



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANTONIO FLÁVIO MOTA REZENDE**

**REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DE CASO DE**  
**MATERIAIS PROVENIENTES DE DOIS LOCAIS DO NORDESTE DO**  
**BRASIL**

Cruz das Almas  
2022

**ANTONIO FLÁVIO MOTA REZENDE**

**REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DE CASO DE  
MATERIAIS PROVENIENTES DE DOIS LOCAIS DO NORDESTE DO  
BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como requisito básico para a conclusão do curso de Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Alexandra Cruz Passuello

Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Fernanda Nepomuceno Costa.

Cruz das Almas  
2022

Rezende, Antonio Flávio Mota

REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DE CASO DE MATERIAIS PROVENIENTES DE DOIS LOCAIS DO NORDESTE DO BRASIL/  
Antonio Flávio Mota Rezende. - Cruz das Almas, 2022.

35 p.: 30 cm

Orientador(a): Alexandra Cruz Passuello.

Coorientador(a): Fernanda Nepomuceno Costa.

TCC (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) -- Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2022.

1. Reação Álcali-Sílica. 2. Reações Expansivas. 3. Método Acelerado. I. Rezende, Antonio Flávio; II. Passuello, Alexandra III. Costa, Fernanda. REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DE CASO DE MATERIAIS PROVENIENTES DE DOIS LOCAIS DO NORDESTE DO BRASIL. IV. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Rita e Antonio.

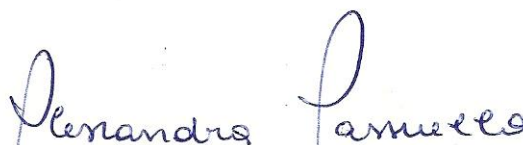
ANTONIO FLÁVIO MOTA REZENDE


**REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DE CASO DE  
MATERIAIS PROVENIENTES DE DOIS LOCAIS DO NORDESTE DO  
BRASIL**


Trabalho monográfico apresentado a  
Universidade Federal do Recôncavo da  
Bahia, como parte das exigências para a  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

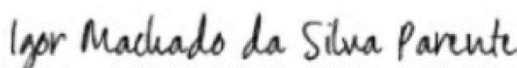
Cruz das Almas - BA, 15 de março de  
2022.

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eng. Civil Alexandra Cruz Passuello  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eng. Civil Fernanda Nepomuceno Costa  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. MSc. Eng. Civil Mariane Porto Lima  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

  
\_\_\_\_\_  
Prof. MSc. Eng. Civil Igor Machado da Silva Parente  
Universidade de São Paulo

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado forças para seguir a minha caminhada.

Aos meus pais, minha tia e minha irmã agradeço pelo apoio que sempre me dão, é a base de tudo que sou e minha inspiração diária.

Aos meus colegas do setor de trabalho, Zane, Manu, Gabi, Yasmin, Juliele, Jardel, Dias, Danilo e Ivo agradeço pela oportunidade de estar aprendendo cada dia mais com vocês.

À Camilla obrigado por ser uma das pessoas mais positivas que já vi, sua energia contagia todos que estão ao seu redor, trazendo paz e tranquilidade.

À Elaine agradeço por existir, tornando meus dias cada vez mais felizes, sendo minha companheira nas horas boas e ruins. És muito importante para mim, amo você.

Às minhas orientadoras Alexandra e Fernanda sou muito grato por terem me aceitado como seu orientando e ter me ajudado na realização deste trabalho, creio que cada palavra, cada conselho, foi de grande importância para o meu desempenho como pessoa e como profissional. Levarei sempre no meu coração.

Agradeço à todas as pessoas que não citei, mas contribuíram para eu estar aqui. Muito obrigado!

# REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DE CASO DE MATERIAIS PROVENIENTES DE DOIS LOCAIS DO NORDESTE DO BRASIL

## RESUMO

O primeiro caso relacionado à RAA no Brasil foi relatado em 1946, na usina hidrelétrica de Peti, e a partir desse momento os estudos relacionados à ocorrência de reações expansivas ganharam notoriedade no cenário nacional. Essa reação pode ser classificada em três tipos: reação álcali-carbonato, reação álcali-sílica e reação álcali-silicato, esta última podendo ser considerada como um tipo específico da reação álcali-sílica. Neste trabalho foi dado um enfoque na reação álcali-sílica (RAS), pelo fato de ser a mais comum no país. A RAS tem como característica principal a formação de um gel higroscópico que se expande na presença de água, gerando tensões internas de tração no concreto. Tais tensões provocam a fissuração do elemento estrutural, comprometendo as propriedades físicas e permitindo a entrada de agentes deletérios provenientes do meio externo. Diante de tal problemática, o trabalho objetivou a verificação do potencial de reatividade de agregados de granulometrias distintas. Foram realizados ensaios de barras de argamassa pelo método acelerado em dois agregados provenientes de localidades do nordeste do Brasil. O primeiro foi um agregado miúdo oriundo de uma jazida do estado do Pernambuco, o qual apresentou potencial de reatividade de grau R0 (inócuo), enquanto o segundo foi um agregado graúdo proveniente da extração de testemunhos de uma estaca em concreto no interior da Bahia, o qual apresentou um potencial de reatividade classificado como R1. Por fim foi feita uma análise sobre as limitações do método de ensaio utilizado e as recomendações estabelecidas pelas principais normas vigentes no Brasil, no que se refere às ações profiláticas sobre a utilização de agregados na composição do concreto.

*Palavras-chave: Reação álcali-sílica, expansão do concreto, método acelerado, mitigação.*

# **REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DE CASO DE MATERIAIS PROVENIENTES DE DOIS LOCAIS DO NORDESTE DO BRASIL**

## **ABSTRACT**

The first case related to AAR in Brazil was reported in 1946, at the Peti hydroelectric plant, and from that moment on the studies related to the occurrence of expansive reactions gained notoriety in the national scenario. This reaction can be classified into three types: alkali carbonate reaction, alkali-silica reaction and alkali-silicate reaction, the latter being considered as a specific type of alkali-silica reaction. This paper focused on the alkali-silica reaction (ASR), because it is the most common in the country. The main characteristic of ASR is the formation of a hygroscopic gel that expands in the presence of water, generating internal tensile stresses in concrete. Such stresses cause cracking of the structural element, compromising its physical properties and allowing the entry of deleterious agents from the external environment. In view of such problematic, the work aimed to verify the potential reactivity of aggregates of different granulometries. Mortar bar tests were performed by the accelerated method in two aggregates from places in northeastern Brazil. The first was a fine aggregate from a deposit in the state of Pernambuco, which presented a reactivity potential of R0 grade (innocuous), while the second was a coarse aggregate from the extraction of cores from a concrete pile in the interior of Bahia, which presented a reactivity potential classified as R1. Finally, an analysis was made on the limitations of the test method used and the recommendations established by the main standards in force in Brazil, regarding the prophylactic actions on the use of aggregates in the composition of concrete.

**Keywords:** Alkali-silica reaction, concrete expansion, accelerated method, mitigation.



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Bloco fissurado devido a RAA. ....	5
Figura 2: Agentes fundamentais para ocorrência da RAA. ....	6
Figura 3: Fissuras provocadas pela RAS em bloco de fundação do viaduto Robert-Bourassa em Charest, cidade de Quebec no Canadá. ....	7
Figura 4: Fotomicrografia de dois agregados diferentes: (a) agregado caracterizado como rochas ígneas do tipo basalto; (b) agregado de origem sedimentar com presença de quartzo microcristalino (>5%). ....	9
Figura 5: Análise visual e por fotomicroscopia de manifestações patológicas nos (a) blocos de fundação com sinais de deterioração na Ponte Paulo Guerra e (b) imagem microscópica das rachaduras e morfologias típicas de RAA. ....	9
Figura 6: Fluxograma experimental do ensaio de barras de argamassa pelo método acelerado para os agregados miúdo e graúdo. ....	17
Figura 7: Faixas granulométricas da amostra do agregado graúdo. ....	19
Figura 8: Processo de moldagem dos corpos de prova constituídas com agregados retirados dos testemunhos de concreto. ....	21
Figura 9: Leitura das barras com o relógio comparador. ....	22
Figura 10: Expansão das barras de argamassa durante o ensaio acelerado para avaliação da reação álcali-sílica (RAS) no agregado miúdo. ....	24
Figura 11: Extração realizada em uma estaca de concreto moldada in loco. ....	26
Figura 12: Expansão das barras durante o ensaio acelerado para avaliação da reação álcali-sílica (RAS) no agregado graúdo. ....	26
Figura 13: Barras moldadas com agregado graúdo fissuradas. ....	28

