visível a olho nu, evidenciando novamente a não manifestação da reação.

Figura 28 - Registro da análise visual da barra de argamassa J7-I após o método acelerado em barras de argamassa



**Fonte:** Autor (2024)

Em relação a outra amostra, especificamente a J2, por meio da análise petrográfica conforme item 3.2.3 deste trabalho, a amostra foi considerada potencialmente inócua em relação a sua reatividade. Porém Falcão Bauer (2018) afirma que o grau de reatividade destes agregados só poderá ser avaliado através de ensaios específicos de desempenho. Neste sentido, sugerem a realização de ensaios

de reatividade álcali-agregado tais como a NBR 15577-4. Desta forma, tem-se o método acelerado de barras de argamassa executado nesta pesquisa como componente fundamental para constatação da reatividade potencial dos agregados.

Os resultados obtidos no presente estudo mostram resultado inócuo das areias coletadas dos municípios de Ferreira Gomes/AP, Macapá/AP e Porto Grande/AP. Os dados aqui apresentados são distintos com os trabalhos que abordaram uma gama de agregados miúdos, como exemplo o de Valduga (2002) que evidenciou elevada potencialidade álcali reativa das areias do Estado de São Paulo, utilizando o mesmo tipo de cimento deste trabalho, o CPV-ARI. Outro caso são os agregados miúdos de Tiecher *et al.* (2007), que também evidenciaram potencialidade álcali reativa das areias, neste, o cimento utilizado foi o CP II-Z 32, justificado pelo autor por ser o mais utilizado na região.

Em comparação ao trabalho realizado por Valduga (2002) e Tiecher *et al.* (2007), pode-se definir os agregados miúdos selecionados do Estado do Amapá como estáveis em relação à reação álcali-agregado, uma vez que em nenhum dos casos houve manifestação de tal fenômeno químico.

Como apresentado no item 2.4 deste trabalho, diversos fatores influenciam na reatividade álcali-sílica, por isso se faz necessário análises pontuais nas mais variadas jazidas de agregados miúdos em cada região, pois devem ser consideradas as propriedades e características de cada cimento, agregado, tipo de rocha e demais fatores que o concreto possa estar submetido.

Considerando todos os dados e referências citadas acima, constata-se que os agregados das Jazidas J1 a J8 são inócuos. Logo a decisão de uso dos agregados quanto a reatividade potencial mostra-se favorável, e não se faz necessário a realização de medidas preventivas ou de mitigação da RAS, conforme NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

#### 4.2 REATIVIDADE POTENCIAL – MÉTODO QUÍMICO AUXILIAR

Os métodos mais utilizados na determinação do caráter reativo de agregados fornecem resultados em no mínimo 30 dias, como é o caso do método acelerado em barras de argamassa NBR 15577-4 (ABNT, 2018), e seis meses no ensaio de expansão em prismas de concreto NBR 15577-6 (ABNT, 2018). Há no entanto, um ensaio que tem a vantagem de ser realizado em apenas 3 dias, o método químico NBR 9774 (ABNT, 2008) equivalente a ASTM C289 (2016).

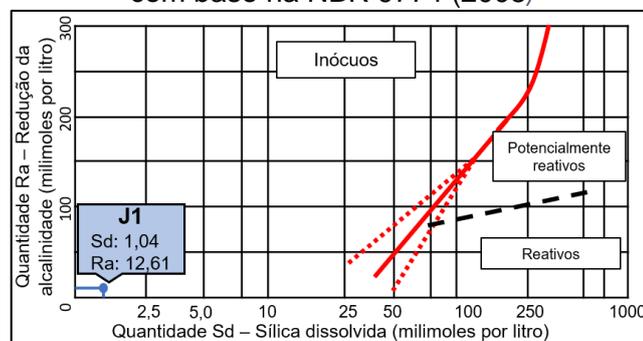
Este método apresenta a vantagem de proporcionar resultados de forma rápida, um aspecto importante na seleção de um ensaio ao se conduzir a análise de agregados para a elaboração de um projeto. O método químico utiliza um gráfico de três partes para identificar os agregados como inócuos, potencialmente prejudiciais ou prejudiciais. Assim, não adota valores específicos para a quantidade de sílica dissolvida e redução da alcalinidade para classificação da reatividade dos agregados.

Para determinar a curva vermelha vista nos gráficos no ensaio, foram considerados os resultados obtidos deste método, correlacionados aos dados da expansão de barras de argamassa contendo cimento com elevador teor de álcalis, análises petrográficas do agregado e do comportamento do agregado no concreto, conforme NBR 9774 (2008).

Ainda segundo a norma, se os resultados da amostra estiverem na região delimitada pela faixa pontilhada em torno da curva, orienta-se que o ensaio seja refeito a partir da amostragem, para confirmação do resultado. Já em relação ao grau de reatividade potencial, este é definido se a marcação da intercessão dos resultados da sílica dissolvida (Sd) e da redução da alcalinidade (Ra) estiverem do lado deletério da curva (lado direito do gráfico). Entretanto, agregados potencialmente deletérios estarão localizados acima da linha tracejada preta, esses podem ser altamente reativos com os álcalis.

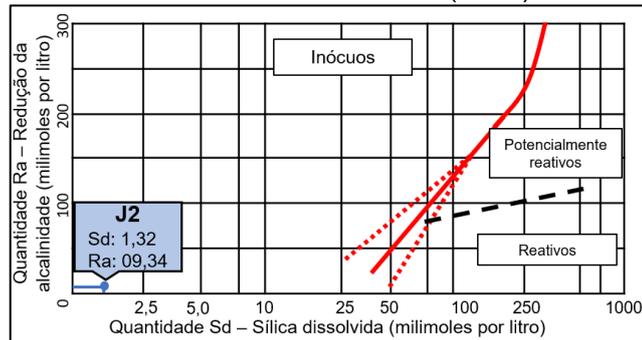
Os resultados dos ensaios foram analisados e representados nos Gráficos 1 a 8, em que estão incluídos os valores de sílica dissolvida e de redução da alcalinidade para cada amostra ensaiada. Esses dois valores correspondem à média de três determinações, já considerando o resultado obtido no ensaio de referência.

Gráfico 1 - Resultados da média dos três valores de Ra e de Sd da J1 no método químico, com base na NBR 9774 (2008)



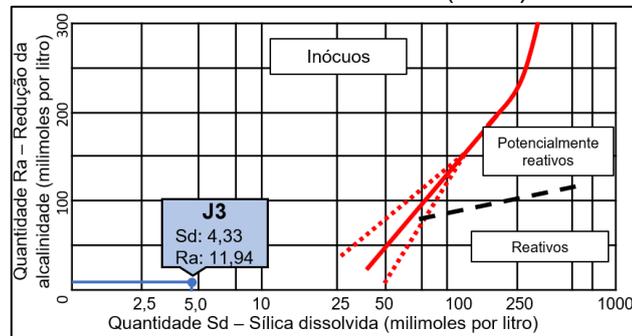
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 2 - Resultados da média dos três valores de Ra e de Sd da J2 no método químico, com base na NBR 9774 (2008)



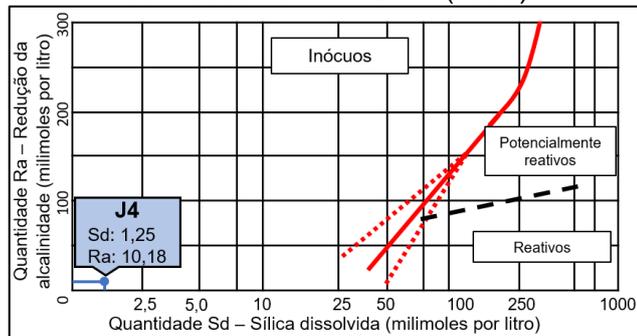
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 3 - Resultados da média dos três valores de Ra e de Sd da J3 no método químico, com base na NBR 9774 (2008)



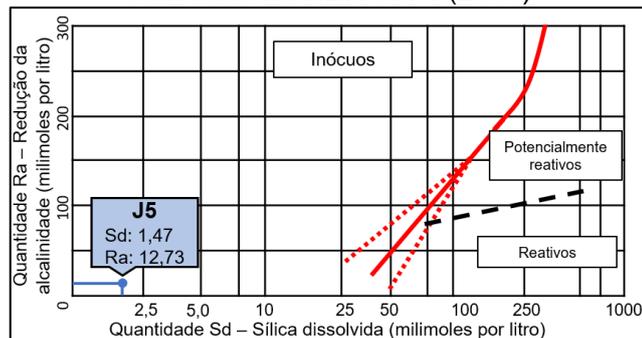
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 4 - Resultados da média dos três valores de Ra e de Sd da J4 no método químico, com base na NBR 9774 (2008)



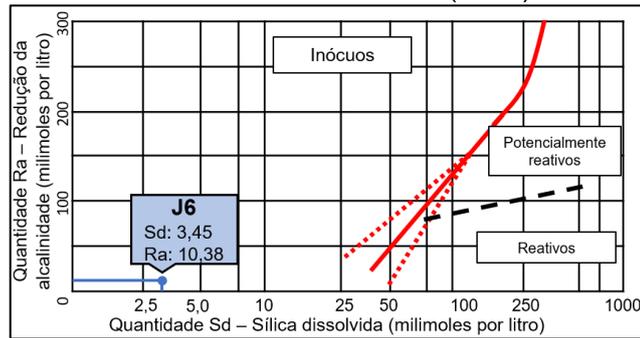
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 5 - Resultados da média dos três valores de Ra e de Sd da J5 no método químico, com base na NBR 9774 (2008)



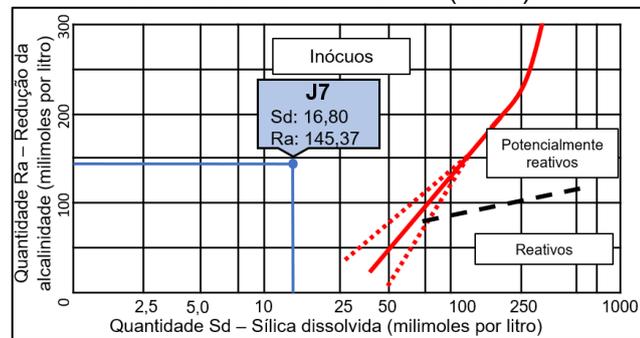
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 6 - Resultados da média dos três valores de Ra e de Sd da J6 no método químico, com base na NBR 9774 (2008)



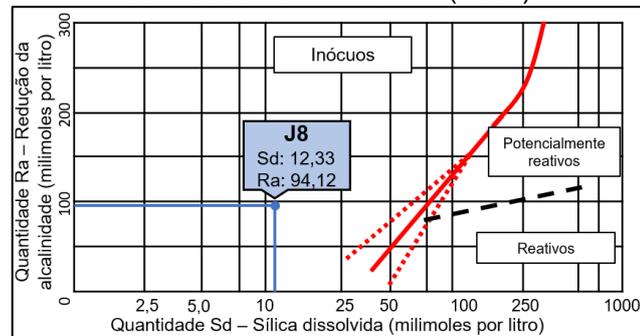
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 7 - Resultados da média dos três valores de Ra e de Sd da J7 no método químico, com base na NBR 9774 (2008)



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 8 - Resultados da média dos três valores de Ra e de Sd da J8 no método químico, com base na NBR 9774 (2008)



Fonte: Autor (2024)

Apesar da certa variabilidade nos resultados obtidos em cada amostra, em todos os casos os pontos de interseção entre a redução da alcalinidade e a sílica dissolvida das amostras estiveram situados em regiões, que se encontravam dentro dos limites especificados nos gráficos indicando que os agregados não possuíam potencial deletério.

