

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ALEXANDER IAN FERREIRA DUTRA

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: INVESTIGAÇÃO DO
COMPORTAMENTO DE AGREGADOS DA REGIÃO SUDOESTE DO
RIO GRANDE DO SUL FRENTE A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES
TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND**

**Alegrete
2018**

ALEXANDER IAN FERREIRA DUTRA

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: INVESTIGAÇÃO DO
COMPORTAMENTO DE AGREGADOS DA REGIÃO SUDOESTE DO
RIO GRANDE DO SUL FRENTE A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES
TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Simone Dornelles Venquiaruto

Coorientador: Aldo Leonel Temp

**Alegrete
2018**

ALEXANDER IAN FERREIRA DUTRA

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: INVESTIGAÇÃO DO
COMPORTAMENTO DE AGREGADOS DA REGIÃO SUDOESTE DO
RIO GRANDE DO SUL FRENTE A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES
TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Me. Aldo Leonel Temp
Coorientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Ederli Marangon
(UNIPAMPA)

Profa. Me. Fernanda B. P. da Costa
(UNIPAMPA)

“A persistência é o caminho do êxito”.
Charles Chaplin.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus pela proteção ao longo desta jornada.

Aos meus pais Anderson e Adriana, pelo amor e carinho incondicional, pelo exemplo de como ser uma pessoa melhor para com os outros e pela oportunidade de estudar e realizar o meu sonho.

Ao meu irmão Thiago, pelo esforço, ajuda, acompanhamento na vida acadêmica mesmo que por pouco tempo e auxílio no desenvolvimento desta pesquisa.

A minha namorada Taciana, pelo amor, companheirismo, carinho e incentivo, sempre tentando estar ao meu lado ajudando-me, obrigado por me ensinar a gostar deste mundo da pesquisa e dos congressos.

À minha família, que com certeza foi a base para que eu pudesse estar aqui hoje, com a educação e confiança que sempre tive em toda minha vida.

Agradeço também a todos os meus amigos que perto ou longe sempre me ajudaram e que estão contentes com minha realização.

Aos meus orientadores, professora Dr. Simone Dornelles Venquiaruto e Professor Me. Aldo Leonel Temp, pela dedicação, auxílio, orientações e amizade neste período de faculdade, por acreditar no meu potencial, auxiliando e me fazendo seguir em frente, pelas orientações de última hora e pelas leituras nos feriados e fins de semana.

Ao engenheiro Me. Marcelo de Oliveira por toda a ajuda nos ensaios, orientações e dicas ao longo de minha vida acadêmica.

Aos meus amigos, Jacson, Plácido, pelo companheirismo, e ajuda nas etapas da pesquisa, quebrando aquele galho de última hora quando algo, não dava certo.

Agradeço também todos os professores que me auxiliaram nesta longa jornada, que me ensinaram não apenas a ser um engenheiro, mas principalmente a ser um melhor profissional.

RESUMO

A reação Álcali-Agregado (RAA) é uma reação química entre os álcalis do cimento Portland e determinados minerais (potencialmente reativos) presentes nos agregados. Na presença de água ou umidade, o resultado desta combinação é um gel com características expansivas, que preenche os poros do concreto gerando um aumento de esforços internos, resultando em fissuração do concreto e conseqüentemente perda das suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Esta pesquisa avaliou a reatividade de nove agregados (três areias naturais e seis rochas) utilizados em escala comercial na região Sudoeste do Rio Grande do Sul, frente a utilização de diferentes tipos de cimentos Portland (CPII-Z, CPIV e CPV ARI). Foi utilizado o método acelerado em barras de argamassa, com os ensaios atendendo as prescrições normativas vigentes no Brasil. Os resultados mostraram que para mistura dos agregados com o cimento CP V ARI, apenas os agregados, de referência e a brita calcária da cidade de Bagé foram caracterizadas como potencialmente inócuas, já para a mistura com o cimento CP II-Z, as amostras dos agregados das cidades de Alegrete, Quaraí e Uruguaiana foram caracterizadas como potencialmente reativas, os outros agregados combinados com o mesmo cimento foram caracterizados como potencialmente inócuos, devido a estarem dentro dos limites normativos. Por fim a mistura dos agregados com o cimento CP IV, mostra que todas as amostras foram caracterizadas como potencialmente inócuas. Conclui-se que o tipo de cimento Portland escolhido pode influenciar significativamente na reatividade dos agregados selecionados, mitigando parcialmente ou totalmente a RAA

Palavras-chave: Agregados, Reação Álcali-Agregado, Degradação das estruturas, Reatividade dos Agregados, Cimento Portland, Durabilidade do Concreto.