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1: Composição granulométrica requerida do material para o ensaio pelo método acelerado de barras de argamassa.....	19
Tabela 2: Expansão das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo durante o ensaio acelerado nas principais idades conforme ABNT NBR 15577-4:2018.	25
Tabela 3: Expansão das barras moldadas com agregado graúdo durante o ensaio acelerado nas principais idades, conforme ABNT NBR 15577-4:2018.....	27

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação do grau de reatividade do agregado (NBR 15577-1:2018). 10	
Quadro 2: Grau de risco de ocorrência da RAS (NBR 15577-1:2018). ..... 11	
Quadro 3: Classificação da estrutura quanto às consequências da RAS. .... 14	

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	Corpo de Prova
CP II E	Cimento Portland Composto com Escória
CP II Z	Cimento Portland Composto com Pozolana
CP III	Cimento Portland de Alto Forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
DRM	Desvio Máximo Relativo
DRX	Difração de Raio X
NBR	Norma Brasileira
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAC	Reação Álcali-Carbonato
RAS	Reação Álcali-Sílica
UFRB	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
%	Porcentagem

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.2 HIPÓTESES E DELIMITAÇÕES .....	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1 DEFINIÇÃO E TIPOS DE REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA).....	4
2.2 FATORES FUNDAMENTAIS PARA A OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....	5
2.3 DIAGNÓSTICO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA.....	6
2.3.1 Análise Petrográfica.....	8
2.3.2 Reatividade potencial pelo método acelerado .....	9
2.3.3 Método da expansão de longa duração de prismas de concreto.....	11
2.3.4 Teste de dano de rigidez .....	12
2.4 PREVENÇÃO E NEUTRALIZAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA .....	13
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
3.1 MATERIAIS .....	18
3.1.1 Água .....	18
3.1.2 Agregados .....	18
3.1.3 Cimento .....	18
3.2 MÉTODOS .....	18
3.2.1 Caracterização e preparação das amostras de agregados .....	18

3.2.2	Dosagem e Mistura.....	20
3.2.3	Moldagem e Cura das Barras .....	20
3.2.4	Determinação da Expansão das Barras .....	22
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>24</b>
4.1	ANÁLISE DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO SÍLICA EM AGREGADO MIÚDO 24	
4.2	ANÁLISE DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM AGREGADO GRAÚDO... 25	
4.3	AÇÕES PROFILÁTICAS PARA MITIGAR A RAA.....	29
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>33</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O contínuo avanço da tecnologia tem possibilitado a melhoria no controle de processos e serviços nas diferentes atividades do setor da construção civil. O concreto, por ser um material produzido com matérias-primas disponíveis no meio ambiente, fácil preparação e relativo baixo custo, quando comparado a outros materiais, tornou-se um dos principais materiais mais produzidos no mundo, por isso, é um dos grandes objetos de estudo da ciência. Desse modo, tem-se investido muito em pesquisas para entender e melhorar as propriedades do concreto, especialmente nos parâmetros físicos, químicos, mecânicos e de durabilidade, já que, neste último, o concreto possui suscetibilidade a diferentes processos de deterioração.

Um dos alvos mais abordados são os mecanismos de degradação do concreto, em que se pode destacar a reação álcali-agregado (RAA), que foi descoberta em 1940 pelo americano Stanton. Desde então, a literatura tem mostrado cada vez mais casos de estruturas com essa problemática. A maior parte dos casos envolvendo RAA ocorre em obras hidráulicas, no entanto, qualquer estrutura de concreto que contenha os elementos e as condições para a ocorrência dessa reação estão sujeitas ao aparecimento dessa anomalia.

O primeiro caso relacionado a RAA no Brasil se deu em 1946 na usina hidrelétrica de Peti, localizada no município de São Gonçalo do Rio Abaixo - MG (ALBERTINI, 2014). Depois disso, vários casos de obras hidráulicas com RAA foram constatados no Brasil, como nas Usinas Hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso (Bahia) e na Usina Hidrelétrica Furnas (Minas Gerais). Mais recentemente, o meio técnico tem se preocupado com a ocorrência de reação em sapatas e blocos de fundação, como exemplo do ocorrido em Olinda, região metropolitana de Recife. O caráter devastador e progressivo da RAA se dá pela ocorrência de fissuração generalizada que vai comprometendo os requisitos de segurança dos elementos estruturais. Isso ocorre devido a instauração de reações entre elementos reativos presentes nos agregados e os álcalis do cimento, produzindo gel de sílica nos poros do concreto, que se expande na presença de água (SANCHEZ, 2017). Em consequência disso, ocorrem fissurações intensas que comprometem consideravelmente a vida útil da estrutura.

Diante das evidências do aparecimento do problema em obras prediais, considera-se fundamental, para garantir a qualidade e a vida útil das estruturas, a verificação do potencial de reatividade dos agregados e a partir disso tomar medidas preventivas para evitar ou mitigar essa reação. Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir na identificação deste problema em edificações nas quais agregados reativos podem estar sendo utilizados em concretos estruturais. Dessa maneira, há a necessidade de realizar ensaios preliminares para descartar a possibilidade do potencial reativos na matéria-prima, bem como o uso de ações profiláticas na fase de construção. Para isso, foram realizados ensaios de potencial de reatividade em dois tipos de agregados utilizados em obras e fases construtivas diferentes.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o potencial de reatividade em agregados miúdo e graúdo, respectivamente, antes e depois da produção de concretos estruturais;

Dentro deste objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar a ocorrência de reação álcali-agregado em uma estrutura de concreto armado construída há cerca de 5 anos;
- Analisar as possíveis limitações do método acelerado no diagnóstico da reatividade de agregados provenientes de extrações em estruturas existentes;
- Informar ações profiláticas que podem ser realizadas para mitigar a ocorrência da RAA no Brasil.

## 1.2 HIPÓTESES E DELIMITAÇÕES

Levando em conta que agregados reativos já foram identificados em diferentes regiões do país, entende-se que os ensaios de potencial de reatividade são fundamentais para garantir a qualidade dos concretos produzidos e a vida útil das estruturas.



O uso de agregados na composição do concreto deve ser precedido da identificação do potencial reativo deste material. Em estruturas pré-existentes que apresentem sintomatologia típica da ocorrência de reações expansivas, a possibilidade da existência de RAA também deve ser considerada. Dessa forma, ensaios específicos devem ser realizados para verificar ou não o potencial reativo do agregado para cada caso.

A pesquisa apresentou duas situações diferentes da análise da reação álcali-agregado. Na primeira, o objetivo foi verificar o potencial reativo do material utilizando o agregado miúdo antes da sua aplicação no concreto de uma estrutura. Na segunda situação, a análise foi feita a partir de amostras de agregado graúdo extraídas de testemunhos de concreto. Nesta última, não foi possível desenvolver avaliações no agregado miúdo, devido à impossibilidade de separação deste componente da pasta. Além disso, a origem de ambos agregados não foi informada, não permitindo uma coleta para análise do material diretamente da jazida, para avaliações complementares.

Outro fator limitante neste trabalho foi a ausência de informações detalhadas referentes à outras análises de agregados dos locais estudados, para embasar a pesquisa.

Não foram realizados ensaios com utilização de adições minerais ao concreto para verificar a sua interferência no potencial reativo das amostras.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro trouxe uma introdução a respeito da reação álcali-agregado, um breve histórico deste fenômeno no Brasil, características da RAA e os objetivos, hipóteses e delimitações da pesquisa. O segundo capítulo apresentou uma revisão de literatura em que são abordados os diferentes tipos da reação álcali-agregado, os ensaios mais utilizados para diagnóstico da RAA e medidas preventivas e mitigadoras. A metodologia e os procedimentos adotados neste trabalho foram descritos no capítulo três. Os resultados encontrados e a conclusão da pesquisa estão nos capítulos quatro e cinco, respectivamente, enquanto no capítulo seis foram apresentadas sugestões para ampliação de estudos para esse tema.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 DEFINIÇÃO E TIPOS DE REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o produto das reações químicas entre hidróxidos livres da pasta de cimento Portland e minerais silicosos reativos presentes nos agregados, podem gerar expansão e fissuração do concreto, o que compromete a sua resistência. Tal fenômeno, há tempos denominado como reação álcali-agregado, foi publicado pela primeira vez por Stanton em 1940, através de suas investigações em estruturas fissuradas de concreto na Califórnia (EUA).