Os menores valores foram identificados nas amostras J1 e J2 apresentando, respectivamente, 1,04 mmol/l de sílica dissolvida e 9,34 mmol/l de redução da alcalinidade. Por outro lado, as maiores magnitudes foram observadas na amostra J7,

registrando 16,80 mmol/l de sílica dissolvida e 145,07 mmol/l de redução da alcalinidade, tais valores, estão indicados em seus respectivos gráficos com linhas e círculo azul.

Os resultados deste ensaio confirmaram os dados apresentados no ensaio de potencial reativo pelo método acelerado, em ambos não houveram evidências da reação álcali-agregado. As amostras J7 e J8 mostraram os índices mais próximos de uma possível ocorrência da reação, tanto no ensaio acelerado quanto no químico. No entanto, é evidente que valores encontrados estão distantes dos índices mínimos que apontariam para reatividade do agregado.

No decorrer dos anos surgiram discussões em relação a utilização em torno do uso do método químico, ASTM C 289 (2016), o que levou à sua retirada como técnica padronizada, ainda sim este ensaio continua sendo empregado em pesquisas atuais como indicador rápido da reatividade da RAS (Mo *et al.* 2020).

Rolim (2010) realizou comparações do método químico ASTM C289 (2016), e o método acelerado em barras de argamassa, seguindo a NBR 15577 (ABNT, 2018), selecionando 15 agregados divididos em 5 grupos de litologias diferentes, sendo: cinco granitos, quatro basaltos, três micaxistos, dois quartzitos e um milonito. Conforme autor, apenas no que se refere a avaliação dos quartzitos houve concordância de reatividade em ambos os métodos, em razão dos resultados dos outros materiais não serem condizentes com método acelerado em barras de argamassa.

Nesse sentido, a eficácia do método químico ASTM C289 (2016) na investigação do quartzito também é indicada por Nsiah-Baafi *et al.* (2021). Os autores utilizaram duas areias naturais de rio e realizaram comparações com o ensaio em prisma de concreto, com o método acelerado de barras de argamassa, e a análise petrográfica, seguindo os métodos padronizados equivalentes no Brasil a NBR 15577-6 (ABNT, 2018), NBR 15577-4 (ABNT, 2018) e NBR 7389-1 (ABNT, 2009), respectivamente. Na avaliação destas amostras de origem distintas, todos os ensaios incluindo o método químico, apontaram para algum potencial deletério.

Desta forma, tem-se que o método químico mostra-se eficaz quanto seus resultados de avaliação em areias naturais, uma vez que apontou para o mesmo entendimento dos outros métodos quanto a reatividade potencial. Os autores concluem que o ensaio, embora retirado em 2016, pode fornecer resultados

satisfatórios, no entanto é recomendado seu uso de forma complementar (Nsiah-Baafi *et al.*, 2021).

Com base nas referências citadas acima, e com os resultados deste trabalho, somado a rapidez do ensaio, o método mostra-se como uma alternativa para alcançar resultados em um curto período de tempo. Além do mais, ao analisar os resultados obtidos pelo método químico, pode-se considerar os valores obtidos como confiáveis, uma vez que todos foram condizentes com os apontamentos do método acelerado de barras de argamassa.

Neste presente estudo as análises dos agregados miúdos através deste método foram satisfatórias, provavelmente por se tratar do quartzito, fator este considerável, tendo em vista que ensaios realizados por outros autores com outros agregados o método químico não se mostrou eficaz.

#### 4.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA COM AUXÍLIO DO MEV E COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR SEMIQUANTITATIVA POR MEIO DO EDS

Foram selecionadas as amostras que apresentaram maiores variações de comprimento (expansões) no método acelerado em barras de argamassa, J7 e J8. Estas foram fragmentadas conforme mencionado no item 3.5, e optou-se pelo não polimento das amostras com base nos mesmos critérios de Tiecher (2006), em que discutiu que para se obter uma análise quantitativa precisa através de microanálise por EDS seria mais prudente e confiável a adoção de amostras polidas, toda via, em seu estudo não seguiu o polimento das amostras, pois primou pela análise dos produtos observados em MEV por meio das imagens obtidas topograficamente, ou seja, com a morfologia real dos produtos.

Utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura com EDS, tornou-se viável a investigação da possível presença do gel expansivo, a identificação dos constituintes químicos das barras de argamassa, além de discernir fissuras, poros e as zonas de transição entre os agregados e a pasta, bem como qualquer produto que eventualmente pudesse ter se formado em sua microestrutura.

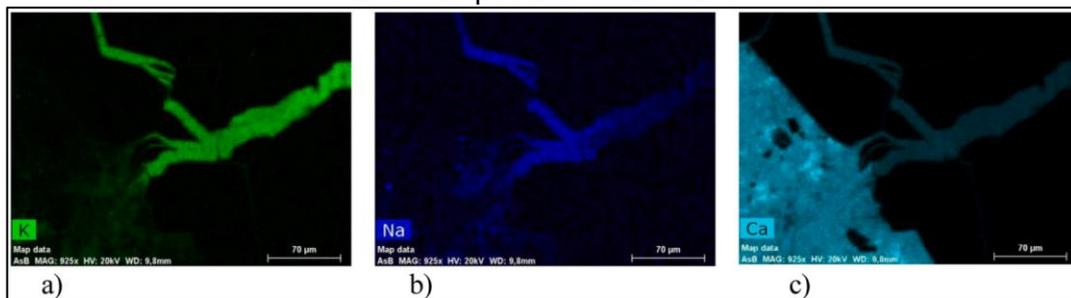
Além disso, apresentam-se as composições químicas elementares dos materiais analisados. A análise por espectrometria de energia dispersiva revelou que todas as amostras exibem composição química ligeiramente distinta, o que já era esperado pois as areias podem apresentar naturalmente uma variedade de minerais e compostos, considerando a origem geográfica das amostras. É importante observar

que se trata de uma análise elementar semiquantitativa, pois o equipamento executa uma varredura superficial, resultando em concentrações que podem variar no interior da amostra. Essa limitação destaca a importância de considerar o contexto mais amplo ao interpretar os resultados obtidos por meio dessa técnica analítica.

Moreira (2021), afirma que durante o desenvolvimento da reação álcali-sílica, esta se desencadeia entre os componentes reativos dos agregados silicosos, que podem ser sílica amorfa, pouco cristalizada ou microcristalina.

Ademais, as análises desenvolvidas por Glinicki *et al.* (2022), através da microanálise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) do produto da reação em microáreas revelou sua natureza como um silicato de potássio-sódio-cálcio, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Produtos semelhantes ao gel da RAS presentes na amostra compostos por silicato de potássio-sódio-cálcio



Fonte: Glinicki *et al.* (2022)

Dahn *et al.* (2016), Gholizadeh-Vayghan e Rajabipour (2017), Boehm-Courjault *et al.* (2020) e Glinicki *et al.* (2022) indicam que a razão de concentrações atômicas mais comuns  $(Na + K)/Si$  nos produtos da RAS oscilam entre 0,2 e 0,35. Este último observou em seus estudos o comportamento do produto da reação em regiões distintas dentro da amostra, e constatou que a concentração atômica média dentro da pasta ficou em 0,28, enquanto nos espaços vazios de ar a média ficou em 0,20. Deste modo, nota-se que os produtos resultantes da reação se mantêm condizentes com os valores habitualmente documentados.

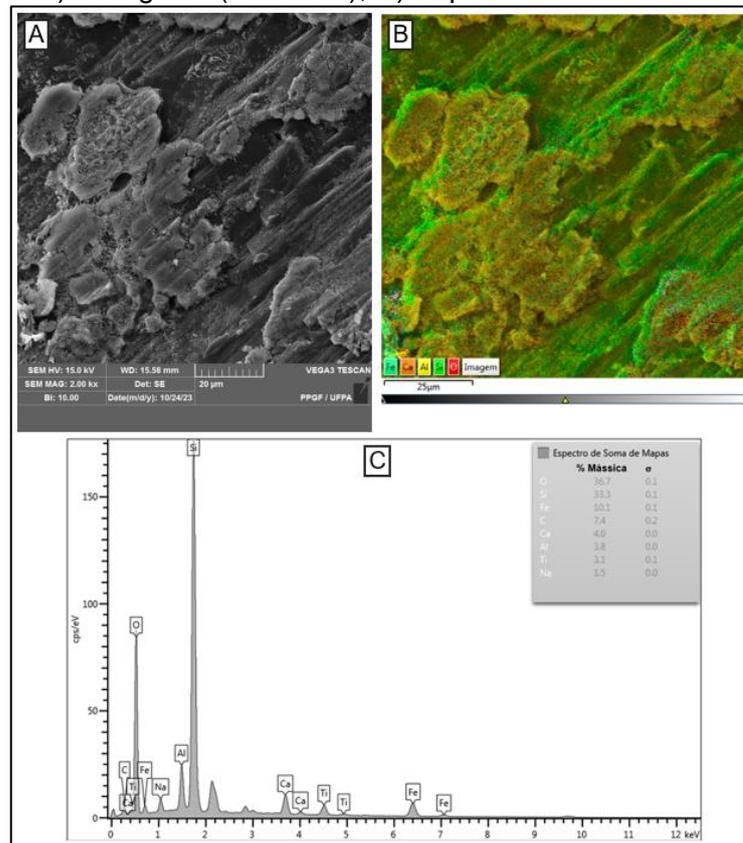
Devido às características topográficas, o aparelho de EDS tende a destacar alguns elementos em detrimento de outros, por essa razão, a análise foi conduzida em várias abordagens para garantir maior precisão dos resultados. As microestruturas das seções das barras submetidas ao ensaio acelerado foram analisadas com o objetivo de verificar a ausência da formação do gel sílico-alcálico característico da reação álcali-sílica, que geralmente se forma na superfície do

concreto, nas zonas de transição e nos poros das argamassas (Furnas, 1997; Godart e Rooij, 2017). Nesse contexto, as Figuras 30 a 34 apresentam imagens, espectros e gráficos das amostras, seguidos de análises correspondentes ao MEV com EDS.