ABSTRACT

The Alkali-Aggregate reaction (AAR) is a chemical reaction between Portland cement alkalis and certain (reactive) minerals present in the aggregates. When there is presence of water or moisture, the result of this combination is a gel with expansive characteristics, which fills the pores of the concrete generating an increase of internal tensions, resulting in cracking of the concrete and consequently loss of its mechanical properties and durability. This research evaluated the reactivity of three aggregates (three natural sand and six rocks) used in a commercial scale in the South-West region of Rio Grande do Sul, in comparison with the use of different types of Portland cement (CPII-Z, CPIV and CPV ARI). The results showed that for aggregate mixing with the CP V ARI cement, only the aggregates, reference and the limestone of the city of Bagé were characterized as potentially innocuous, for the mixture with the CP II-Z cement, the samples of the aggregates of the cities of Alegrete, Quaraí and Uruguaiana were characterized as potentially reactive, the other aggregates combined with the same cement were characterized as potentially innocuous, due to being within the normative limits. Finally the mixture of the aggregates with the CP IV cement, shows that all the samples were characterized as potentially innocuous. It is concluded that the type of Portland cement chosen can significantly influence the reactivity of the selected aggregates, partially or totally mitigating the AAR.

Keywords: Aggregate, Alkali-Aggregate Reaction, Construction Degradation, Aggregate Reactivity, Portland Cement, Concrete Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - RAA: Reação álcali-agregado.....	14
Figura 2 - Esquema do processo da RAA.....	16
Figura 3 - Topo de bloco de fundação com fissuras devido a RAA.....	19
Figura 4 - Representação da ocorrência da RAS e seus produtos.	21
Figura 5 - Localização das coletas das amostras da região Oeste do RS	35
Figura 6 - Localização das coletas das amostras da região Sul do RS.....	35
Figura 7- Fotos das areias naturais utilizadas no estudo	36
Figura 8 - Fotos das areias de brita utilizadas no estudo	36
Figura 9 – Fluxograma do programa experimental.....	37
Figura 10: Amostra preparada dos agregados dos ensaios.....	38
Figura 11: Preparação da argamassa com os agregados estudados.	38
Figura 12: Moldagem das barras para o ensaio acelerado.	39
Figura 13: Exemplo de leitura das barras do ensaio.	40
Figura 14: Expansão das barras de argamassa em função do tempo para combinação dos agregados com o cimento Portland CP V ARI.....	41
Figura 15: Microfissuras observadas nas barras confeccionadas com a combinação do agregado “G” com o cimento Portland CP V ARI”.	43
Figura 16: Microfissuras observadas nas barras confeccionadas com a combinação do agregado “I” com o cimento Portland CP V ARI”.	43
Figura 17: Expansão das barras de argamassa em função do tempo para combinação dos agregados com o cimento Portland CP II-Z.....	44
Figura 18: Aparência da barra confeccionada com a combinação do agregado “G” com o cimento Portland CP V II-Z.....	44
Figura 19: Expansão das barras de argamassa em função do tempo para combinação dos agregados com o cimento Portland CP IV.....	46
Figura 20: Aparência da barra confeccionada com a combinação do agregado “G” com o cimento Portland CP V IV.....	46
Figura 21: MEV em amostras confeccionadas com agregado “B”	48
Figura 22: MEV em amostras confeccionadas com agregado “C”	49
Figura 23: MEV em amostras confeccionadas com agregado “D”	49
Figura 24: MEV em amostras confeccionadas com agregado “F”.....	49
Figura 25: MEV em amostras confeccionadas com agregado “G”	50

Figura 26: MEV em amostras confeccionadas com agregado “H”	50
Figura 27: MEV em amostras confeccionadas com agregado “I”	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ocorrências de casos de RAA, em estruturas hidráulicas no mundo.....	18
Tabela 2 - Representação dos minerais e rochas suscetíveis a ocorrência da RAA	26
Tabela 3 - Representação dos minerais e rochas suscetíveis a ocorrência da RAA	26
Tabela 4- Representação de cimentos e suas respectivas composições	28
Tabela 5 - Propriedades físicas dos cimentos Portland	33
Tabela 6 - Propriedades químicas dos cimentos Portland	34
Tabela 7- Identificação e procedência dos agregados	34
Tabela 8: Expansões médias e classificação da potencialidade reativa das combinações agregado CP V ARI.....	42
Tabela 9: Expansões médias e classificação da potencialidade reativa das combinações agregado CP II-Z.....	45
Tabela 10: Expansões médias e classificação da potencialidade reativa das combinações agregado CP IV.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

MEV – Microscópio eletrônica de varredura

RAA – Reação Álcali-Agregado

RAS – Reação Álcali-Sílica

RS – Rio Grande do Sul

FIHP – Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
1.2 Justificativa.....	12
1.3 Estrutura do trabalho	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	14
2.1.1 Mecanismo de expansão da reação álcali-agregado	15
2.2 Histórico dos acontecimentos relacionados a reação álcali-agregado.....	16
2.2.1 Reação álcali-agregado no brasil	18
2.3 Tipos de reação álcali-agregado.....	19
2.3.1 Reação álcali-sílica	19
2.4 Principais fatores intervenientes da reação álcali-agregado	23
2.4.1 Alcalinidade do concreto.....	24
2.4.2 Agregados.....	25
2.4.3 Temperatura.....	26
2.4.4 Umidade	27
2.5 Tipos de cimento existentes no brasil e suas composições.....	27
2.5.1 CP I – cimento Portland comum	28
2.5.2 CP II , E, F ou Z cimento Portland composto	28
2.5.3 CP III – cimento Portland de alto forno.....	29
2.5.4 CP IV – cimento Portland pozolânico	29
2.5.5 CP V ARI – cimento Portland de alta resistência inicial.....	29
2.6 Principais adições presentes nos tipos cimento existentes no brasil	29
2.6.1 Cinza volante	30