A reação álcali-agregado pode ser classificada em dois grupos, de acordo com a composição mineralógica reativa do agregado: reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC), sendo que esta última não é comum no Brasil. Na literatura ainda é possível encontrar um terceiro tipo, denominado reação álcali-silicato, no entanto por apresentar semelhanças com a reação álcali-sílica (RAS) pode ser considerada como um tipo específico desta reação (SOUZA, ZOLETT e CARRAZEDO, 2016).

A reação álcali-sílica (RAS) é um fenômeno que resulta na formação de um gel higroscópico expansivo na interface entre agregado e pasta de cimento, que com o tempo, vai preenchendo os poros do concreto aumentando seu volume na presença de água. Quando preenchido o volume total dos poros existentes no concreto, o gel promove o surgimento de tensões internas de tração que podem causar fissuras progressivas. O fenômeno continua até o consumo de todos os elementos necessários para reação, podendo desencadear problemas estruturais, em função do grau de reatividade do agregado. Essa reação ocorre no interior das peças de concreto devido a existência de alguns constituintes mineralógicos presentes no agregado e os álcalis provenientes, principalmente, do cimento (SILVA *et al.*, 2010). É possível visualizar as consequências deste fenômeno através da Figura 1, cujo bloco de fundação encontra-se em estado avançado de degradação, apresentando muitas fissuras mapeadas que avançaram para o nível de rachaduras, assim como a presença de um gel de cor branca. Essas características são sintomas sugestivos da ocorrência da RAA.

Figura 1: Bloco fissurado devido a RAA.



Fonte: Da Silva (2021).

A reação álcali-carbonato (RAC) pode ser diferenciada da reação álcali-silica por não apresentar a formação do gel expansivo. Ela é caracterizada pela expansão das rochas carbonáticas e causa uma desagregação do material na interface devido ao enfraquecimento da ligação pasta-agregado (GOMES, 2008).

## 2.2 FATORES FUNDAMENTAIS PARA A OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A presença de agregado reativo associado à umidade constante e hidróxidos livres presentes na solução intersticial da pasta de cimento, são os principais fatores condicionantes que atuam simultaneamente para a ocorrência da reação álcali-agregado. Essa reação é cíclica e só ocorre na presença desses três elementos combinados, como representado na Figura 2.

Figura 2: Agentes fundamentais para ocorrência da RAA.



Fonte: Couto (2008).

O desenvolvimento e intensidade dos danos causados pela reação álcali-agregado dependem de muitos fatores, dentre eles o teor de álcalis do cimento, água de amassamento, natureza e disponibilidade de agregados reativos, temperatura ambiente e umidade disponível (MEHTA E MONTEIRO, 2008). De acordo com Cunha (2013), a reação álcali-sílica é mais comum em ambientes úmidos, a exemplo de barragens, pilares de pontes e quebra-mar. Além destes, obras prediais e fundações também estão susceptíveis ao desenvolvimento dessa reação devido à umidade constante junto a estrutura, visto que o gel sílico-alcálico ao entrar em contato com a água expande-se pela absorção, por osmose. Otoch (2016) destaca que quanto mais elevada a temperatura e o consumo de cimento mais intensa é a reação, isso pelo fato de o cimento ser a principal fonte de álcalis, e quando associado à temperatura elevada, provoca o aumento da velocidade do processo.

### 2.3 DIAGNÓSTICO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Durante muitas décadas a reação álcali-agregado tem sido objeto de estudo para a realização de obras hidráulicas no Brasil, sendo considerada uma problemática rara e de desenvolvimento lento. A constatação desse fenômeno no Brasil foi verificada pela primeira vez em obras de edifícios na região metropolitana de Recife, em Pernambuco, devido ao interesse gerado na inspeção das fundações de diversos

edifícios habitacionais, após a queda do Edifício Areia Branca em 2004 (HELENE; MONTEIRO e ANDRADE, 2016).

Apesar dos grandes avanços científicos, Sanchez *et al.* (2017) ressaltam que não existe um consenso sobre qual método seria o mais eficiente para identificação e prevenção da RAS. Destaca, também, que um dos maiores desafios encontrados em relação as estruturas envelhecidas é a correlação entre os danos causados pela RAS e os ocasionados pela perda das propriedades mecânicas, durabilidade e desempenho do material afetado com o passar do tempo. Uma ilustração das consequências deste fenômeno pode ser vista na Figura 3, com a presença de manifestações patológicas associadas à ocorrência da RAS em um bloco de fundação não enterrado do viaduto Robert-Bourassa em Charest, cidade de Quebec no Canadá. É possível observar o grande número de fissuras no elemento estrutural, implicando na perda da resistência, tornando-o, também, suscetível a ataques de outros agentes deletérios provenientes do meio externo, que, conseqüentemente, ocasionarão a corrosão da armadura existente na estrutura de concreto armado em questão. Esses fatores associados reduzem a vida útil da estrutura, favorecendo a falha da sua funcionalidade.

Figura 3: Fissuras provocadas pela RAS em bloco de fundação do viaduto Robert-Bourassa em Charest, cidade de Quebec no Canadá.



Fonte: Sanchez *et al.* (2017).

Segundo Sanchez *et al.* (2017), é possível evitar ou mensurar o risco da ocorrência da reação álcali-agregado nas estruturas de concreto, e para isso existem vários testes de laboratório para avaliação do potencial de reatividade alcalina dos agregados. O item a seguir apresentará alguns desses métodos e testes, dando destaque à métodos de diagnóstico reconhecidos no Brasil.

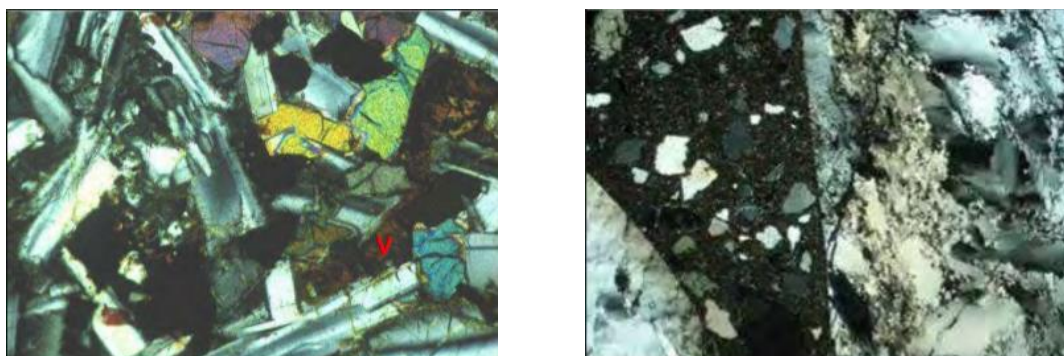
### **2.3.1 Análise Petrográfica**

A análise petrográfica é um método que tem o objetivo de avaliar a presença de minerais reativos com os álcalis do cimento, identificando a presença de componentes álcali-sílicas reativos, como, por exemplo, xistos, gnaisses e quartzo deformado (GOMES, 2008). A ABNT NBR 7389:2009 partes um e dois descrevem a metodologia para análise petrográfica dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente, para avaliação do seu uso no concreto. Para se determinar a composição mineralógica do agregado, deve ser preparado uma seção delgada, por um processo de laminação e polimento específico para ser analisado em microscópio petrográfico (MIZUMOTO, 2009).

A Figura 4 ilustra a imagem de dois agregados submetidos a análise petrográfica. No agregado da Figura 4 (a), foi identificada em sua composição a presença da mesóstase silicosa, representada pela letra V na imagem. De acordo Mizumoto (2009), para esse tipo litológico essa informação é um fator relevante no indicativo do potencial de reatividade, pois tal material possui baixa cristalinidade (alto teor de amorfo). Na Figura 4 (b), o material apresenta presença maior que 5% de quartzo microcristalino, sendo considerado potencialmente reativo.

Helene, Carvalho e Pacheco (2017) realizaram uma inspeção em blocos de fundação da Ponte Paulo Guerra em Recife-PE que apresentavam fissuras mapeadas e expansão do concreto, permitindo a posterior identificação da ocorrência de RAA. A identificação dessa anomalia ocorreu através da análise visual, para estimar a gravidade e a natureza das manifestações, e avaliações microscópicas (Figura 5) complementadas pela análise mineralógica por Difração de Raios-X, que identificaram cristais de quartzo.