#### 4.3.1 MEV com EDS - Agregado encoberto por frações de pasta cimentícia

O fragmento da barra de argamassa J7-I destacado na Figura 30, demonstrou um comportamento não reativo, confirmado pela ausência do produto expansivo característico da RAS.

Figura 30 - Micrografia da superfície de fratura da barra J7-I. A) ampliação de 2000x; B) mapeamento dos elementos ferro (verde claro), cálcio (laranja), alumínio (amarelo), silício (verde) e oxigênio (vermelho); C) Espectro da soma de mapas



Fonte: Autor (2024)

Na figura 30-C, tem-se a composição química desse fragmento de amostra, que inclui os seguintes elementos: oxigênio (O) com porcentagem mássica de 36,7%, silício (Si) 33,3%, cálcio (Ca) 4,0%, carbono (C) 7,4 %, alumínio (Al) 3,8%, titânio (Ti) 3,1%, ferro (Fe) 10,1% e sódio (Na) 1,5%.

Ao fazer uma comparação entre os resultados, esta análise EDS se mostra complexa. Nota-se na imagem distintas colorações fornecidas pelo aparelho, devido as formações e texturas serem diversas na área tendo em vista que o agregado está

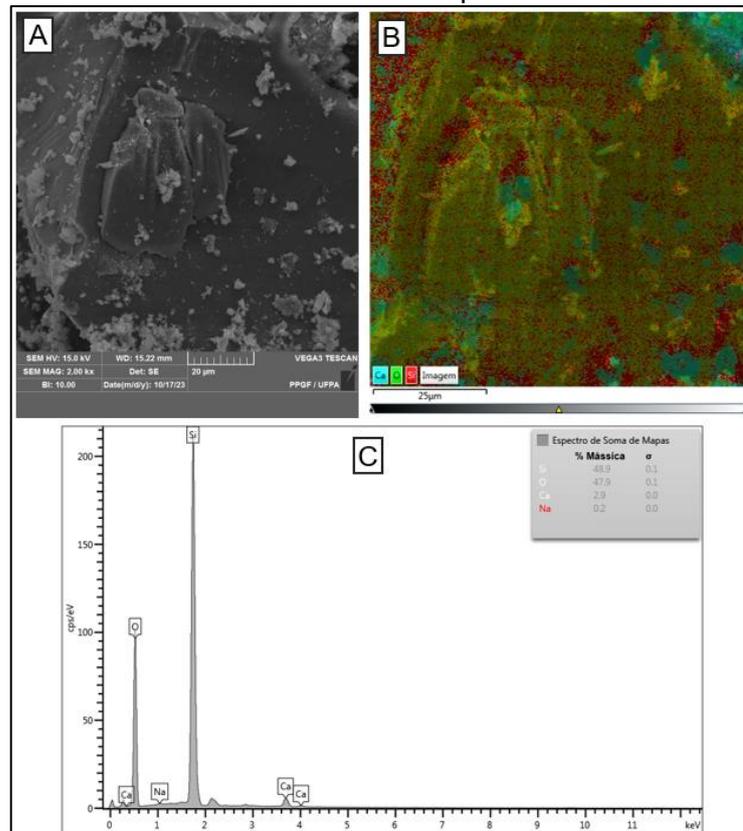
encoberto parcialmente por frações de pasta cimentícia. Posteriormente, com os mesmos níveis de ampliação observa-se na Figura 33-B, que a identificação das fases pasta e agregado mostra-se nítida, possibilitando uma visualização mais clara das colorações dos componentes químicos presentes.

A aplicação do EDS nessa área é justificada devido o gel expansivo estar geralmente localizado nas zonas de transição. Leemann e Sanchez (2023), afirmam que a presença de sílica amorfa aumenta a predisposição à RAS. Corroborando este entendimento os ensaios realizados demonstraram que o produto da reação não foi identificado nesta região, desta forma depreende-se que a sílica predominante seja do tipo cristalina.

#### 4.3.2 MEV com EDS - Composição do agregado miúdo

A fração representada na Figura 31 exibe a micrografia da superfície de fratura da barra J7-II, após submetida ao ensaio acelerado de barras, com destaque a uma partícula de areia, com características de um agregado não reativo, evidenciadas pela ausência da formação do produto da reação. Esta fração apresenta principalmente os elementos químicos oxigênio, silício e cálcio, conforme Figura 31-B. Torna-se claro que ao aplicar a técnica EDS no agregado, a concentração de silício é significativamente superior aos demais elementos, considerando que na composição química da areia ele está altamente concentrado.

Figura 31 – Micrografia da superfície de fratura da barra J7-II. A) ampliação de 2000x; B) mapeamento dos elementos cálcio (azul), oxigênio (verde) e silício (vermelho); C) Espectro da soma de mapas



Fonte: Autor (2024)

Para a Figura 31-A, o ponto focal durante a aplicação do EDS foi o aspecto visual da superfície do agregado miúdo, caracterizada por sua integridade, solidez, lisura e tonalidade mais escura. Para a Figura 31-B com análise química elementar semiquantitativa, as distorções na coloração representadas na imagem indicam as áreas de maior concentração de cada elemento, o tom alaranjado atribuído ao elemento sódio se destaca sobre os demais, mas essa coloração é apenas devido à sobreposição das cores dos diferentes elementos, tendo em vista que a porcentagem mássica do sódio foi de apenas 0,2%, e neste fragmento foi constatado a predominância do elemento silício com 48,9%, os elementos oxigênio e cálcio apresentaram porcentagem mássica de 47,9% e 2,9%, respectivamente, conforme evidenciado na Figura 31-C.

A partir dos dados, a possibilidade do agregado analisado ser do tipo cristalino é considerável, devido há não constatação da ocorrência da RAS nos métodos anteriores, assim como nesta técnica analítica. O gráfico revela uma significativa concentração de silício, ficando evidente que se trata principalmente da areia empregada na argamassa. Além disso, ao examinar as imagens ao redor do

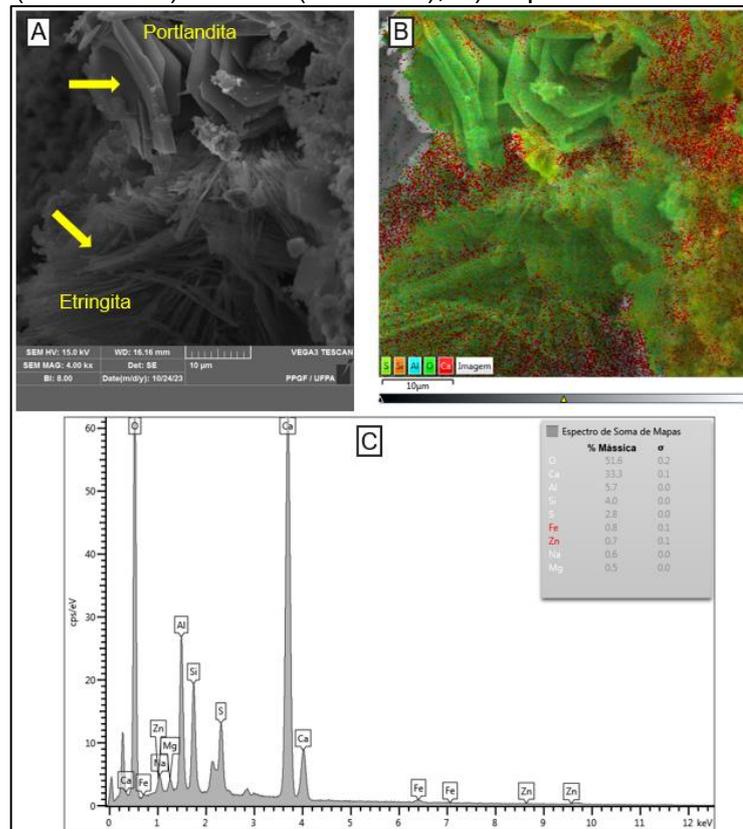
agregado, não foi possível identificar a presença de produtos relacionados à reação álcali-sílica.

#### 4.3.3 MEV com EDS - Formação dos produtos portlandita e etringita resultantes da hidratação do cimento

A Figura 32-A apresenta a superfície de fratura da amostra J8-II com ampliação de 4000x, onde é possível observar o que se assemelha com a Portlandita. Para Mehta e Monteiro (2014), os cristais de hidróxido de cálcio (portlandita) constituem 20 a 25 por cento do volume de sólidos na pasta hidratada, tendo fórmula molecular  $\text{Ca(OH)}_2$ . Segundo os autores o produto tende a formar grandes cristais com uma morfologia característica de prisma hexagonal. A morfologia pode ser alterada pelo espaço disponível, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema.

Ainda na Figura 32-A na parte inferior, considerando os aspectos morfológicos, tem-se o que parece ser a formação de etringita sobre a pasta penetrando nas bordas dos poros e resultando em pressão interna gerada pelo desenvolvimento desse produto. Mehta e Monteiro (2014) discutem que o resultado da interação entre íons de cálcio, sulfato, aluminato e hidroxila durante a hidratação do cimento, criam os cristais com forma de agulha de hidrato de trissulfato de alumínio de cálcio, conhecidos como etringita. Para Diamond (1986), a morfologia da etringita pode variar, podendo ser oca ou parcialmente oca, com elevada variação relação comprimento/espessura, apresentando-se regularmente curta e em formato de haste pontiaguda.

Figura 32 - Micrografia da superfície de fratura da barra J8-II. A) ampliação de 4000x; B) mapeamento dos elementos enxofre (verde escuro), silício (laranja), alumínio (azul), oxigênio (verde claro) e cálcio (vermelho); C) Espectro da soma de mapas



Fonte: Autor (2024)

Conforme evidenciado na Figura 32-A, neste fragmento da amostra J8-II não foi possível encontrar produtos da RAS, toda via nota-se que há produtos gerados no sistema de cimento Portland hidratado como a etringita e portlandita. A Figura 32-B ilustra os principais elementos identificados pela análise por EDS, a Figura 32-C apresenta todos os elementos químicos presentes: oxigênio com porcentagem mássica de 51,6%, cálcio com 33,3%, alumínio com 5,7 %, silício 4,0%, ferro 0,8%, zinco (Zn) 0,7%, sódio com 0,6% e magnésio com 0,5%.

Conforme evidenciado nos resultados do ensaio de expansão acelerada, algumas barras de argamassa apresentaram variação na expansão, porém permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela norma. Neste momento cabe destacar que a amostra J8-II apresentou uma discreta expansão, o que sugere a influência da presença da etringita.