2.6.2 Escória de alto forno.....	31
2.6.3 Fíler calcário	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Materiais.....	33
3.1.1 Cimento	33
3.1.2 Agregados.....	34
3.2 Programa experimental.....	37
3.2.1 Métodos de ensaio	37
3.2.1.1 Produção das argamassas	37
3.2.1.2 Avaliação da potencialidade reativa das barras de argamassa	39
3.2.1.3 Análise de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários (MEV)	40
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4.1 Ensaio acelerado em barras de argamassa - (NBR 15577/2018).....	41
4.2 Análise de microscopia eletrônica de varredura – MEV	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5.1 Sugestões de futuras pesquisas.	53
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXOS.....	58

1 INTRODUÇÃO

O consumo de cimento Portland, segundo a ABCP (2013), é parte integrante de praticamente todas as construções, de edificações residenciais a grandes obras de infraestrutura, como rodovias que cortam o país. Fatores macroeconômicos e incentivos fiscais possibilitaram o crescimento da construção civil nos últimos anos, resultando em um acréscimo de 80% no consumo nacional de cimento Portland.

O salto geral da construção civil, principalmente em obras de infraestrutura e habitação, foi o grande responsável pelo aumento da demanda do setor de concreto (ABCP, 2013). Segundo Pedroso (2009), estimou-se que no ano de 2009, foram consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que resultou, segundo a FIHP, aproximadamente, um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água.

Inúmeras características conferem ao concreto o título de material de construção mais usado na Engenharia, desde a facilidade com que os elementos podem ser executados, a variedade de formas e tamanhos, seu baixo custo e maior disponibilidade no canteiro, comparativamente a outros materiais. O concreto é tão indubitavelmente versátil, que há muito tempo vem sendo chamado de "material universal" (VALDUGA, 2002).

Um dos fatores que torna o concreto um elemento mais atrativo é que, “em termos de sustentabilidade, o concreto armado consome muito menos energia do que o alumínio, o aço, o vidro, também emite proporcionalmente menos gases e partículas poluentes”, ressalta Arnaldo Forti Battagin, chefe dos laboratórios da ABCP (PEDROSO, 2009).

Segundo Tiecher (2006), o concreto por ser um material usado em escala mundial está sujeito a alterações ao longo do tempo, que dependem de seus materiais constituintes e da agressividade do ambiente em que se encontra inserido. Desta interação da estrutura de concreto com o meio, podem acontecer manifestações patológicas, que põem em risco a durabilidade da referida estrutura, e conseqüentemente na sua vida útil.

É essencial que cada estrutura de concreto continue a desempenhar suas previstas, ou seja, mantenha sua resistência necessária e sua condição de utilização durante um tempo especificado ou uma vida útil tradicionalmente especificada (NEVILLE, 2016).

Neville (2016) descreve que a perda de durabilidade do concreto se manifesta pela sua deterioração, que pode acontecer tanto de fatores externos quanto internos, sendo essas reações de origem física, química ou mecânica. Segundo o autor, danos mecânicos são os resultantes de impactos, erosão, abrasão entre outros, Já as causas químicas são relacionadas a reações cimento/agregado, como as reações Álcali-Sílica e Álcali-Carbonato, e relacionadas a ataques químicos externos em meios agressivos, como cloretos e sulfatos. Estas ações deletérias podem ser diretas ou indiretas. As causas físicas são os efeitos das altas temperaturas, e os diferentes coeficientes de dilatação térmica dos agregados e da pasta de cimento endurecida. É importante ressaltar que os processos de deterioração química e física podem acontecer em conjunto.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), mesmo que seja corretamente dosado, lançado e curado, o concreto pode estar sujeito à deterioração prematura das estruturas em algumas situações. Boa parte dessas deteriorações, segundo os autores, podem estar relacionadas a fatores físicos como o desgaste superficial, e a fatores químicos, como as reações expansivas provenientes da Reação Álcali-Agregado (RAA).

Neville (2016) descreve que a RAA tem início com o ataque aos materiais silicosos dos agregados pelos hidróxidos alcalinos da água dos poros, derivados dos álcalis presentes no cimento. Como resultado, formam-se em locais distintos das estruturas, um gel com características de “expansão infinita”, devido a absorver água com tendência ao acréscimo de volume. No entanto, para que este processo inicie, são necessárias que três condições sejam simultaneamente contempladas: agregados reativos, umidade relativa superior a 80% - 85% e concentração de álcalis acima do limite crítico (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

A reação álcali-agregado pode provocar, em maior ou menor prazo (após vários anos) diversos efeitos patológicos nas estruturas: fissuração, expansão, exsudação e queda de desempenho mecânico (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

A incidência destas manifestações patológicas não vem da atualidade, mas sim de séculos passados. Desde os anos 30 do século passado, registram-se anomalias em estruturas de concreto construídas no estado da Califórnia, nos Estados Unidos. Deve-se a Gitahy (1963) e Ruiz (1963) os primeiros registros brasileiros sobre o tema “reação expansiva álcali-agregado em concretos”, os mesmos encontrados nos estudos preliminares para a construção da barragem de Jupia. (PRISZKULNIK, 2005).