Figura 4: Fotomicrografia de dois agregados diferentes: (a) agregado caracterizado como rochas ígneas do tipo basalto; (b) agregado de origem sedimentar com presença de quartzo microcristalino (>5%).

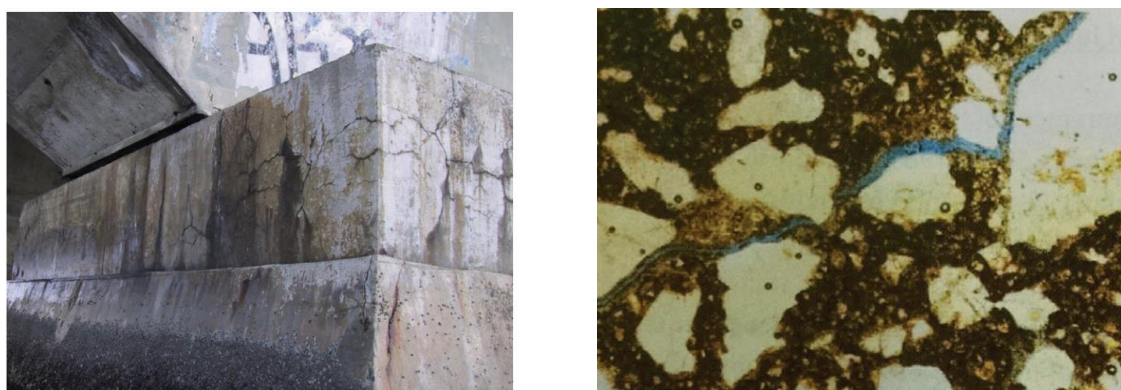


(a)

(b)

Fonte: Mizumoto, 2009.

Figura 5: Análise visual e por fotomicroscopia de manifestações patológicas nos (a) blocos de fundação com sinais de deterioração na Ponte Paulo Guerra e (b) imagem microscópica das rachaduras e morfologias típicas de RAA.



(a)

(b)

Fonte: Helene, Carvalho e Pacheco, 2017.

### 2.3.2 Reatividade potencial pelo método acelerado

O grau de risco para a ocorrência da RAA está diretamente relacionado com o grau de reatividade do agregado e das condições na qual a estrutura de concreto será exposta. Dessa forma, é necessário a realização de ensaios de laboratório para avaliar o quanto reativo é o agregado e, a partir disso verificar a possibilidade do seu uso no concreto. A NBR 15577-4:2018 apresenta o método de ensaio para determinar a expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, fornecendo informações



para execução do ensaio que permite analisar a variação dimensional das barras de argamassa submersas numa solução alcalina de hidróxido de sódio, durante um período de 30 dias contados a partir da moldagem. Também, estabelece os requisitos para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso do agregado no concreto, classificando a reatividade potencial do agregado em quatro grupos, sendo eles denominados como grau R0, grau R1, grau R2 e grau R3 (NBR15577-1:2018).

Embora esse método seja bastante consagrado no Brasil como o método mais utilizado e viável na avaliação da RAA, há uma limitação de laboratórios que possuem equipamentos e aparelhagem para fornecer esse serviço, principalmente em cidades do interior. Em Feira de Santana-BA por exemplo, sabe-se que apenas duas empresas de controle tecnológico realizam esse serviço e em outras cidades como Santo Antônio de Jesus e vizinhanças não foi identificado nenhuma empresa que realiza esse ensaio, evidenciando assim, uma carência desse tipo de ensaio no recôncavo baiano.

De posse dos resultados dos ensaios, é preciso interpretá-los, analisando o grau de reatividade potencial do agregado ensaiado, segundo as determinações da NBR15577-1:2018. Essa análise é realizada utilizando a classificação disposta no Quadro 1, o qual expressa o grau de reatividade do agregado em função da expansão aos 30 dias pelo método acelerado de barras de argamassa.

Quadro 1: Classificação do grau de reatividade do agregado (NBR 15577-1:2018).

<b>Classificação da reatividade potencial do agregado</b>	<b>Expansão das barras de argamassa aos 30 dias (%)</b>
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19 %
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19 e 0,40 %
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41 e 0,60 %
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60 %

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15577-1:2018.

O grau R3 é o maior que uma estrutura pode ser classificada, sendo a expansão maior que 0,60%. A classificação do potencial reativo é essencial para direcionar a



escolha da forma de mitigação a ser utilizada na estrutura afetada pela reação e o grau de risco de ocorrência da RAS, como apresentado no

Quadro 2.

Quadro 2: Grau de risco de ocorrência da RAS (NBR 15577-1:2018).

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Maciço em ambiente seco	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas, expostas a umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito alto
Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço	Desprezível	Alto	Muito alto	Muito alto

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15577-1:2018.

No

Quadro 2 a NBR 15577-1:2018 apresenta algumas condições de exposição e dimensões que devem ser analisadas associadas à caracterização do potencial reativo do agregado. Para o Grau R0, o risco de ocorrência da RAS é desprezível em todas as condições apresentadas. Em contrapartida, o Grau R3 tem risco de ocorrência muito alto em estruturas expostas à umidade, enterradas e imersas e estruturas em contato com álcalis em condições de serviço.

### 2.3.3 Método da expansão de longa duração de prismas de concreto

O método de expansão de prismas de concreto é mais uma maneira para se investigar a ocorrência ou possível ocorrência da reação álcali-sílica. Ele é preconizado pela ABNT NBR 15577-6:2018, a qual estabelece que para a utilização desse método é necessário que o agregado analisado já tenha sido ensaiado pelo método acelerado de barras de argamassa, apresentando expansão média máxima

aos 30 dias superiores a 0,19%. O ensaio de prismas de concreto tem duração de aproximadamente um ano, sendo que o agregado é considerado como reativo quando possui expansão após um ano maior que 0,04%, caso contrário o agregado é considerado como não reativo. A referida norma também informa os procedimentos para moldagem nas formas, os procedimentos para cura em câmara úmida, os locais de permanência dos moldes e os critérios para o cálculo da expansão.

Esse método foi utilizado por Barreto (2019) para a confirmação da reatividade do agregado graúdo que já havia sido ensaiado pelo método acelerado de barras de argamassa, apresentou expansão aos 30 dias maior que 0,19%. Com o resultado do ensaio de longa duração de prismas de concreto foi possível concluir que a brita era realmente reativa, apresentando expansão superior a 0,05% em 130 dias. A desvantagem no uso desse método está relacionada ao longo período de duração do ensaio e, por esse motivo, as empresas não adotam seu uso de imediato, optando por outros ensaios que oferecem resultados mais rápidos.

#### **2.3.4 Teste de dano de rigidez**

Dentre as metodologias existentes, aquela proposta por Sanchez *et al.* (2017) é para a verificação da confiabilidade do Teste de Dano de Rigidez, cujo procedimento mede a quantidade de fissuras internas no concreto desgastado através dos parâmetros de saída e do Índice de Classificação de Danos, por meio das características e do nível de expansão de um mecanismo danificado. Na pesquisa destes autores foram moldados corpos de prova de concreto com resistência à compressão nos valores de 25, 35 e 45 MPa, utilizando a combinação de agregados reativos e não reativos. Os testes permitiram a identificação do progresso do dano através da expansão das amostras afetadas pela RAS e possibilitou observar que com o progresso da reação a presença de fissuras na pasta de cimento se torna mais evidente. Apesar da eficiência desses testes em amostras de laboratório, a avaliação de núcleos retirados de estruturas reais foi considerada limitada, destacando a necessidade da avaliação com maior critério para que tais testes possam ser utilizados como uma importante ferramenta na engenharia diagnóstica.

## 2.4 PREVENÇÃO E NEUTRALIZAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Algumas medidas podem ser adotadas para prevenir a ocorrência da reação álcali-agregado. Devem ser realizados ensaios prévios dos agregados para conhecer o potencial reativo do material para evitar sua utilização quando possível ou adotar o uso de aditivos ou adições que possam evitar a ocorrência da reação (HELENE; MONTEIRO E ANDRADE, 2016). Para estruturas existentes em que se suspeita da ocorrência da reação álcali-sílica e não houve prévia análise dos agregados utilizados, é recomendado um estudo específico da estrutura, extraindo testemunhos de concreto (OTOCH, 2016). Através dos resultados dos estudos obtidos por meio dos testemunhos, pode-se escolher a solução mais viável para o problema, baseado nos custos e nas técnicas de recuperação disponíveis na região.