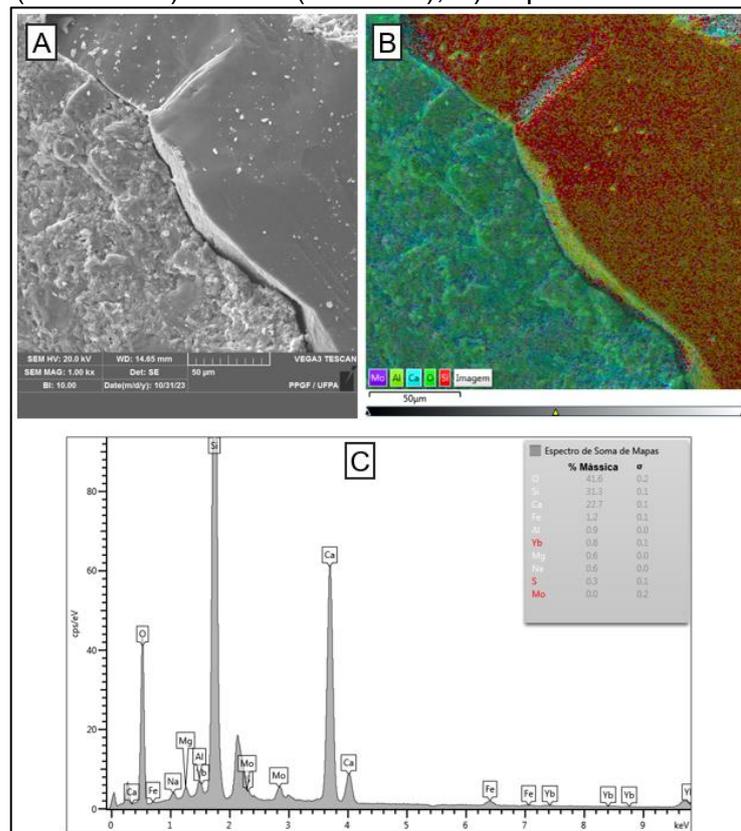
Desta forma, por meio da microscopia eletrônica de varredura foi observado produtos resultantes da hidratação do cimento Portland, que nesse estudo são o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandita) e  $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$  (etringita), Além destes, Mehta e Monteiro (2014)

citam o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e os grãos de clínquer não hidratados como sendo os principais elementos sólidos na pasta de cimento hidratada. Corroborando com esta afirmação tem-se que os produtos encontrados estão de acordo com o alto teor de Ca (33,3%), conforme Figura 32-C, identificado na análise química elementar semiquantitativa, a partir do mapeamento químico.

#### 4.3.4 MEV com EDS - Zona de transição entre pasta e agregado

Na superfície de fratura da amostra J8-III, demonstrou resistência às condições extremas do método acelerado. Nota-se a presença de perfis distintos: o primeiro com elevada concentração de silício, representa a areia, o segundo com uma concentração predominante de cálcio, representa a pasta cimentícia. Toda via, na zona de transição entre a pasta e agregado, conforme Figura 33-A, não foram identificados sinais da formação do gel da RAS.

Figura 33 - Micrografia da superfície de fratura da barra J8-III. A) ampliação de 1000x; B) mapeamento dos elementos magnésio (roxo), alumínio (verde escuro), cálcio (azul), oxigênio (verde claro) e silício (vermelho); C) Espectro da soma de mapas



Fonte: Autor (2024)

No agregado, há uma predominância de silício, enquanto na pasta cimentícia, há uma dominância de cálcio, o que é esperado devido às propriedades químicas do

cimento e da areia, tais elementos são identificados na Figura 33-B. Essa amostra específica compreende os seguintes elementos químicos em sua composição: oxigênio, carbono, alumínio, silício, cálcio, ferro, sódio e magnésio. Contudo, conforme Figura 33-C, apenas oxigênio 41,6%, silício 31,3% e cálcio 22,7% são encontrados em quantidades expressivas de porcentagem mássica.

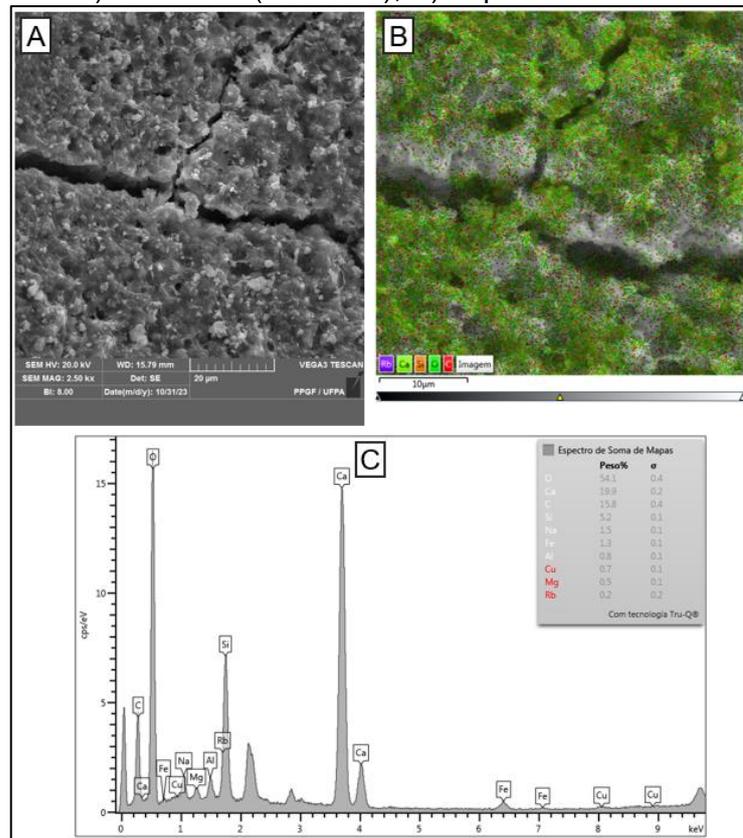
Complementando os dados mencionados anteriormente, deve-se levar em consideração também à natureza dos agregados. Hasparyk (2005) e Fanijo, Kolawole, Almakrab (2021) compartilham a mesma ideia ao afirmar que a presença de sílica amorfa é um forte indicador de reatividade agregada. Além disso, Qiu *et al.* (2022) enfatizam que a sílica amorfa exibe suscetibilidade a ataques de agentes externos superior à cristalina.

Jin, Ghazizadeh, Provis (2023), em seus estudos apontam que a sílica amorfa reage com  $\text{Na}^+$  e  $\text{CaO}$  para formar produtos da RAS. Ambos elementos estavam presentes nesta amostra, de todo modo não houve a constatação do gel proveniente da reação álcali-sílica, provavelmente devido a sílica não ser de natureza amorfa.

#### 4.3.5 MEV com EDS - Microfissuras na argamassa

Na micrografia da superfície de fratura da barra J8-III representada na Figura 34-A, houve o aparecimento de fissuras isoladas, com diversas larguras, contudo estas fissuras não seguem o padrão do tipo mapa, demonstrando que não é uma manifestação típica da RAS. A visualização de microfissuras foi realizada por meio de micrografias com uma ampliação de 2500 vezes, as quais indicaram a ausência da formação do gel nos poros e fissuras observadas, corroborando os resultados obtidos nos ensaios de barra de argamassa acelerado e ensaio químico.

Figura 34 - Micrografia da superfície de fratura da barra J8-III. A) ampliação de 2500x; B) mapeamento dos elementos rubídio (roxo), cálcio (verde escuro), silício (laranja), oxigênio (verde claro) e carbono (vermelho); C) Espectro da soma de mapas



Fonte: Autor (2024)

Figueira *et al.* (2019), Sun *et al.* (2021) e Glinicki *et al.* (2022), discutem que os elementos químicos típicos envolvidos na reação álcali-silica são de cálcio, potássio e sódio. Dentre estes mencionados pelos autores, no fragmento de barra J8-III foi constatado a porcentagem mássica de sódio de 1,5% e de cálcio de 19,9 %, conforme Figura 34-C.

Poole (2002), determina que a capacidade de reação dos agregados silicosos é influenciada pelos tipos de agregados, considerando a presença de diversas desordens microestruturais nos elementos reativos, com destaque para a sílica amorfa. Logo, o fato das amostras não apresentarem nenhuma das evidências como fissuração em forma de mapa e exsudação do gel da RAS, denota-se que o agregado seja estruturado predominantemente por sílica cristalina.

Ao realizar a condução sistemática dos ensaios de barras de argamassa, do método químico e do MEV com EDS, torna-se viável encerrar de maneira conclusiva a análise das amostras coletadas. A avaliação conjunta desses resultados

proporcionou uma compreensão abrangente e aprofundada das propriedades e comportamentos das amostras em estudo.

#### 4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS E MAPEAMENTO DOS AGREGADOS REATIVOS

Após a conclusão dos ensaios propostos neste estudo, foi possível consolidar os resultados no Quadro 3, que oferece uma síntese de todos os ensaios empregados para a identificação da potencialidade reativa das amostras. Essa apresentação possibilita uma classificação nítida e assertiva dos agregados.

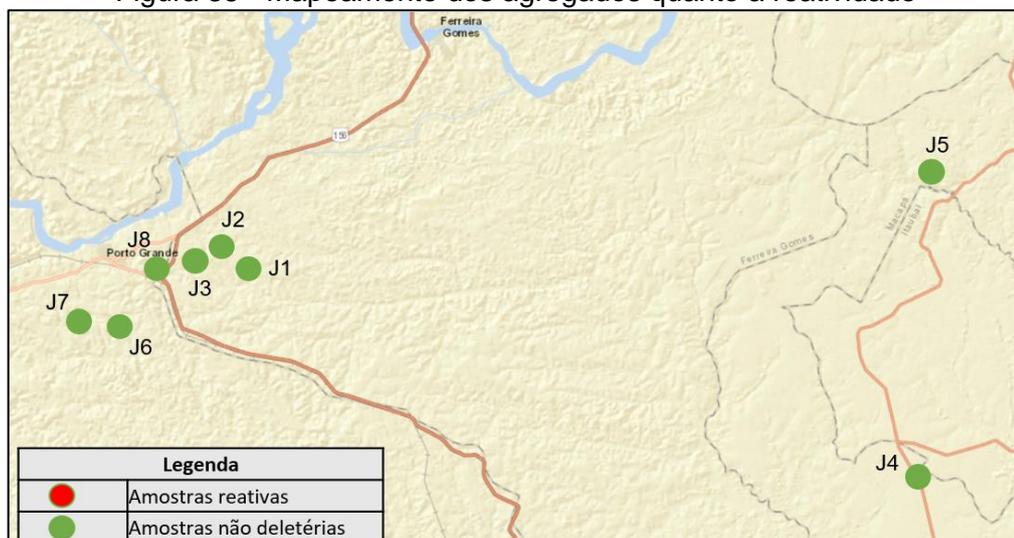
Quadro 3 - Resultados dos ensaios de determinação da potencialidade reativa

Amostras	Método acelerado		Reatividade	Método químico Reatividade	MEV
	16° dia	30° dia			
J1	0,00	0,00	Inócuo	Inócuo	Não constatação do gel
J2	0,00	0,00	Inócuo	Inócuo	Não constatação do gel
J3	0,04	0,04	Inócuo	Inócuo	Não constatação do gel
J4	0,01	0,04	Inócuo	Inócuo	Não constatação do gel
J5	0,01	0,01	Inócuo	Inócuo	Não constatação do gel
J6	0,00	0,00	Inócuo	Inócuo	Não constatação do gel
J7	0,12	0,12	Inócuo	Inócuo	Não constatação do gel
J8	0,10	0,11	Inócuo	Inócuo	Não constatação do gel

Fonte: Autor (2024)

Com base nos dados, tornou-se viável realizar o mapeamento dos agregados, categorizando-os com base em sua potencialidade reativa. Ao observar a legenda da Figura 35, constata-se que os ensaios realizados nos agregados miúdos extraídos diretamente das jazidas não evidenciaram efeito deletério.