Os danos causados a estrutura pela RAA são irreversíveis, se não forem detectadas inicialmente. Segundo Tiecher (2006), é muito complicado parar esta reação depois que ela se desencadeia pela estrutura. De acordo com a autora, a minimização da reação de expansão (RAA) no interior das estruturas pode ser obtida com a escolha de agregados não-reativos, a utilização de cimento Portland com baixo teor de álcalis e ou cimentos com adições pozolânicas. Em função do exposto, torna-se necessário utilizar abordagens preventivas, principalmente para se evitar a presença simultânea das três condições necessárias para o início da reação RAA, conforme já mencionado por Ollivier e Vichot (2014).

A partir da importância do uso do concreto para obras de engenharia, e da inviabilidade e/ou custo elevado para a sua recuperação em caso de perda de durabilidade por RAA, torna-se relevante a elaboração de um projeto voltado para o estudo de agregados comerciais provenientes da região sudoeste do Rio grande do Sul. Diante o exposto, foram definidos os objetivos geral e específicos dessa pesquisa, os quais são apresentados nos próximos itens.

1.1 Objetivos

Os objetivos que norteiam essa pesquisa são apresentados nos itens 1.1.1 e 1.1.2, respectivamente.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a potencialidade reativa (RAA) de agregados graúdos britados (rochas) e agregados miúdos (areias), comercializados na região Sudoeste do Rio Grande do Sul, frente a utilização de diferentes tipos de cimento Portland.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o grau de reatividade dos minerais presentes nos agregados;
- Avaliar a influência do tipo de agregado no desencadeamento da reação álcali-agregado;
- Avaliar a influência do tipo de cimento no desencadeamento da reação álcali-agregado;
- Realizar ensaios de Microscopia eletrônica de varredura (MEV), para verificar a incidência do gel silico-álcalino intrínseco nos poros da matriz.

1.2 Justificativa

Battagin et al (2016) informa que no Brasil, o meio técnico brasileiro tomou conhecimento da incidência da reação patológica de RAA em 1985, nas barragens de Moxotó e Joanes II, localizadas na região Nordeste. Segundo o autor, as duas barragens reuniam condições favoráveis para o desencadeamento da reação RAA, principalmente pela falta de desconhecimento da natureza do agregado utilizado para a produção dos concretos. Posteriormente, Solleiro et al. (2016) relatam que no ano de 1990 foi diagnosticada a ocorrência de reações expansivas no concreto da barragem de Pirapora/SP. Segundo os autores, na época, este acontecimento foi amplamente divulgado no meio técnico.

De acordo com Otoch (2016), a ocorrência da expansão por RAA, até anos atrás, era de principal incidência em obras de grande porte, como barragens e partes de usinas hidrelétricas. Mais recentemente, no fim do ano de 2014 e ao longo de todo o ano de 2015 foram constatados vários casos de RAA na região de Recife/PE, principalmente em blocos e sapatas de fundações de edifícios com idades de 3 a 20 anos de construção. Pouco tempo depois em Fortaleza/CE, também surgiram os primeiros casos de RAA em blocos de fundações em algumas edificações, conforme já mencionado por Otoch (2016).

Atualmente, com o avanço das investigações, da busca por conhecimento e de pesquisas na área, afirmam que as ocorrências destas reações tendem a incidir em diversos tipos de estruturas de concreto, que possam estar nas condições favoráveis para a sua manifestação. Como no Brasil, a maior parte das estruturas é executada em concreto armado, torna-se necessária a verificação da potencialidade reativa dos

agregados para evitar a ocorrência das reações RAA e a degradação precoce de estruturas de concreto.

Diante do exposto, um melhor entendimento do problema (RAA), sob o ponto de vista da utilização comercial dos agregados da região Sudoeste, justifica a relevância dessa pesquisa.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho será organizado ao longo de cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, os objetivos (principal e específicos) e a justificativa da pesquisa. A fundamentação teórica em que o trabalho está embasado será apresentada no capítulo 2. O terceiro capítulo mostrará a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho. Os resultados e as discussões serão apresentados no capítulo quatro. Por fim, considerações finais e as sugestões para estudos futuros serão mostradas no capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

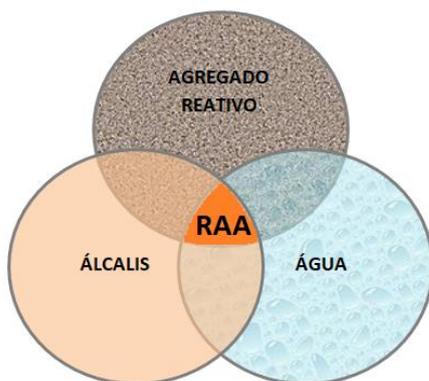
Os itens 2.1 a 2.6 apresentam uma breve revisão bibliográfica sobre o tema dessa pesquisa.

2.1 Reação Álcali-Agregado

A reação álcali agregado (RAA) conforme Prizskulnik (2005), é um processo químico em que alguns constituintes minerais do agregado reagem com hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, materiais pozolânicos, agentes externos, etc.) que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Como produto desta reação, forma-se um gel higroscópico expansivo. A manifestação da reação álcali-agregado pode se dar de várias formas, desde expansões, movimentações diferenciais na estrutura e fissurações até pipocamentos, exsudação de gel e redução das resistências à tração e compressão.