No intuito de auxiliar nas análises, a NBR 15577-1:2018 estabelece que a intensidade e medida preventiva da RAS depende de alguns fatores, dentre eles a classe de importância da estrutura e o risco de ocorrência dessa reação. O Quadro 3 apresenta a classificação estabelecida pela referida norma diante das consequências da ocorrência da RAS em estruturas.

Quadro 3: Classificação da estrutura quanto às consequências da RAS.

<b>Classificação da estrutura</b>	<b>Consequências da RAS</b>	<b>Exemplos</b>
Classe A	Pequenas ou insignificantes do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança.	Estruturas temporárias (menor que 5 anos de vida útil), elementos não expostos à umidade, elementos não estruturais no interior de edifícios, canteiros de obras.
Classe B	Moderadas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança apenas se ocorrer deterioração generalizada.	Calçadas, calhas, telhas, muros, etc.
Classe C	Significativas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.	Pavimentos de concreto, elementos de fundação, tubos postes, alvenarias de vedação, tubulões, barreiras de segurança, elementos pré-fabricados com alto custo de reposição, estradas de baixo volume de tráfego, dormentes etc.
Classe D	Sérias e de gravidade do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.	Grandes pontes, estádios, hidrelétricas, estruturas de obras de arte, barragens, instalações nucleares, torres eólicas, instalações de tratamento de água, instalações de tratamento de resíduos, túneis, elementos estruturais de difícil inspeção ou reparo.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15577-1:2018.

As consequências associadas aos efeitos da RAA são diversas, em que se pode destacar reduções nas propriedades mecânicas, integridade física, durabilidade e desempenho do material afetado, como relatadas nos trabalhos de Barbosa e Pires Sobrinho (1997), Hasparyk (2005) e Rodrigues (2014). Diante dos problemas que são causados por essa anomalia, necessitou-se do desenvolvimento de medidas que viessem a mitigar essa reação. A adição de materiais pozolânicos que são provenientes de tufo vulcânico, cinza volante, sílica ativa e cinza da casca de arroz, entre outros, possuem grande potencial na mitigação das reações álcali-agregado. Essas pozolanas atuam combatendo a expansão causada pela RAA e, devido à presença de partículas menores, melhoram as propriedades do concreto como a permeabilidade, resistência ao calor e resistência mecânica (FRAGA *et al.*, 2017).

As adições de materiais finos ao concreto, como pozolanas, escória e sílica ativa, contribuem para a redução da concentração de álcalis presentes no concreto. Dessa forma, impedem a reação desses elementos com o material reativo presente nos agregados. A NBR 15577-5:2018 apresenta o método de ensaio acelerado em barras elaboradas com agregados potencialmente reativos, para a determinação da suscetibilidade de cimento Portland em combinação com adições para mitigar a expansão. Outras ações que podem ser tomadas para reduzir a ocorrência da RAA são a limitação do teor de cimento no concreto, que deve possuir teores de álcalis inferiores a 0,4%, e a análise da água de amassamento e dos aditivos e adições minerais, pois são potenciais fontes de álcalis (OTOCH, 2016).

Algumas adições minerais, tais como cinza volante, escória granulada de alto forno, metacaulim, entre outras, têm se mostrado eficientes na redução da expansão do concreto, inibindo a RAS. Santos (2020) estudou o uso de finos de rocha granítica (FRG) incorporadas à argamassa como adição ao cimento, oriundas de duas jazidas, nos teores de 10 e 20%. A adição de FRG apresentou um efeito redutor da RAS, que foi intensificado à medida que se aumentou a finura destes finos, indicando que o provável aumento da quantidade de sílica reativa dissolvida na solução não contribuiu para a formação do gel expansivo, consumindo os álcalis nas primeiras idades e reduzindo a permeabilidade do concreto.

Souza, Zolett e Carrazedo (2016) estudaram a utilização da escória de aciaria elétrica, avaliado em diferentes proporções de substituição parcial do cimento, em que foi avaliado as porcentagens 20% e 30% de substituição. As barras com 20% de substituição apresentaram menor percentual de expansão média de 0,12% aos 16 dias e de 0,15% aos 30 dias. Tal redução comprova que a utilização de materiais finos, como a escória por exemplo, é capaz de reduzir o processo de expansão das barras, visto que esses materiais reagem com os álcalis presentes na solução do concreto antes da ocorrência da RAS. Embora seja evidenciada a redução da expansão, para esse ensaio a NBR 15577-1:2018 considera que não houve mitigação de RAA, pois a expansão aos 16 dias não foi menor que 0,10%.

Um outro material que pode ser utilizado como material pozolânico é a adição de fino de vidro pyrex (FP). Santos (2020) realizou ensaios utilizando tal adição buscando verificar a eficácia desse material como mitigador da RAS. Como resultados, observou uma redução significativa da expansão das argamassas, no entanto não foi suficiente

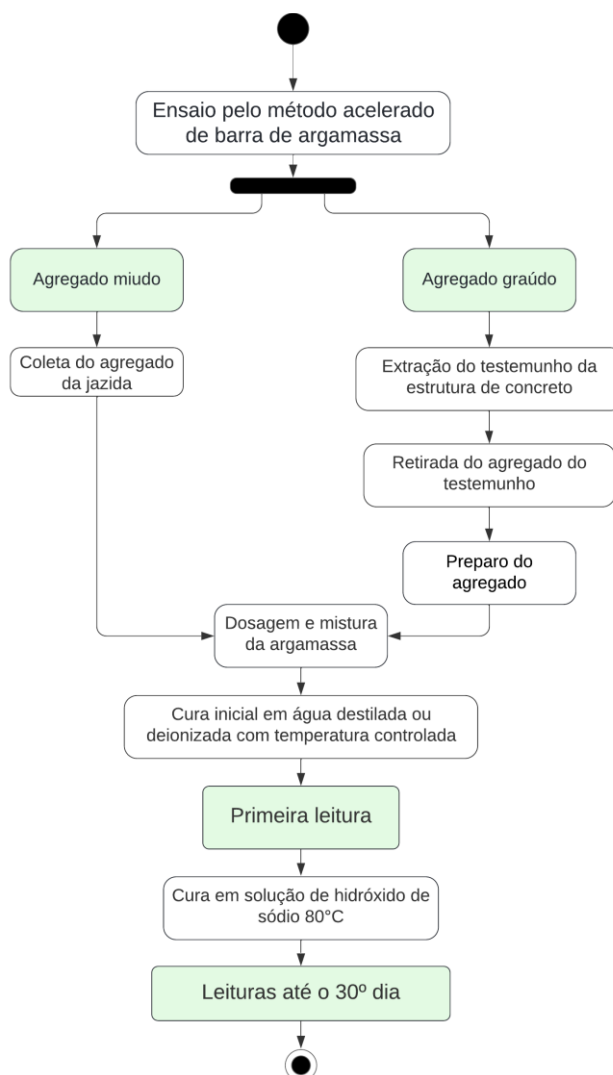
para atender os parâmetros estabelecidos pela NBR 15577-5:2018. Dessa forma, não foi considerada como um mecanismo mitigador desta reação.

Dentre as diferentes soluções sugeridas pela literatura, é preciso avaliar cada situação previamente, para verificar qual seria o elemento mitigador mais adequado. É necessário, portanto, conhecer o grau de reatividade do agregado antes da sua utilização no concreto para que seja adotada a ação mitigadora mais eficiente.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento utilizado para realização deste trabalho foi baseado nos requisitos das normas ABNT NBR15577-1:2018, ABNT NBR15577-3:2018, ABNT NBR15577-4:2018, ABNT NBR 7389:2009, ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 12655:2015. Também, foi realizada uma pesquisa em trabalhos que apresentaram metodologias para identificação da reação álcali-agregado e medidas mitigadoras. O método experimental utilizado nesta pesquisa para identificação do potencial de reatividade dos agregados em estudo foi o método acelerado de barras de argamassa. As etapas adotadas foram descritas na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma experimental do ensaio de barras de argamassa pelo método acelerado para os agregados miúdo e graúdo.



Fonte: Próprio autor.

## 3.1 MATERIAIS

### 3.1.1 Água

Conforme estabelecido na NBR 15577-4:2018, a água utilizada no processo de cura inicial, dosagem da argamassa e preparação da solução foi destilada.