Figura 35 - Mapeamento dos agregados quanto a reatividade



Fonte: Autor (2024)

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho analisou a possibilidade da reação álcali-agregado nos agregados miúdos, considerando sua relevância para os setores socioeconômico, acadêmico e da construção civil do Estado. Dentro desse contexto, tem-se que o trabalho atingiu o objetivo principal, visto que avaliou o potencial reativo das amostras de agregados miúdos provindos das principais jazidas dos municípios de Ferreira Gomes/AP, Macapá/AP e Porto Grande/AP, por meio do método acelerado de barras de argamassa seguindo a NBR 15577 - 4 (ABNT, 2018).

Desta forma, constatou-se que o método acelerado de barras de argamassa foi considerado satisfatório para analisar as amostras dos agregados miúdos selecionados, no qual todas amostras coletadas das jazidas deste trabalho demonstraram expansões inferiores a 0,19% aos 30 dias de idade, evidenciando um comportamento inócuo, sendo que os agregados oriundos das jazidas J7 e J8 foram aqueles que apresentaram maior potencial reativo nos ensaios com 0,12% e 0,11% de expansão, respectivamente.

Com relação aos objetivos específicos delineados, tem-se que todos foram alcançados, visto que:

- Conseguiu-se classificar os agregados miúdos conforme a potencialidade reativa frente aos álcalis do cimento, e todas as abordagens realizadas nesta pesquisa classificaram tais agregados como inócuos.
- O método químico avaliado como um procedimento complementar para a verificação da reatividade dos agregados, revelou-se satisfatório ao revelar que os cruzamentos dos dados de sílica dissolvida e redução de alcalinidade marcados nos Gráficos 1 a 8 apontaram para comportamento inócuo dos agregados miúdos, indicando o não potencial de surgimento da reação álcali-sílica, corroborando com os resultados de expansão obtidos no item 4.1, ou seja, apresentou-se aplicável. Neste contexto, tem-se, que o cancelamento da NBR 9774 (ABNT, 2018) mostra-se inadequado, pois este ensaio pode servir como balizador, e permitindo informações preliminares, de forma rápida.
- Conseguiu-se empregar o MEV-EDS para analisar a morfologia e composição química elementar semiquantitativa. Desta forma, a microscopia eletrônica de varredura destacou-se como uma ferramenta

essencial, as imagens fornecidas por essa técnica analítica permitiram a identificação visual da não formação de gel expansivo nos fragmentos das barras, além disso, permitiu identificar produtos resultantes da hidratação do cimento Portland, sendo estes a portlandita e a etringita, assim como discernir fissuras, poros e as zonas de transição entre os agregados e a pasta cimentícia. O EDS por sua vez, desempenhou um papel relevante ao fornecer informações sobre a composição química elementar semiquantitativa dos elementos presentes nos fragmentos das barras que foram anteriormente submetidas ao método acelerado, a espectrometria por energia dispersa apontou frequentemente para a predominância dos elementos químicos cálcio, silício e oxigênio, o primeiro devido as propriedades da pasta cimentícia, e o segundo pela natureza dos agregados.

- Conseguiu-se realizar o mapeamento dos agregados, onde constatou-se que os resultados obtidos pelos ensaios evidenciam que as areias não são deletérias quanto a RAS. Este estudo foi enriquecido com informações provenientes de diversos setores ligados à atividade mineral, e o mapeamento surge como método eficaz de localizar e identificar jazidas de areia isentas de potencial deletério devido a reação álcali-sílica, proporcionando dados que se tornarão referências para os profissionais da região no que diz respeito à utilização desses materiais na produção de concreto.

Através dos procedimentos metodológicos implementados neste estudo, foi viável realizar uma avaliação conclusiva acerca do potencial reativo de cada amostra. Os agregados miúdos analisados demonstraram ser inócuos, ou seja, não apresentaram efeitos deletérios.

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A fim de auxiliar no avanço do conhecimento sobre o tema, sugere-se realizar avaliação quanto à reatividade potencial pelo método acelerado de barras de argamassa dos agregados graúdos utilizados no Estado.

Em futuras pesquisas ligadas a reatividade, utilizar o ensaio dos prismas de concreto e difração de raio X para avaliar a correlação entre os resultados destes ensaios com os métodos adotados nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, S.; KAZMI, S. M. S.; MUNIR, M. 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, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.126>. Acesso em: 15 Jan 2024.
- ABDALLAH, S; FAN, M. Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. **International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)**, vol. 2, p. 11–17, 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/263652300\\_Characteristics\\_of\\_concrete\\_with\\_waste\\_glass\\_as\\_fine\\_aggregate\\_replacement](https://www.researchgate.net/publication/263652300_Characteristics_of_concrete_with_waste_glass_as_fine_aggregate_replacement). Acesso em: 21 ago. 2023.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15577-1**: Agregados: Reatividade álcali-agregado: Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15577-2**: Agregados: Reatividade álcali-agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15577-3**: Agregados: Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15577-4**: Agregados: Reatividade álcali-agregado: Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16915**: Agregados: Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16972**: Agregados: Determinação da massa unitária e índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 17054**: Agregados — Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland — Determinação da resistência a compressão de corpos de provas. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7218**: Agregados: Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 9774: 2008**. Agregado - Verificação da reatividade potencial pelo método químico - Método de ensaio (cancelada sem substituição). Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 9774**: Agregado: Verificação da reatividade potencial pelo método químico: Método de ensaio. Cancelada em: 2008. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

AKHAVAN, A. C. **The Quartz Page**. 13 Mar. 2022. 5 ilustrações. Disponível em: [http://www.quartzpage.de/gen\\_mod.html](http://www.quartzpage.de/gen_mod.html). Acesso em: 25 nov. 2023.

ALBERTINI, P.G.O. **Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas para controle da Reação Álcali-Agregado**. 2014. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/111147/000797239.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 fev. 2023;

ALMEIDA, S.L.M; LUZ, A.B.L. **Normas Técnicas e Caracterização Tecnológica dos Agregados**. Em: ALMEIDA, S.L.M; LUZ, A.B.L, eds. **Manual de Agregados para construção civil**. 2a ed. Rio de Janeiro: CETEM, pp. 83-99. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/943/11/Manual%20de%20Agregados%20para%20Constru%C3%A7%C3%A3o%20Civil.pdf>. Acesso em: 25 de mar 2024.

ANM. Agência Nacional de Mineração. **Plataforma SIGMINE**. Brasília, DF: ANM, 2023. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908> Acesso em: 04 jan. 2023.

ARRAIS, M.S.M.C. **Reação Álcali-silicato: Avaliação do Comportamento de Agregados Graúdos da Região Metropolitana do Recife Frente a Diferentes**

**Tipos de Cimento.** 2011. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/4909/1/arquivo2634\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/4909/1/arquivo2634_1.pdf). Acesso em: 11 fev. 2023.

ASTM C-1260, 2021. **Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).** ASTM International, West Conshohocken, 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/c1260-21.html>. Acesso em: 22 ago. 2023.

ASTM C-289, 2007. **Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)** (Withdrawn 2016). ASTM International, West Conshohocken, 2007. Disponível em: <https://www.astm.org/standards/c289>. Acesso em: 22 ago. 2023.

BALACHANDRAN, C. *et al.* Alkali -silica reaction and its dynamic relationship with cement pore solution in highly reactive systems. **Construction and Building Materials**, vol. 362, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129702>>. Acesso em: 22 set. 2023.

BÉRUBÉ, M; FOURNIER, B. Canadian experience with testing for alkali-aggregate reactivity in concrete. **Cement and Concrete Composites**, vol. 15, p. 27-47, 1993.

BICZOK, I. **Corrosion y proteccion del hormigon.** Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972. p.275-280. Trad. De Emilio J. d'Ocon Asensi.

BOEHM-COURJAULT, E. *et al.* Microstructure, crystallinity and composition of alkali-silica reaction products in concrete determined by transmission electron microscopy. **Cement and Concrete Research**, vol. 130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105988>. Acesso em: 29 mar. 2023.

CALLISTER W. D; RETHWISCH D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. LTC - 9. ed. Rio de Janeiro: 2016.

CARMAN, P. C. Constitution of colloidal silica. **Transactions, Faraday Society**, v. 36, p 964-973. 1940.

CHATTERJI, S; JENSEN, A.D. A simple chemical method for the detection of alkali-silica reactivity of aggregates. **Cement and Concrete Research**, vol. 18, ed. 04, p. 654-656, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90058-0). Acesso em 22 set. 2023.

COSTA, H.N. **Caracterização de areias de britagem de pedreiras da região metropolitana de Fortaleza e avaliação da sua aplicação no concreto.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/15541>. Acesso: 20 Fev, 2024.

COSTA, L., TIECHER, F. **Avaliação da reatividade álcali agregado de rochas vulcânicas do Rio Grande do Sul.** In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 17., 2018, Foz do Iguaçu. Anais. Porto Alegre: ANTAC, 2018.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas.** 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3166>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

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. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781782422884.3.397>. Acesso em: 10 mar. 2023.

DAHAN, R. *et al.* Application of micro X-ray diffraction to investigate the reaction products formed by the alkali-silica reaction in concrete structures, **Cement and Concrete Research**, vol. 79, p. 49-56, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.07.012>. Acesso em: 04 jul. 2023.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Comitê Alemão para Concreto Armado). **DAFSTB ALKALI-RICHTLINIE: 2013-10**: “Vorbeugende maßnahmen gegen schädigende alkalireaktion im beton, Alkali-Richtlinie” (Medidas preventivas contra reações alcalinas prejudiciais em concreto, diretriz alcalina), Beuth, Berlin, 2013. Disponível em: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/dafstb-alkali-richtlinie/216669787>. Acesso em: 22 set. 2023.