A reação álcali-agregado foi estudada inicialmente por Stanton, em 1940, na Califórnia. O autor identificou este processo como sendo uma reação deletéria que ocorria entre os constituintes do concreto, a sílica do agregado e os álcalis do cimento, o qual denominou reação álcali-agregado. Segundo Stanton (1940, apud NOGUEIRA, 2010), em constatações experimentais, a reação era capaz de formar eflorescências brancas, causar expansão e fissurações. Tais fatos puderam ser observados em diversas estruturas reais afetadas no sul da Califórnia, durante os anos 1920 a 1930. A figura 1 apresenta um esquema indicando os principais fatores da incidência de RAA sobre estruturas.

Figura 1 - RAA: Reação álcali-agregado



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, p.186, 2008.

2.1.1 Mecanismo de expansão da reação álcali-agregado

De acordo com Tiecher (2006), a RAA envolve no processo íons alcalinos, em destaque o sódio (Na⁺) e o potássio (K⁺), provenientes de frações argilosas, provindos do cimento, íons hidroxilas (OH⁻) e alguns minerais componentes dos agregados. Para Valduga (2002), os íons alcalinos, são vindos principalmente do cimento, mas também podem ser da água de amassamento do concreto, de pozolanas e de possíveis agentes externos, como agentes agressivos presentes em solução aquosa.

Segundo Valduga (2002), para manter este equilíbrio os íons alcalinos se espalham sobre os íons de hidroxila, e a reação entre os mesmos resulta na produção de gel. Ainda segundo o autor, a RAA é uma reação espontânea. Os produtos desta reação são mais estáveis que os reagentes da mesma, este fato justifica a razão de que depois de iniciado o processo químico não há mais como pará-lo.

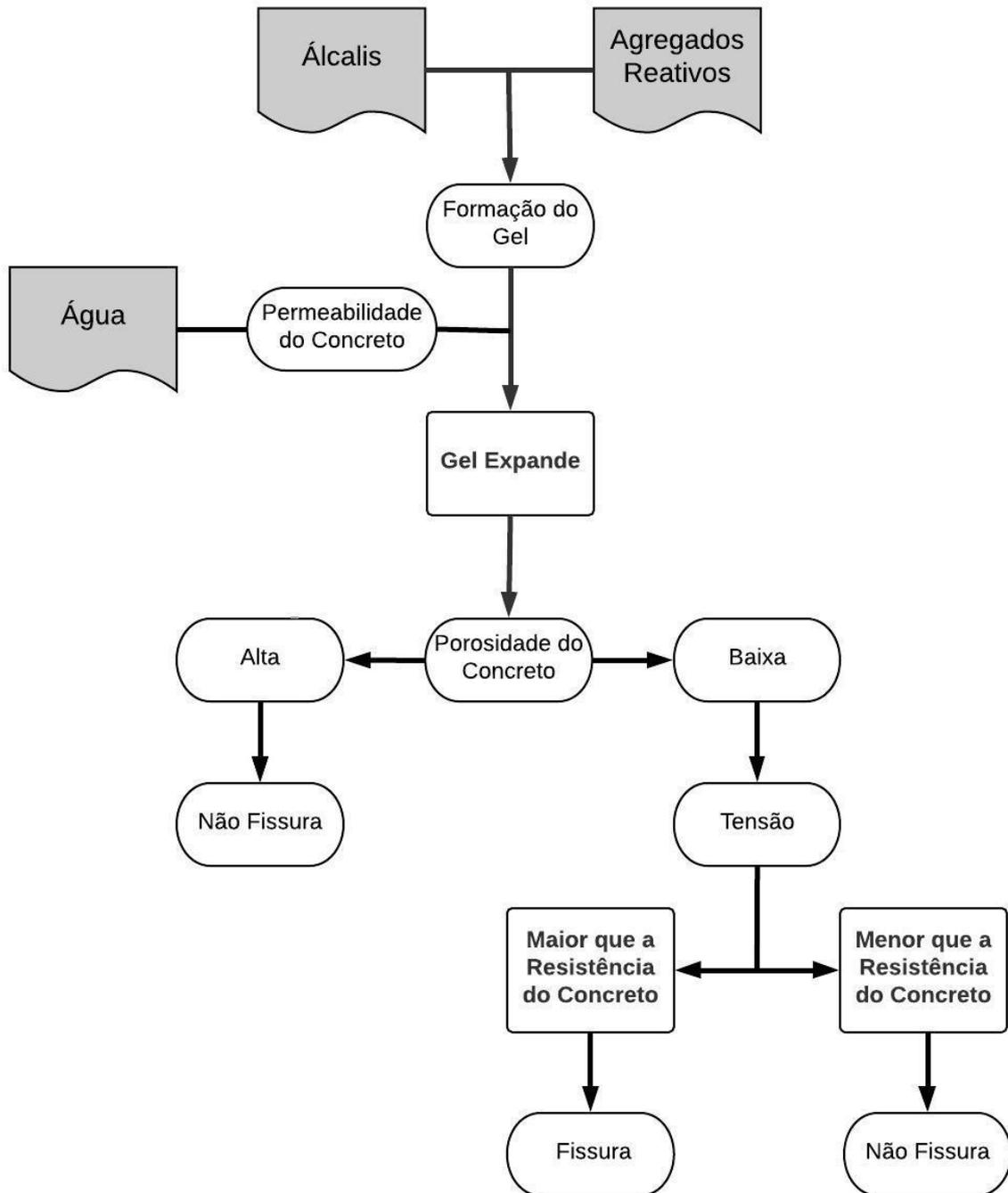
Segundo Neville (2016), este gel tem características de “expansão infinita”, por ser higroscópico, tendo assim tendência de atrair moléculas aquosas, com tendência a aumento de volume. Além disso devido ao gel estar confinado pela pasta de cimento hidratado, acarreta o surgimento de pressões internas, que tentem a microfissurar a matriz hidratada.