### 3.1.2 Agregados

Os agregados para estudo foram provenientes de dois locais distintos do nordeste do Brasil. O primeiro foi um agregado miúdo coletado em uma jazida no Pernambuco; já o segundo foi um agregado graúdo obtido por meio de extrações de testemunhos em fundações profundas do tipo estaca moldada *in loco*, de um empreendimento construído numa cidade do interior da Bahia. Como orientado pela ABNT NBR 15577-4:2018, os agregados graúdos foram moídos, peneirados e lavados, enquanto os agregados miúdos foram apenas lavados para retirada do material pulverulento presente na superfície dos grãos.

### 3.1.3 Cimento

Foram utilizados para os ensaios acelerados de barras de argamassa o cimento Portland padrão, fabricado e fornecido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Esse tipo de cimento é especificado pela NBR 15577-4:2018 para esse método de ensaio, pois apresenta elevado teor de álcalis, o que potencializa a ocorrência da reação álcali-agregado de forma mais rápida.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Caracterização e preparação das amostras de agregados

Para a realização do estudo foi coletada e determinada a massa específica de duas amostras, sendo uma de agregado miúdo, proveniente da região de Pernambuco e outra de agregado graúdo, a qual foi obtida a partir de extrações realizadas em estruturas de concreto existentes, localizadas no interior da Bahia.



A ABNT NBR 15577-4:2018 estabelece os requisitos para realização do ensaio de reatividade álcali-agregado pelo método acelerado, no qual os agregados devem se enquadrar em faixas granulométricas, e para isso é preciso passar pelo processo de britagem e posterior peneiramento. O agregado miúdo se encaixou na faixa estabelecida pela referida norma, não requerendo assim preparação prévia da amostra. Já o agregado graúdo, primeiramente, foi separado da argamassa do testemunho extraído, para em seguida passar pelo processo de britagem e peneiramento. A Tabela 1, apresenta as faixas granulométricas e a quantidade de material em massa que os agregados devem se enquadrar para realização do ensaio. Uma das etapas do ensaio está ilustrada na

Figura 7, na qual os agregados foram pesados e separados para cada fração granulométrica, assim como o cimento utilizado.

Tabela 1: Composição granulométrica requerida do material para o ensaio pelo método acelerado de barras de argamassa.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR ISO 3310-1:2010)		Quantidade de material, em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: NBR 15577-4:2018.

Figura 7: Faixas granulométricas da amostra do agregado graúdo.



Fonte: Próprio autor.

### 3.2.2 Dosagem e Mistura

Como os agregados possuíam massa específica superior a  $2,45 \text{ g/cm}^3$ , o traço estabelecido pela NBR 15577-4:2018 é uma parte de cimento para 2,25 partes de agregado classificado e relação água/cimento (a/c) igual a 0,47 em massa. Dessa forma, as quantidades de materiais secos a serem misturados foram de 440 gramas de cimento para 990 gramas de agregado e 206,8 mililitros de água. Depois disso, foi feita a mistura mecânica no misturador com rotação planetária, conforme orientado NBR 15577-4:2018, colocando inicialmente toda a quantidade de água e posteriormente adicionando todo o cimento no misturador em velocidade baixa, num período de 30 segundos.

No caso do agregado graúdo, após esse período as frações do material foram homogeneizadas e misturadas na cuba durante um intervalo de tempo de 30 segundos. Finalizado esse processo, o misturador foi colocado em velocidade alta durante mais um período de 30 segundos. O ensaio do agregado miúdo foi feito de forma semelhante, no entanto não foi necessária a etapa da homogeneização da amostra, visto que o material não precisou ser separado em faixas granulométricas.

Finalizadas essas etapas, o misturador foi desligado durante um intervalo de tempo de 1 min e 30 segundos, onde nos primeiros 15 segundos a argamassa aderida nas paredes do recipiente foram retiradas com o auxílio de uma espátula. No tempo restante, a argamassa ficou em repouso, coberta com um pano úmido. O misturador foi ligado em velocidade alta por mais 1 minuto ao final desse intervalo.

### 3.2.3 Moldagem e Cura das Barras

Inicialmente aplicou-se desmoldante vegetal nas formas metálicas para que em seguida fosse feita a moldagem das barras de argamassa em duas camadas, sendo cada uma adensada com 20 golpes de soquete e arrasada posteriormente com uma espátula conforme a NBR 15577-4:2018. Esse processo teve duração total de 2 minutos e 30 segundos. As barras têm formato prismático, com seção quadrada de  $(25 \pm 0,7)$  milímetros de lado e 285 milímetros de comprimento de acordo com a NBR 15577-4:2018.

Após a moldagem, as barras permaneceram durante o período de 24 horas num ambiente com temperatura controlada a  $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  e protegidas com uma placa de

vidro para evitar perda de água para o meio externo segundo a NBR 15577-4:2018. A Figura 8 ilustra parte do processo de moldagem das barras de nas formas metálicas.

Figura 8: Processo de moldagem dos corpos de prova constituídas com agregados retirados dos testemunhos de concreto.



Fonte: Próprio autor.

Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados, identificados e colocados em uma cuba com água destilada para a continuação da cura, sendo que a temperatura da água foi aquecida gradualmente até se alcançar a temperatura de 80 °C, em que permaneceram por 24 horas contadas a partir do início do aquecimento. Isso ocorre pois o aumento da temperatura tem como objetivo favorecer o aumento da velocidade da RAA. Depois desse período foi realizada a primeira leitura das barras que é considerada como a referência inicial na qual vão se basear as próximas leituras para a determinação da expansão. Posteriormente houve a submersão das barras em uma solução agressiva de hidróxido de sódio, como recomenda a NBR 15577-4:2018.

Na preparação da solução de hidróxido de sódio foram utilizados 40 g de NaOH para cada 900 mL de água destilada, acrescentando em seguida mais água até se obter 1,0 L de solução, conforme estabelece a ABNT NBR 15577-4:2018. Como a cuba que foi utilizada para o banho termorregulador comporta 40 litros, essa solução foi preparada para atender à essa necessidade.

### 3.2.4 Determinação da Expansão das Barras

A barra padrão teve sua leitura aferida sempre antes da leitura das barras de argamassa, para que caso ocorra alteração na leitura esse valor seja corrigido em igual proporção nas leituras subsequentes de acordo com a NBR 15577-4:2018.

Para efetuar as leituras, os corpos de prova foram removidos um de cada vez e colocado no comparador de comprimento (Figura 9), sempre na mesma posição e giradas lentamente 360° no mesmo sentido, anotando-se a menor leitura. Esse processo foi realizado no período de 15 ( $\pm$  5) segundos a partir da retirada da barra de argamassa da cuba de banho-termorregulador conforme a NBR 15577-4:2018.

Figura 9: Leitura das barras com o relógio comparador.



Fonte: Próprio autor.

Após a leitura inicial foi realizada a leitura em várias idades, sendo que as mais relevantes consideradas pela NBR 15577-4:2018 são as do 16º dia e do 30º dia, contados a partir da data de moldagem. Em posse do comprimento de cada corpo de prova, para se obter a variação do comprimento em uma determinada idade basta fazer a subtração do comprimento na idade considerada ( $E_n$ ) e seu comprimento inicial (leitura de referência  $E_0$ ), dividido pelo comprimento efetivo de medida ( $E_e$ ). Esse valor é expresso em porcentagem e com aproximação de 0,01% (Equação 1).