DIAMOND, S. A Review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms: reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 06, ed. 04, p. 549-560, 1976. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90083-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90083-1). Acesso em: 29 mar. 2023.

DIAMOND, S. Alkali-aggregate reaction. **Portland Cement Association**, 1995.

DIAMOND, S. Special issue on scanning electron microscopy of cements and concretes. **Cement and Concrete Composites**, vol. 26, ed. 08, p. 971-918. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.027>. Acesso em 29 mar. 2023.

DIAMOND, S. **The microstructures of cement paste in concrete**. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., Rio de Janeiro, 1986. Anais. v. 1, p. 122 - 147.

DYER, T. **A durabilidade do concreto**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2015.

ESFAHANI, M; ADINEH, R. Alkali-silica reaction (ASR) in concrete (the effect of test type, cement type and admixtures of silica fume and superplasticizer). **Amirkabir**, vol. 15, p. 110-119, 2004. Disponível em: <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=5072> Acesso em: 8 abr. 2023.

FALCÃO BAUER. (2018). **Análise petrográfica - potencialidade reativa de agregados: relatório de ensaio n° SOULS-006202/18**.

FANIJO, E.B; KOLAWOLE, J.T; ALMAKRAB, A; Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 15, e00563, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00563>. Acesso em: 06 nov. 2023.

FANIJO, E; BABAFEMI, A.J; AROWOJOLU, O; Performance of laterized concrete made with palm kernel shell as replacement for coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, vol. 250, 118829, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118829>. Acesso em: 05 nov. 2023.

FENG, X. *et al.* Studies on lithium salts to mitigate ASR – induced expansion in new concrete: a critical review. **Cement and Concrete Research**, v. 35, ed. 09, p. 1789-

1796, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.013>. Acesso em: 02 set. 2023.

FIGUEIRA, R.B. *et al.* Alkali-silica reaction in concrete: mechanisms, mitigation and test methods. **Construction and Building Materials**, vol. 222, p. 903–931, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.230>. Acesso em 02 fev. 2023.

FIGUEIRÔA, J. P; ANDRADE, T. **O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto. A descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de ponte e edifícios na Região Metropolitana do Recife.** Editora Universitária UFPE. 2007. 228p.

FOURNIER, B. *et al.* Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials (SCMs) to control alkali-silica reaction (ASR) in Concrete. **Proceedings of the Twelfth International Conference Alkali-Aggregate Reaction. Concrete**, vol. 01, p. 528-537, 2016. Disponível em: <<https://icaarconcrete.org/wp-content/uploads/2020/11/15ICAAR-FournierB-2.pdf>>. Acesso em: 22 ago.2023.

FOURNIER, B; BÉRUBÉ, M. A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, p. 167-191, 2000. DOI: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/I99-072>. Acesso em: 03 abr. 2023.

FRAGA, Y. S. B.; RÊGO, J. H. S.; CAPUZZO, V. M. S.; ANDRADE, D. S. Efeito da ultrassonicação da sílica ativa e da nanossílica coloidal em pastas de cimento. **Revista Matéria**, v. 25, n.4, p. 1-16, 2020.

FRASCA, M.H.B.O; PARAGUASSU, A.B. Caracterização de agregados e de materiais rochosos para construção. In: OLIVEIRA, A.M.S; MONTICELI, J.J. **Geologia de engenharia e ambiental**. São Paulo, 2017, p. 110-126.

FURNAS. Equipe de Laboratório de Concreto. **Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades**. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade. PINI, 1997.

GHOLIZADEH-VAYGHAN, A; RAJABIPOUR, F. The influence of alkali–silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapour. **Cement and Concrete Research**, vol. 94, p. 49-58, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.006>. Acesso em: 20 ago. 2023.

Giannini, E. R; Snyder, A. E; Drimalas T. Diagnosis and prognosis of ASR in an airfield pavement. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, série III, p. 35-44 n.º 15. ISSN 2183-8488, 2021.

GILLOTT, J.E; WANG, H. Improved control of alkali-silica reaction by combined use of admixtures. **Cement and Concrete Research**, vol. 23, ed. 04, p.973-980, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90051-A](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90051-A). Acesso em: 03 abr. 2023.

GLINICKI A.M. *et al.* Diagnosis of ASR damage in highway pavement after 15 years of service in wet-freeze climate region. **Case Studies in Construction Materials**, vol 17, e01226, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01226>. Acesso em: 10 abr 2024.

GLINICKI, M. A. *et al.* Diagnosis of ASR damage in highway pavement after 15 years of service in wet-freeze climate region. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 17, e01226, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01226>. Acesso em: 22 ago. 2023.

GODART B; WOOD J. Interaction of DEF and AAR, a review. **Revista portuguesa de engenharia de estruturas**, série III, número 15, 2021. Disponível em: [http://rpee.Inec.pt/Ficheiros/rpee\\_serielll\\_n15/rpee\\_slll\\_n15.pdf](http://rpee.Inec.pt/Ficheiros/rpee_serielll_n15/rpee_slll_n15.pdf). Acesso em: 29 out. 2023.

GODART, B; ROOIJ, M. R. Diagnosis, Appraisal, Repair and Management. In Ian Sims & A. Poole (Eds.), **Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review**. London, UK: CRC Press, Taylor and Francis, p. 1-768, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/320999820\\_Diagnosis\\_Appraisal\\_Repair\\_and\\_Management\\_Chapter\\_5\\_In\\_Alkali-Aggregate\\_Reaction\\_in\\_Concrete\\_-\\_A\\_World\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/320999820_Diagnosis_Appraisal_Repair_and_Management_Chapter_5_In_Alkali-Aggregate_Reaction_in_Concrete_-_A_World_Review). Acesso em: 04 ago. 2023.

GRATTAN-BELLOW, P.E. A critical review of accelerated ASR tests. **10<sup>a</sup> ICARR - International Conference on Alkali-Aggregate Reaction**, p.27-39. Melbourne, 1996. Disponível em: <https://icaarconcrete.org/wp-content/uploads/2021/10/10ICAAR-GrattanBellewPE-1.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2023.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/6350>. Acesso em 02 jun. 2023.

HASPARYK, N.P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. cap. 27. p. 933-1001. São Paulo: IBRACON, 2011.

HELENE, P; CARVALHO, M; PACHECO, J. Engineering field tests for alkali-aggregate reaction. **Structural Concrete**, vol. 18, ed. 2, p. 349–355, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201600090>. Acesso em 14 dez. 2022.

HOBBS, D.W. **Alkali Silica reaction in concrete**. Londres: Ed. Thomas Telford, 1988.

JIN H; GHAZIZADEH S; PROVIS J.L. Assessment of the thermodynamics of Na,K-shlykovite as potential alkali-silica reaction products in the (Na,K)<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system. **Cement and Concrete Research**, vol 172, p. 107253, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107253>. Acesso em: 14 dez 2023.

JONGPRATEEP, O. *et al.* Effects of glass and limestone aggregates and aluminium on porosity, expansion, and strength of mortar bars. **Materials Today: Proceedings**, vol. 05, ed. 03, p. 9306-9311, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.104>. Acesso em: 04 abr. 2023.

JUNIOR, I. F. **Rejeitos de quartzitos do Sul de Minas Gerais: Estudo da fração fina para a produção de concretos de pós reativos e diagnóstico da reação álcali-agregado**. 2022. 218 p. Tese (Doutorado em ciências) apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.18.2022.tde-15022023-145023>. Acesso em: 05 mar. 2023.

JUNIOR, O.M.S. *et al.* **Atlas Geográfico Escolar do Estado do Amapá**. Macapá: GERCO/IEPA, UNIFAP, 2022. Disponível em: <https://www2.unifap.br/editora/files/2022/04/atlas-geografico-escolar-do-estado-do-amapa.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2023.

KANJEE, J.P; BALLIM, Y; OTIENO, M. A visual condition assessment of a reinforced concrete railway bridge subject to alkali silica reaction (ASR) deterioration in Johannesburg. **MRS Advances**, vol. 08, p. 570–576, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1557/s43580-023-00548-8>. Acesso em: 02 set. 2023.

KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1, 1986, São Paulo. Anais. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986 p. 127-138.

KOLAWOLE, J.T. *et al.* Performance of concrete containing Nigerian electric arc furnace steel slag aggregate towards sustainable production. **Sustainable Materials and Technologies**, vol. 25, e00174, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00174>. Acesso em: 06 nov. 2023.

KOLAWOLE, J.T; COMBRINCK, R; BOSHOFF, W.P. Rheo-viscoelastic behaviour of fresh cement-based materials: cement paste, mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 248, 118667, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118667>. Acesso em: 05 nov. 2023.

KRISTUFEK, L. *et al.* Preliminary evaluation of Pier cap from an ASR affected bridge in Central Canada. **MATEC Web of Conferences**, vol. 364, p. 01-08, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236403005>. Acesso em: 21 mai. 2023.

KURTIS, K.E.; MONTEIRO, P.J.M. Chemical additives to control expansion of alkali-silica reaction gel: proposed mechanisms of control. **Journal of Materials Science**, vol. 38, p. 2027-2036, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1023549824201>. Acesso em: 03 ago. 2023.

LACASSE, C; LABOSSIERE, P; NEALE, K.W. On fiber-reinforced polymer rehabilitation of alkali-aggregate reaction-damaged beams. **ACI Structural Journal**, vol. 100, ed.01, p. 66- 74, 2003. DOI: 10.14359/12440. Disponível em: <http://www.concrete.org/PUBS/JOURNALS/SJHOME.ASP>. Acesso em: 02 jun. 2023.

LANGARO, E.A. *et al.* Rice husk ash as supplementary cementing material to inhibit the alkali-silica reaction in mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000400004>. Acesso em: 08 abr. 2023.

LEEMANN, A. Raman microscopy of alkali-silica reaction (ASR) products formed in concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 102, p. 41-47, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.014>. Acesso em: 02 jun. 2023.

LEEMANN, A; MUNCH, B. The addition of caesium to concrete with alkali-silica reaction: Implications on product identification and recognition of the reaction sequence. **Cement and Concrete Research**, vol. 120, p. 27-35, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.016>. Acesso em: 02 jun. 2023.

LEEMANN, A; SANCHEZ, L. Internal alkali transport in recycling concrete and its impact on alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, vol. 174, p. 107334,

2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107334>. Acesso em: 12 dez. 2023

LEEMANN, A; SHI, Z; LINDGÅRD, J. Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, vol. 137, ed. 04, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106190>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LIMA, T.O.C; OLIVEIRA, R.M.P.B. Reações Expansivas em Concretos com Agregados Minerais: Uma Revisão. **Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v.12 (2020). DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2020.v12.p.165-187>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MADUREIRA FILHO J. B; ATENCIO, D; MCREATH, I. Minerais e rochas: constituintes da terra solida. **Decifrando a terra**. Tradução. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 27-42. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/90711141-6710-4f50-86b7-2dcc613bbf73/1131080.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2024.

**Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEDEIROS, M. H. F. DE; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 125–139, 2017.

MEDEIROS, M. H. F; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 125–139, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400189>. Acesso em: 15 Fev 2024.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. Evolução em tecnologia do concreto. **Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 3 ed., São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2008.

MELLO, G. N. A. Using SEM and EDS for material's analysis of the small hydroelectric power plant: case study. **Brazilian Journal of Development**. ISSN: 2525-8761. DOI:10.34117/bjdv7n7-262. Acesso em: 05 jul. 2021.

MENÉNDEZ, E. *et al.* RILEM TC 258-AAA Round Robin Test: Alkali release from aggregates and petrographic analysis. Critical review of the test method AAR-8. **Materiales de Construcción**, vol. 72, ed. 346, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2022.17021>. Acesso em: 03 abr. 2023.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete Microstructure Properties and Materials**. 4. ed. New York: McGraw Hill Professional, 2013. 659 p.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e** MINDESS, S; DARWIN, D; YOUNG, J. F. **Concrete**. Pearson Education, 2003.

MO, K.H. *et al.* Alkali-silica reactivity of lightweight aggregate: A brief overview. **Construction and Building Materials**, vol 270, 121444, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121444>. Acesso: 10 Fev 2024.

MOHAMMADI, A; GHASVAND, E; NILI, M. Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 119567, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119567>. Acesso em: 21 ago. 2023.

MOREIRA, K.M.V et al. Alkali-silica reaction: understanding the phenomenon. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, vol. 6,

article number 5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-020-00100-3>. Acesso em: 15 dez 2023.

MOREIRA, K.M.V. **Mitigação da reação álcali-sílica em compósitos cimentícios com o uso de cinza volante e de escória granulada de alto forno do complexo industrial e portuário do Pecém (Ceará)**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de pós-graduação em engenharia e ciência de materiais, Universidade Federal do Ceará; Ceará, 2021.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações Álcali-sílica e álcali-silicato**. 2007. 166 p. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2007.tde-10012008-100734>. Acesso em 02 fev. 2022.

MUNIR, M.J. *et al.* Role of test method in detection of alkali-silica reactivity of concrete Aggregates. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - **Construction Materials**, vol. 171, ed. 5, p. 203-221, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00058>. Acesso em: 02 fev. 2022.

NASCIMENTO, R.L.X; SOUZA, C.C; OLIVEIRA, M.A.N. **Caderno de caracterização: estado do Amapá** - Brasília, DF: Codevasf, 2021. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/acesso-a-informacao/institucional/biblioteca-geral-do-rocha/publicacoes>. Acesso em: 02 mar. 2022.

NETO, D.P.G. *et al.* Influence of Granitic Aggregates from Northeast Brazil on the Alkali-aggregate Reactio. **Materials Research**, vol. 17, p. 51-58, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000045>. Acesso em: 15 set. 2022.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Technology of concrete: the construction process**. Pearson Education, 2010;

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

NIXON, P. J.; SIMS, I. (2003) RILEM Recommended Test Method: AAR-1.1 – Detection of potential alkali-reactivity – Part 1: Petrographic examination method. **Materials and Structures**, vol. 36: 480- 496. Disponível em: <https://www.rilem.net/images/publis/1560.pdf>. Acesso em: 15 mar 2024.

NIXON, P. J; SIMS, I. RILEM Recommended Test Method: AAR-2 - Detection of Potential Alkali-Reactivity - Accelerated Mortar-Bar Test Method for Aggregates. **RILEM State-of-the-Art Reports**, vol 17, p. 61-77, Springer, Dordrecht, 2015a. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5_4). Acesso em: 04 fev 2023.

NIXON, P. J; SIMS, I. RILEM Recommended Test Method: AAR-4.1 - Detection of Potential Alkali-Reactivity-60 °C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms. **RILEM State-of-the-Art Reports**, vol 17, p.99 - 116, Springer, Dordrecht, 2015b. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5_6). Acesso em 04 fev. 2023.

Norwegian Concrete Association (Associação Norueguesa de Concreto). Alkali-aggregate reactions in concrete, Test methods and Requirements to Test Laboratories, NB Publication No. 32 (in Norwegian), 2005.

NSIAH-BAAFI, E. *et al.* **Correlation between Existing Test Methods for Assessing Alkali-Silica Reaction of Aggregates.** Disponível em: [https://www.ciaconference.com.au/concrete2021/pdf/full-paper\\_189.pdf](https://www.ciaconference.com.au/concrete2021/pdf/full-paper_189.pdf). Acesso em: 28, mar. 2024.

OLIVEIRA, M.J. **Diagnóstico do setor mineral do Estado do Amapá.** Macapá: IEPA, 2010. Disponível em: <https://antigo.mme.gov.br/documents/36108/406547/Diagn%C3%B3stico+do+Setor+Mineral+do+Estado+do+Amap%C3%A1.pdf/32a5d666-b7ae-4104-b2cd-6096031a9031?version=1.0>. Acesso em: 04 fev. 2022.

OLLIVER, J. P.; VICHOT, A. (Ed. tradução) CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** São Paulo: IBRACON, 2014.

OWSIAK, Z. Testing Alkali-Reactivity of Selected Concrete Aggregates. **Journal of Civil Engineering and Management**, vol XIII, n° 3, p. 201–207, 2007.

PASSCHIER, C.W.; TROUW, R.A.J. **Microtectonics**, 2nd ed.; Springer: Berlin, Germany, 1998; ISBN 978-3-540-29359-0. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/270103612\\_Microtectonics](https://www.researchgate.net/publication/270103612_Microtectonics). Acesso em: 28 de mar de 2024.

PAULON, V.A. **Reações álcali-agregado em concreto.** 1982. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

PEDROSO, F. IBRACON, 2021. **Reações expansivas no concreto das estruturas.** Blog do Concreto. Disponível em: [https://site.ibracon.org.br/Site\\_revista/Concreto\\_Construcoes/Concreto\\_blog/press-releases/reacoesexpansivasnoconcreto/](https://site.ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/Concreto_blog/press-releases/reacoesexpansivasnoconcreto/). Acesso em 05 de mar 2024.

PEREIRA, E. *et al.* Avaliação do efeito combinado da reação álcali-agregado (RAA) e ataque interno por sulfatos (ISA) sobre as resistências mecânicas e microestrutura de argamassas em cura imersa em solução de hidróxido de sódio. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Ed. Especial 3º SPPC, 2018. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/405/239>. Acesso em 08 nov. 2023.

PEREIRA, E. *et al.* Combined effect of alkali-aggregate reaction (AAR) and internal sulfate attack (ISA): Microstructural and porous structure modifications of portland cement mortars. **Construction and Building Materials**, vol. 362, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129676>. Acesso em: 29 mar. 2023.

PETERSON, M. G. **Chemoplasticity of the Alkali-Silica Reaction in Concrete: Modeling of Stress-Induced Anisotropy.** Report, Department of Civil & Environmental Engineering - School of Engineering, Massachusetts, EUA, June, 2000. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/80952/47651942-MIT.pdf?sequence=2>. Acesso em 29 mar. 2023.

PINTO, C. D. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3a ed. São Paulo: Oficina Textos, 2006.

POOLE, A. B. **Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete.** In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete.* Glasgow/London: Blackie / New York:

Van Nostrand Reinhold, 1992, p. 1-29. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203036631>. Acesso em 29 mar. 2023.

PORTELLA, K.F. *et al.* Alkali-silica reaction (ASR) - Investigation of crystallographic parameters of natural sands by backscattered electron diffraction. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, vol. 14, ed. 3, e14308, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000300008>. Acesso em: 22 mar. 2023.

PRISZKULNIK, S. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado. *In: ISAÍÁ, G.C. Concreto: Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Ed. Ibracon, 2005.

QIU, X. *et al.* Insights in the chemical fundamentals of ASR and the role of calcium in the early stage based on a 3D reactive transport model. **Cement and Concrete Research**, vol. 157, 106778, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106778>. Acesso em: 07 nov. 2023.

RAJABIPOUR, F. *et al.* Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, vol. 76, p. 130-146, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.024>. Acesso em 04 jul. 2023.

RILEM - International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures. **Diagnosis & Prognosis of AAR Affected Structures: State-of-the Art Report of the RILEM technical committee 259-ISR**. 1.ed. Springer, 2021.

ROLIM, P.H.B. Reação álcali-agregado: avaliação do método químico de ensaio. 2010. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/103255>. Acesso em: 12 nov. 2023.

ROY, D. M. *et al.* Influence of Portland cement characteristics on alkali-silica reactivity. **In: Proceedings of the annual international conference of cement microscopy**, 2003. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/282121086\\_Influence\\_of\\_Portland\\_Cement\\_Characteristics\\_on\\_Alkali\\_Silica\\_Reactivity](https://www.researchgate.net/publication/282121086_Influence_of_Portland_Cement_Characteristics_on_Alkali_Silica_Reactivity). Acesso em: 04 abr. 2023.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. **Cement and Concrete Research**, v. 93, p. 17-31, 2017.

SANCHEZ, L.F.M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos**. 2008. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - USP, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2008.tde-18082008-144850>. Acesso em: 11 fev. 2023.

SANTOS, M. O. **Estudo de concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de íons cloreto e CO<sub>2</sub>**. São Carlos, 2018. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos.

SCHOVANZ D. COSTA L. C.; BONSEMBIANTE F. T. Mapeamento do potencial álcali reativo das areias no Rio Grande do Sul. **Revista de Arquitetura IMED**, vol. 8, n. 1,

p. 3-18, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2019.v8i1.3122>. Acesso em 15 de mar 2024.

SHAKOORIOSKOOIE, M. *et al.* Quantitative analysis of the evolution of ASR products and crack networks in the context of the concrete mesostructure. **Cement and Concrete Research**, vol. 162, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106992>. Acesso em 02 jun. 2023.

SHI, Z. *et al.* Alkali-silica reaction in waterglass activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin, **Cement and Concrete Research**, vol. 108, p. 10-19, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.002>. Acesso em 10 mar. 2023.

SHI, Z. *et al.* Formation of shlykovite and ASR-P1 in concrete under accelerated alkali-silica reaction at 60 and 80 °C. **Cement and Concrete Research**, vol 137, p. 106213, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106213>. Acesso em: 12 set. 2023.

SHI, Z. *et al.* Synthesis, characterization, and water uptake property of alkali-silica reaction products, **Cement and Concrete Research**, vol. 121, p. 58-71, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.009>. Acesso em: 20 mar. 2023.