Farny e Kosmatka (1997, apud ARRAIS, 2011), simplificaram didaticamente o mecanismo da RAA em dois processos:

- 1° processo: álcalis + sílica reativa = produto reativo de gel
- 2° processo: produto reativo de gel + umidade = expansão

A figura 2 apresenta um breve resumo das etapas de incidência da reação desde os formadores do gel, até a fissuração da matriz cimentícia.

Figura 2 - Esquema do processo da RAA



Fonte: Adaptado de Valduga, 2002.

2.2 Histórico dos acontecimentos relacionados a reação álcali-agregado

Segundo Prizskulnik (2005), desde os anos 30 do século passado, foram constatadas patologias em estruturas de concreto armado construídas no estado da Califórnia, nos Estados Unidos. Segundo Metha e Monteiro (2008) as descrições

destas investigações foram publicadas pela primeira vez em 1940 por Stanton, a partir deste relato, vários outros relatos foram descritos em diferentes partes do mundo. Rodrigues (1994) afirma que a partir de 1940, quando Stanton (1940) publicou detalhadamente descrições sobre este fenômeno, vários artigos com elevada importância sobre esse tema vêm sendo escritos e publicados.

Gomes (2008) afirma que na década de 40, inicialmente os Estados Unidos, Nova Zelândia e Austrália apresentaram casos de RAA. Posteriormente, na sequência, vários outros países diagnosticaram como RAA casos de expansão e fissuração (em forma de malha/mapeamento) em várias obras de engenharia, principalmente em barragens.

Segundo Paulon (1981, apud NOGUEIRA, 2010), para explicar o mecanismo de expansão, a primeira teoria foi nomeada de pressão osmótica. Essa teoria foi elaborada por Hansen, em 1944, e nela, hipoteticamente, os produtos da reação ficavam confinados dentro de uma membrana semipermeável da pasta de cimento, a qual, devido a pressões hidráulicas, causava expansão na estrutura de concreto. Após os estudos de Vivian (1976), descobriu-se a teoria da adsorção, atribuída às tensões produzidas pelo crescimento do gel quando saturado. A expansão relativa leva em conta a concentração volumétrica do gel e a sua taxa de crescimento. Esta teoria, segundo Hasparyk (2005), por ter maior embasamento teórico e por se parecer mais com as manifestações da reação álcali-agregado no interior das estruturas, vem sendo mais aceita no meio técnico atualmente.

Sanchez (2008) enfatiza que, entre os anos de 1950 e 1960, o interesse pelo estudo da patologia de RAA foi ligeiramente esquecido, sendo apenas retomado em 1970, quando surgiram anomalias semelhantes em vários outros países. Deste então, até os dias atuais, o assunto tem sido tratado de maneira bem mais rigorosa.

Segundo Arrais (2011), após o conhecimento da ocorrência da RAA, vários autores passaram a estudar os mecanismos de expansão desta reação, dentre todos, podemos destacar Hansen (1944), Vivian (1976), Van Aardt e Visser (1977), Dent Glasser e Kataoka (1981), Chatterji et al (1989), Dron (1990), Wang e Gillott (1991) Poole (1992), Deng e Tang (1993), Prezzi et al (1997), entre outros.

As reações de RAA são mais propícias em obras hidráulicas. Tem-se o relato no meio técnico de mais de 140 casos de barragens afetadas pelo RAA, conforme mencionado por Rasparyk (2005). Arrais (2011) cita que várias estruturas no mundo

foram diagnosticadas desde a descoberta da RAA, podendo listar como exemplos as barragens de Val de La Maré (Reino Unido), de Sandouping (China), de La Tuque (Canadá), de Kouga (África do Sul), de Chambon (França), além de partes da via urbana de Joanesburgo (África do Sul) e da via expressa de Hanshin (Japão). A Tabela 1 apresenta os números da incidência de casos de RAA em barragens construídas até o ano de 1998, em diversos países segundo Kihara et al (1998).