$$R = \frac{E_0 - E_n}{E_e} * 100$$

Equação 1

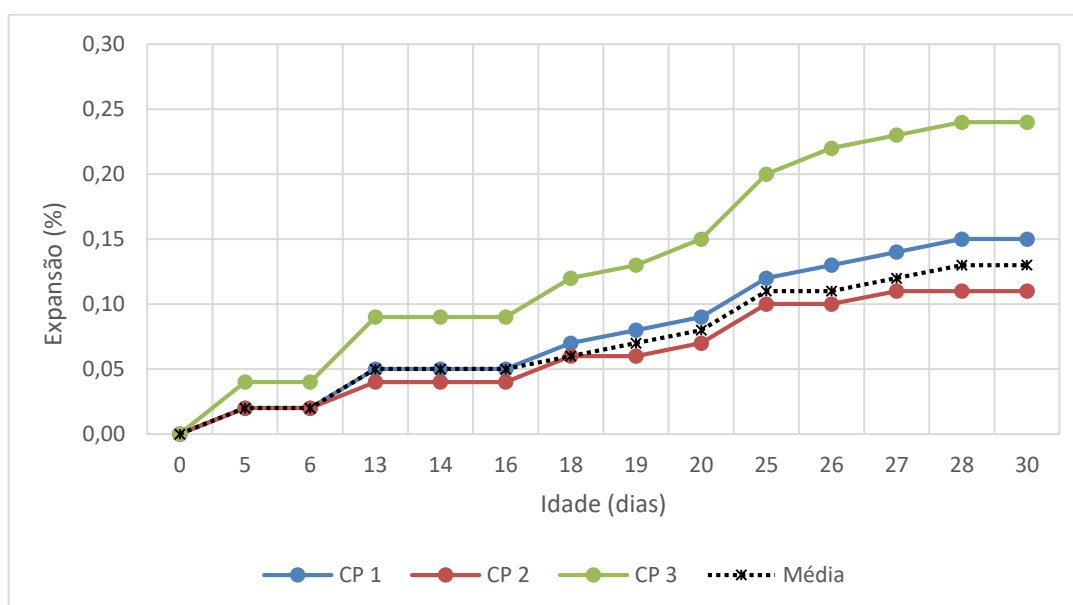
O comprimento efetivo de medida é a distância entre as extremidades internas dos pinos de medida inseridos nas extremidades das barras durante a moldagem, sendo inicialmente igual a  $250 \pm 2,5$  mm.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DEREACÇÃO ÁLCALI-AGREGADO SÍLICA EM AGREGADO MIÚDO

Ao realizar o ensaio, observou-se que o agregado miúdo da jazida de Pernambuco apresentou uma expansão máxima média de aproximadamente 0,13% no trigésimo dia após ser imersa em uma solução alcalina de hidróxido de sódio, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10: Expansão das barras de argamassa durante o ensaio acelerado para avaliação da reação álcali-sílica (RAS) no agregado miúdo.



Fonte: Próprio autor.

Foi observado na Figura 10 que o corpo de prova 3 apresentou uma expansão maior quando comparado aos corpos de prova 1 e 2. Tal situação pode ter sido motivada pela falta de uniformidade na distribuição dos agregados reativos nos corpos de prova ou por erro na leitura da barra de referência. Para situações como essa, onde a expansão máxima aos 30 dias das barras de argamassa é maior que 0,10%, a NBR 15577:2018 estabelece que o desvio relativo máximo (DRM) deve ser de até 20% da média das três barras do ensaio. Quando o desvio relativo máximo for superior a 20% a referida norma indica que uma nova média deve ser calculada desconsiderando o valor discrepante. Como os resultados apresentados pelo corpo de prova 3 foram discrepantes em relação aos corpos de prova 1 e 2 desconsiderou-se o resultado obtido para o CP 3 e realizou-se o cálculo da expansão média máxima baseado nas

expansões apresentadas pelos CP 1 e CP2. A Tabela 2 apresenta esses resultados para as principais idades de leitura estabelecida pela NBR 15577:2018.

Tabela 2: Expansão das barras de argamassa moldadas com agregado miúdo durante o ensaio acelerado nas principais idades conforme ABNT NBR 15577-4:2018.

Idade (dias)	Expansão (%)				
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	DRM
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,05	0,04	0,09	0,05	0,20
30	0,15	0,11	0,24	0,13	0,15

Fonte: Próprio autor.

Diante dos resultados obtidos e fazendo correlações com o estabelecido pela ABNT NBR 15577-1:2018, no que se refere a expansão das barras de argamassa, pode-se considerar que o agregado se enquadra no grau R0 (Ver Quadro 1), visto que apresentou expansão máxima média aos 30 dias inferior à 0,19%. Com essa classificação o agregado é considerado como potencialmente inócuo, não oferecendo nenhum risco ao concreto no que se refere a ocorrência da reação álcali agregado. Portanto, este agregado é adequado para o uso no concreto.

#### 4.2 ANÁLISE DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM AGREGADO GRAÚDO

Diante da ausência de amostras de agregados que foram utilizados na concretagem de fundações do tipo estaca moldada *in loco*, foi feita uma adaptação da NBR 15577-1:2018, obtendo-se os agregados a partir das extrações de testemunhos utilizando uma coroa diamantada com 75mm de diâmetro. Para a realização do ensaio foram necessários 6 (seis) corpos de prova de, aproximadamente, 40cm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Extração realizada em uma estaca de concreto moldada in loco.

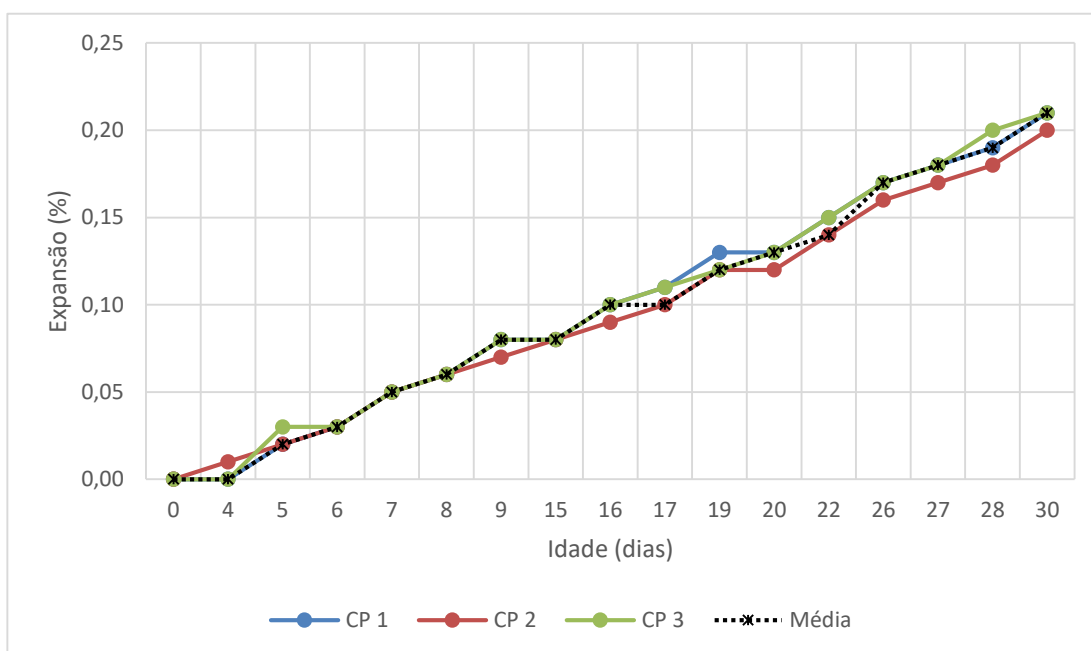


Fonte: Próprio autor.

Diante da impossibilidade da retirada do agregado miúdo dos testemunhos para análise do seu potencial de reatividade, foi possível fazer o estudo apenas da reatividade do agregado graúdo, entretanto o recomendado pela ABNT NBR 15577-1:2018 é que todos os componentes do concreto sejam analisados antes da sua utilização.

O agregado graúdo avaliado apresentou expansão máxima média aos 30 dias de 0,21%, como pode ser visto na Figura 12 e na Tabela 3.

Figura 12: Expansão das barras durante o ensaio acelerado para avaliação da reação álcali-silica (RAS) no agregado graúdo.



Fonte: Próprio autor.



Tabela 3: Expansão das barras moldadas com agregado graúdo durante o ensaio acelerado nas principais idades, conforme ABNT NBR 15577-4:2018.

Idade (dias)	Expansão (%)				
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	DRM
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10
30	0,21	0,20	0,21	0,21	0,05

Fonte: Próprio autor.

Comparando o resultado obtido com os graus de reatividade estabelecidos pela NBR 15577-1:2018, pode-se considerar que o agregado graúdo em estudo se enquadra no grau R1, pois a expansão média aos 30 dias das barras de argamassa foi maior que 0,19% e inferior a 0,40%, sendo assim considerado como potencialmente reativo. É válido destacar que neste caso todos os corpos de prova apresentaram DRM dentro dos limites permitidos. Além disso, foi possível analisar que as barras moldadas apresentaram fissuração (Figura 13) com o passar do tempo. Essa fissuração apresentou um aspecto mapeado, o que é sugestivo da ocorrência da RAS, visto que a formação de um gel em volta do agregado gera tensões de tração no corpo de prova.