SHI, Z; LOTHENBACH, B. The role of calcium on the formation of alk ali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, vol. 126, p. 105898, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105898>. Acesso em 10 mar. 2023.

SILVA, P.N. **Reação Álcali-agregado nas Usinas Hidrelétrica do Complexo Paulo Afonso/Chesf. Influência da reação nas propriedades do concreto.** 2007. 241 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26032009-113640/publico/Dissertacao\\_Patricia\\_Neves\\_Silva.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26032009-113640/publico/Dissertacao_Patricia_Neves_Silva.pdf) . Acesso em: 11 fev. 2023;

SILVEIRA, A. L. Z. P. **Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas.** 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade de Brasília, 2006. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/6503>. Acesso em 05 mar. 2023.

SOUZA, D. J; SANCHEZ, L.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**, vol. 173, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107262>>. Acesso em: 14 set. 2023.

SOUZA, D.J; MEDEIROS, M.H.F; FILHO, J.H. Evaluation of external sulfate attack (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and MgSO<sub>4</sub>): Portland cement mortars containing siliceous supplementary cementitious materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol. 13, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000400003>. Acesso em: 04 jun. 2023.

STANTON, T. E. Expansion of Concrete Through Reaction between Cement and Aggregate. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, vol. 107, ed. 01, p. 1781-1811, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005540>. Acesso em: 04 mar. 2023.

STRACK, C.M. *et al.* Impact of aggregate mineralogy and exposure solution on alkali-silica reaction product composition and structure within accelerated test conditions.

**Construction and Building Materials**, vol. 240, 117929, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117929>. Acesso em: 05 nov. 2023.

SUN, L. *et al.* Alkali-silica reaction and strength of concrete with pretreated glass particles as fine aggregates. **Construction and Building Materials**, vol. 271, p. 121809, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121809>. Acesso em: 04 mar. 2023.

TAPAS, M.J. *et al.* Efficacy of SCMs to mitigate ASR in systems with higher alkali contents assessed by pore solution method. **Cement and Concrete Research**, vol. 142, p. 106353, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106353>. Acesso em: 04 mar. 2023.

TIECHER, F. B. **Reação álcali-agregado: Avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006. 182 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/8021>. Acesso em: 05 mar. 2023.

TIECHER, F. *et al.* Influence of the Quartz Deformation Structures for the Occurrence of the Alkali-Silica Reaction. **Materials**, vol. 11, p. 1-21, 2018. DOI: [10.3390/ma11091692](https://doi.org/10.3390/ma11091692). Acesso em: 06 mar. 2023.

TROTTIER, C. *et al.* Microscopic assessment of recycled concrete aggregate (RCA) mixtures affected by alkali-silica reaction (ASR). **Construction and Building Materials**, vol. 269, 121250, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121250>. Acesso em: 21 abr. 2023.

TROTTIER, C. *et al.* Microscopic characterization of alkali-silica reaction (ASR) affected recycled concrete mixtures induced by reactive coarse and fine aggregates. **Cement and Concrete Research**, vol. 144, 106426, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106426>. Acesso em: 21 abr. 2023.

VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/142145/000632283.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 mai. 2023.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2002. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/pt/dissertacoes-teses/75672/reacao-alcali-agregado-mapeamento-de-agregados-reativos-do>. Acesso em: 06 mar. 2023.

WENK, H.R.; MONTEIRO, P.J.M. **Relationship between aggregate microstructure and mortar expansion: A case study of deformed granitic rocks from the Santa Rosa mylonite zone**. *J. Mater. Sci.* 2008, 23, 1278–1285. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/225477892\\_Relationship\\_between\\_aggregate\\_microstructure\\_and\\_mortar\\_expansion\\_A\\_case\\_study\\_of\\_deformed\\_granitic\\_rocks\\_from\\_the\\_Santa\\_Rosa\\_mylonite\\_zone](https://www.researchgate.net/publication/225477892_Relationship_between_aggregate_microstructure_and_mortar_expansion_A_case_study_of_deformed_granitic_rocks_from_the_Santa_Rosa_mylonite_zone). Acesso em: 25 de mar de 2024.

YAZICI, H. *et al.* Comparing the alkali-silica reaction mitigation potential of admixtures by using different accelerated test methods. **Construction and Building Materials**,

vol. 197, p. 597- 614, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.227>. Acesso em 06 mar. 2023.

ZAHEDI, A. *et al.* The Impact of Distinct Superplasticizers on the Degradation of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction (ASR). **Materials**, vol. 16, p. 3374, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16093374>. Acesso em: 10 set. 2023.

ZAPALA-SLAWETA, J; SWIT, G. Monitoring of the Impact of Lithium Nitrate on the Alkali–aggregate Reaction Using Acoustic Emission Methods. **Materials**, vol. 12, p. 1-13, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12010020>. Acesso em: 04, fev. 2023.

ZHIYAO, M; HAIRONG, H; XINYING, H; HAIPING, Y. Experiment study on the mechanical properties and alkali sílica reaction (ASR) of mortar blended rice husk ash (RHA). **Case Studies in Construction Materials**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02028>. Acesso em: 08 mar 2024.

## ANEXO I

NOMECLATURA DA AMOSTRA		J		
Idade (dias)	Amostra	Leitura (mm)	Expansão (%)	Expansão média (%)
00*	I	moldagem	-----	-----
	II	moldagem	-----	
	III	moldagem	-----	
01*	I	-----	-----	-----
	II	-----	-----	
	III	-----	-----	
Leitura Inicial	I			
02	II			
	III			
04	I			
	II			
	III			
08	I			
	II			
	III			
12	I			
	II			
	III			
16	I			
	II			
	III			
20	I			
	II			
	III			
24	I			
	II			
	III			
28	I			
	II			
	III			
30	I			
	II			
	III			

\*Leitura das barras não realizadas, conforme NBR 15577-4.



## ANEXO II



Cronograma de execução do ensaio do potencial reativo, seguindo a NBR15577-4

	<b>Amostras 1 e 2</b>	<b>Amostras 3 e 4</b>	<b>Amostras 5 e 6</b>	<b>Amostras 7 e 8</b>
<b>SEMANA 01</b>	Moldagem 1 e 2 - Camera umida (24h)			
	Desmoldagem - recipiente com água destilada - estufa (24h) 80°C	Moldagem 3 e 4 -camera umida (24h)		
	<b>Leitura inicial</b> - Solução alcalina - Banho Termorregulador (24h) 80°C	Desmoldagem - recipiente com água destilada - estufa (24h) 80°C	Moldagem 4 e 5 - Camera umida (24h)	
		<b>Leitura inicial</b> - Solução alcalina - banho Termorregulador (24h) 80°C	Desmoldagem - recipiente com água destilada - estufa (24h) 80°C	
			<b>Leitura inicial</b> - Solução alcalina - banho Termorregulador (24h) 80°C	
				Moldagem 7 e 8 - Camera umida (24h)
				Desmoldagem - recipiente com água destilada - estufa (24h) 80°C
<b>SEMANA 02</b>				<b>Leitura inicial</b> - Solução alcalina - banho Termorregulador (24h) 80°C

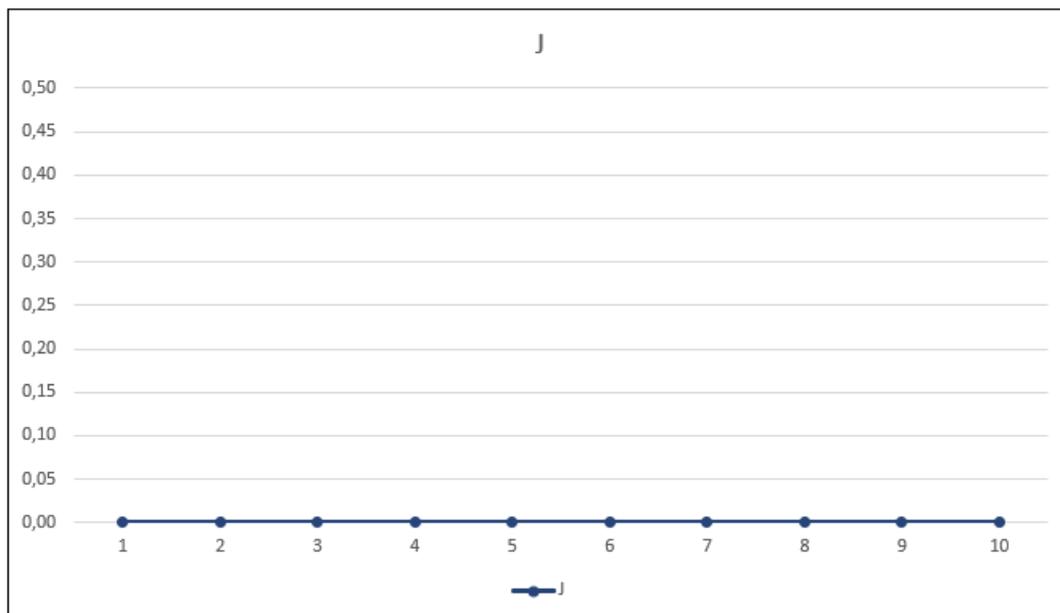
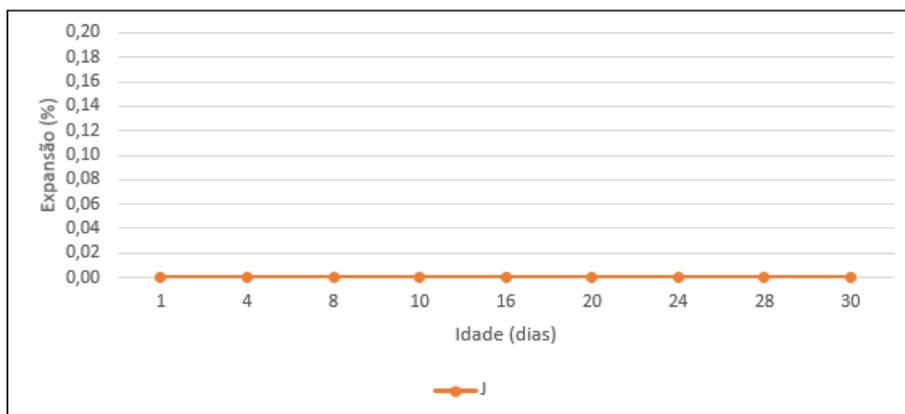
\*Após a leitura inicial, leituras posteriores de cada amostra nas idades 4, 8, 10, 16, 20, 24, 28, 30.



### ANEXO III



Modelos dos gráficos utilizados para verificação da reatividade potencial pelo método acelerado.





## ANEXO IV



Modelo do gráfico utilizado para verificação da reatividade potencial pelo método químico - NBR 9774 (2008)