Tabela 1 - Ocorrências de casos de RAA, em estruturas hidráulicas no mundo

País	Nº de casos	País	Nº de casos	País	Nº de casos
África do Sul	10	Estados Unidos	29	País de Gales	05
Argentina	01	França	05	Paquistão	02
Austrália	02	Gana	01	Portugal	04
Áustria	01	Índia	02	Quênia	01
Brasil	20	Inglaterra	01	Romênia	01
Canadá	41	Moçambique	01	Suíça	01
Costa do Marfim	01	Nigéria	01	Uganda	01
Espanha	03	Noruega	07	Zâmbia	01

Fonte: Adaptado de Kihara et al.,1998

2.2.1 Reação álcali-agregado no Brasil

Segundo Priszkulnik (2005), os primeiros registros brasileiros sobre o tema devem-se a Gitahy (1963) e Ruiz (1963) e referem-se à construção da barragem de Jupia, no rio Paraná entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Os autores, ao se depararem com estudos sobre a potencialidade dos materiais que seriam utilizados na construção da barragem, vislumbraram a possibilidade de utilização do cascalho como agregado para concreto. Após ensaios de caracterização do cascalho, os resultados apontaram um potencial reativo do agregado. Devido a conclusão da caracterização do cascalho apontar um certo potencial reativo, foram tomadas medidas preventivas, onde foi indicada a utilização de material Pozolânico para a utilização do cascalho como agregado para a dosagem dos concretos.

No cenário brasileiro, há algumas décadas, já existiam dezenas de estruturas que sofriam com a incidência da reação álcali-agregado, conforme mencionado por Priszkulnik (2005). Hasparyk (1999) afirma que a reação RAA afeta mais de 20 barragens no Brasil, entre elas a barragem de Apolônio Sales localizada na divisa entre Bahia e Alagoas, a barragem de Billings/Pedras situada no estado de São Paulo, a barragem de Furnas, situada em Minas Gerais e a barragem de Joanes, no estado da Bahia.

Segundo Arrais (2011), a partir da década de 90, estudos envolvendo, a reatividade potencial de agregados e a eficiência de cimentos e adições minerais para inibir RAA, foram desenvolvidos em algumas regiões do Brasil. Destacam-se os estudos de Hasparyk (1999), Valduga (2002), no estado de São Paulo, Tiecher (2006), na região Sul e os trabalhos de Souza (2007) e Andrade (2006) na região Nordeste.

Andrade (2006), através da sua pesquisa constatou a ocorrência de RAA em elementos de fundação de oito edifícios urbanos com idades variadas, fato que chamou atenção dos meios técnicos de todo mundo. A Figura 3, representa um bloco de fundação em quadro avançado de fissuração devido a RAA.

Figura 3 - Topo de bloco de fundação com fissuras devido a RAA



Fonte: Otoch, 2016

2.3 Tipos de reação Álcali-Agregado

Admite-se segundo Kihara (1993), que as reações álcali agregado manifestam-se sob três diferentes tipos: reação álcali-sílica (mais incidente), reação álcali-silicato, e a reação álcali-carbonato.

2.3.1 Reação álcali-sílica

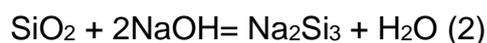
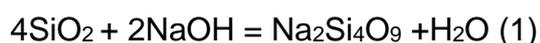
De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2008) a reação álcali-sílica é um tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis presentes no cimento. A junção da sílica reativa presente nos agregados e os álcalis presentes no cimento, combinados com hidróxido de cálcio originado da hidratação do cimento, tendem a reagir e formar o produto expansivo, também conhecido como gel expansivo. Constituem exemplos de sílica reativa: opala, tridimita,

cristobalita, vidro vulcânico, entre outros. Este é o tipo de reação álcali-agregado que mais rapidamente se desenvolve.

Segundo Kihara (1993), a reação álcali-silica é a reação álcali-agregado mais conhecida e relatada no meio técnico, sendo a que tem ocorrência mais rápida, devido as formas minerais da sílica reativa envolvida na reação.

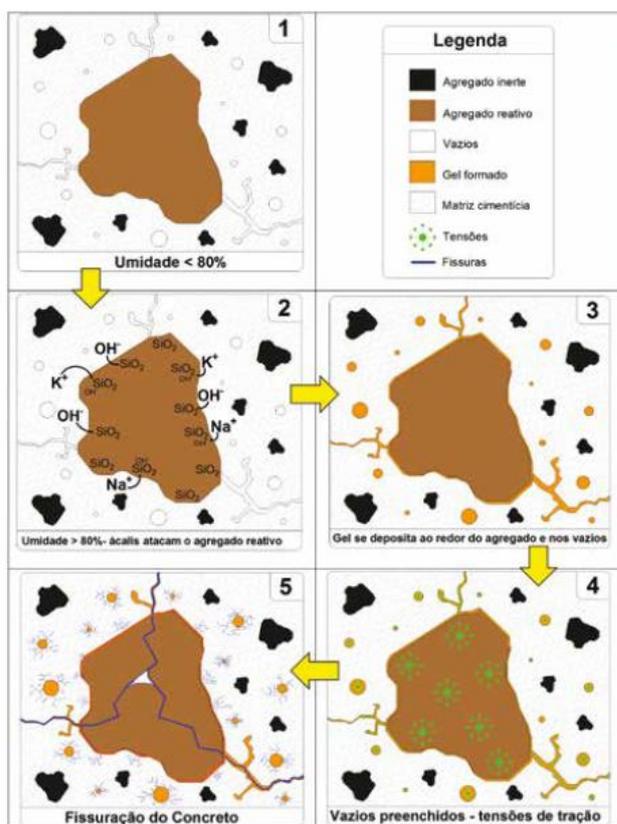
De acordo com Priszkulnik (2005), a estrutura da reação abrange várias etapas. Estas são os ataques ao agregado, a expansão do gel, a evolução da fase líquida intersticial e as difusões iônicas. O ataque aos agregados é resultado do processo físico, onde ocorre a migração dos íons Na^+ , K^+ e OH^- da fase líquida do interior, para as partículas de sílica reativa, e um processo químico, envolvendo reações com o agregado e a formação de um gel silicato alcalino. A expansão é considerada como uma adsorção física do fluido pelo gel, capaz de produzir expansão localizada, produzindo géis e cristais, encontrados em todas as estruturas degradadas de concreto, seja ao redor do agregado, ou exsudada na superfície do concreto.