Figura 13: Barras moldadas com agregado graúdo fissuradas.



Fonte: Próprio autor.

No que diz respeito à aplicação do método acelerado no diagnóstico da reatividade dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto endurecido, foram identificadas algumas limitações. Nesse ensaio não é possível avaliar o potencial de reatividade do agregado miúdo, devido a impossibilidade da separação desse agregado dos outros componentes do concreto. Outro fator relevante está relacionado ao grau de reatividade do agregado graúdo. Ao realizar o ensaio com os agregados extraídos de corpos de prova, não é possível mensurar se o potencial reativo encontrado é o mesmo, caso o agregado tivesse sido ensaiado antes da sua utilização no concreto. Como a estrutura possui aproximadamente cinco anos que foi executada, parte dos minerais reativos presentes no agregado podem ter sido consumidos na reação durante esse período.

Assim, mesmo diante dessas limitações citadas, entende-se que este método pode ser uma estratégia de avaliação para casos em que o agregado graúdo, contrariamente ao que indica a NBR 15577-1:2018, não foi previamente ensaiado quanto à reatividade álcali-sílica.

### 4.3 AÇÕES PROFILÁTICAS PARA MITIGAR A RAA

A NBR 6118:2014 recomenda que o projetista deve identificar no projeto o tipo de elemento estrutural e sua situação quanto à presença de água, e a partir disso fazer recomendações sobre as medidas preventivas, quando necessárias baseada nos critérios da NBR 15577-1.

A NBR 12655:2022, a qual estabelece os requisitos de preparo, controle, recebimento e aceitação de concreto de cimento Portland, recomenda que todos os agregados devem cumprir os requisitos da ABNT NBR 7211 e esta, por sua vez, especifica as exigências para recepção e aceitação dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção do concreto de cimento Portland. Essa norma, também, especifica que devem ser obedecidos os requisitos da norma ABNT NBR 15577-1 para a aceitação ou não dos agregados quanto à reatividade com álcalis. Esta última estabelece os seguintes ensaios a serem realizados com os agregados antes da sua utilização no concreto: Análise petrográfica do agregado graúdo e caracterização mineralógica dos agregados miúdos; Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado; e Determinação da expansão em prisma de concreto pelo método de longa duração.

Identificado o grau de reatividade do agregado é possível decidir sobre a sua utilização no concreto, podendo ser combinado com material inibidor. A ABNT NBR 15577-1:2018 especifica os cimentos CP II E, CP II Z, CP III e CP IV como possíveis materiais inibidores da reação, pois são cimentos compostos com adições de escória e pozolanas, e desta forma podem ser suficientes para mitigar a reação a depender do grau de reatividade do agregado. Outros materiais como a sílica ativa, metacaulim, e pozolanas, também, são recomendados pela norma, devendo ser ensaiados em combinação com o agregado reativo para a verificação da eficácia na mitigação da reação.

Diante do exposto, verifica-se a importância da realização dos ensaios prévios dos agregados como uma forma de evitar a ocorrência de manifestações patológicas ocasionadas por essa problemática nas estruturas de concreto. Vale ressaltar que a carência de laboratórios especializados para realização desses ensaios, também, é uma problemática, principalmente nas cidades do interior dos estados, e por esse

motivo essa etapa tão importante para garantir a qualidade do concreto em muitos casos acaba sendo negligenciada.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises feitas e os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que:

- O agregado miúdo proveniente da jazida de Pernambuco apresentou potencial de reatividade R0 e conforme os critérios estabelecidos pela NBR 15577-1 pode ser utilizado na composição do concreto;

- O agregado graúdo que foi obtido por meio das extrações de testemunhos de uma obra do interior da Bahia foi considerado como potencialmente reativo de grau R1. Como se trata de uma estrutura existente, a ocorrência dessa reação pode causar danos a estrutura, influenciando na durabilidade dessas peças estruturais ao longo dos anos. Desta forma esse agregado só poderia ser usado no concreto com a adoção de medidas mitigadoras;

- Agregados quando ensaiados de forma prévia, como indicam a NBR 15577-1:2018, possibilitam a identificação do potencial de reatividade e, a partir de então, podem ser feitas intervenções que evitem a ocorrência de manifestações patológicas provocadas pela RAS nas estruturas de concreto em idades futuras;

- As características do agregado graúdo estudado proveniente da estrutura existente possibilitam a sua reutilização, apesar do ensaio não garantir se o grau de reatividade encontrado é o mesmo que o agregado teria antes que houvesse sido utilizado. Mesmo com estas limitações, acredita-se que os resultados obtidos na expansão, apontam para uma irregularidade no potencial de reatividade do agregado. Sendo assim, o método se mostrou eficaz, fornecendo parâmetros importantes para tomada de decisão assertiva. As principais normas brasileiras de concreto recomendam a realização dos ensaios para identificação da ocorrência da reação álcali-agregado antes da utilização do agregado, para que medidas inibidoras sejam adotadas de maneira preventiva;

- Diante das consequências que a reação álcali-sílica gera nas estruturas de concreto, é importante destacar que as empresas que comercializam traços de concreto sem obedecer às exigências normativas de caracterização de agregados estão cometendo uma grande irregularidade, uma vez que tal negligência pode comprometer todo desempenho e vida útil de uma estrutura.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A) Estudar o potencial de reatividade dos agregados graúdos provenientes de extrações de testemunho pelo método acelerado de barras de argamassa e comparar com o potencial reativo obtido utilizando esse mesmo método só que com a utilização de testemunhos íntegros;
- B) Realizar um mapeamento das principais jazidas do Recôncavo baiano que fornecem agregados na região, para identificar quantas fazem ensaios para avaliar a reatividade álcali-agregado destes materiais comercializados.

## REFERÊNCIAS

ALBERTINI, P.G.O. **Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas para controle da Reação Álcali-Agregado**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia – UNESP, Ilha Solteira, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **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, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-5: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação** Rio de Janeiro, 2009.

BARBOSA, F. R.; PIRES SOBRINHO, C. W. A. Reação álcali-agregado: caracterização e estudos da influência no maciço de uma barragem de concreto gravidade. **SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURA DE CONCRETO**. Anais. Goiânia: Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas, p. 323-328, 1997.

BARRETO, A. M. **Técnicas não destrutivas para detecção da reação álcaliagregado em prismas de concreto**. 2019. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

CUNHA, M. et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. Elsevier Brasil, 2013.

DA SILVA, C. S. *et al.* Procedimentos de recuperações em elementos de fundações por problemas de reação álcali agregado. Investigação documental. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 124–145-124–145, 2021.

GOMES, E. A. de O. **Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado: a experiência do Recife**. 2008. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela Reação Álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HELENE, P.; CARVALHO, M.; PACHECO, J. Engineering field tests for alkali-aggregate reaction. **Structural Concrete**, v. 18, n. 2, p. 349-355, 2017.

HELENE, P.; MONTEIRO, E.; ANDRADE, T. RAA em estrutura de concreto armado de uma edificação residencial. **Revista IBRACON Concreto & Construções, Ano XLIV**, n. 83, p. 89-94, Jul-Set, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais** – Tradução para português da 3ª edição em inglês. São Paulo: IBRACON, 2008.

MIZUMOTO, C. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. 2009. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia - Unesp, Ilha Solteira, 2009.

OTOCH, S. Reação álcali-agregado: o que é e como evitar? **Revista Ibracon Concreto & Construções**, Ano XLIV, n. 83, p. 27-29, Jul-Set. 2016.

RODRIGUES, E. C. **Análise numérica do efeito de fatores influentes da reação álcali-agregado no desempenho de estruturas de concreto**. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Tools for assessing damage in concrete affected by AAR coming from fine and coarse aggregates. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, p. 84-91, 2017.



SANTOS, B. S. **Influência dos finos de rocha granítica na reação álcali-sílica em matrizes cimentícias**. 2020. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

SANTOS, B. S.; RIBEIRO, D. V. Influence of granitic rock fines addition in the alkali-aggregate reaction (AAR) in cementitious materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, 2021.

SILVA, D. J. F. *et al.* Efeitos do  $LiNO_3$  na reação álcali-sílica e comparação com os efeitos da cinza volante na reação. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, p. 310-321, 2010.

SOUZA, L.; ZOLETT, E. R.; CARRAZEDO, R. Study of effect of electric arc furnace slag on expansion of mortars subjected to alkali-aggregate reaction. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, p. 572-578, 2016.