Em geral, segundo Swamy (1992, apud Bonato, 2015) a reação álcali-silica (RAS) difere das reações álcali-silicato e álcali-carbonato pelo fato de que o resultado da reação entre álcalis dos fluidos de poro no concreto e os compostos de silício formam um gel álcali-silica que é hidrofílico, o que absorve misturas. Esse mecanismo pode ser expresso nas seguintes fórmulas idealizadas:



Com estes efeitos, verifica-se um fenômeno de expansão que ocorre no interior do concreto provocando problemas, porém os mecanismos utilizados para explicar esse inchamento (expansão) são ainda controversos (CARLES-GIBERGUES; HORNAIN, 2014). A Figura 4, representa a ocorrência RAS, com formação de gel e fissuração da matriz cimentícia.

Figura 4 - Representação da ocorrência da RAS e seus produtos.



Fonte: Carasek, Cascudo e Caetano, 2016.

De acordo com Poole (1992, apud HASPARYK, 2005) a reação álcali-silica pode ser encontrada simultaneamente com a reação álcali-silicato, prejudicando o diagnóstico da RAA. Conforme Kihara *et al* (1998, apud ARRAIS, 2011) a RAS é a forma mais encontrada de reação álcali-agregado (RAA), é a que acontece mais rapidamente, sendo o maior número de casos encontrados no mundo.

2.3.2 Reação álcali-silicato

Segundo Regourd (1998, apud HASPARYK, 2005) esta reação possui o mesmo princípio da reação álcali-silica, constituindo se em um tipo específico de reação álcali-silica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2008) os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros.

Conforme Carles-Gibergues e Hornain (2014), a principal diferenciação desta reação quanto à álcali-sílica reside no fato de que os agregados reativos não são formados por sílica livre, mas de silicatos variados. Quanto aos produtos da reação, admite-se que eles são semelhantes aos que aparecem na reação álcali-sílica.

Geralmente esta reação é mais lenta e complexa do que a reação álcali-sílica devido aos minerais reativos estarem mais disseminados na matriz da rocha constituinte dos agregados (ARRAIS,2011).

Segundo Kihara (1986, apud DAHER, 2009) a reação álcali-silicato pode ser considerada o tipo de RAA de maior ocorrência em estruturas deterioradas no Brasil.

2.3.3 Reação álcali-carbonato

De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2008) a reação álcali-carbonato é um tipo de reação álcali-agregado em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de deterioração do concreto é devida à desdolomitização da rocha (processo que modifica a estrutura do calcário, provocando aumento de volume) e conseqüente enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Não há a formação de gel expansivo, mas de compostos cristalizados como brucita, carbonatos alcalinos, carbonato cálcico e silicato magnésiano. Como a reação regenera os hidróxidos alcalinos, a desdolomitização terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo ou a fonte de álcalis se esgote.

Conforme Carles-Gibergues e Hornain (2014), na prática, as expansões causadas por esta reação são menos importantes do que aquelas devidas às reações álcali-sílica e álcali-silicato.

Ainda segundo os autores, a princípio, os problemas observados em obras estão relacionados aos fenômenos de desdolomitização da fração carbonatada e de expansão da fase argilosa. A expansão é devida ao processo de desdolomitização, que modifica o arranjo da textura do calcário e causa aumento de volume. A reação dá lugar a formação da brucita, $Mg(OH)_2$, de acordo com a equação abaixo:



Estudos propostos por Tang et al (1994, apud ARRAIS, 2011) provam que a reação de desdolomitização por si só já causa expansões, sendo que rochas carbonáticas sem sílica reativa podem causar expansão quando reagem com álcalis.

2.4 Principais fatores intervenientes da reação álcali-agregado

Segundo Tiecher (2006), a ocorrência da RAA é determinada por diversos fatores intervenientes, sendo estes relacionados aos materiais constituintes do concreto, como as condições ambientais em que a estrutura se encontra e os principais agentes inibidores da reação.

Para Paulon (1981, apud NOGUEIRA, 2010), vários fatores influenciam na RAA, pois o concreto é uma miscelânea muito complexa de diferentes materiais, com diversidade de características químicas, nas quais geram um produto final (concreto) que possui condições ideais para a reação, mesmo utilizando cimentos com baixos teores de álcalis e agregados não reativos. Segundo Hasparyk (1999), os principais fatores preponderantes para o desencadeamento desta patologia são o cimento, os agregados (materiais constituintes da dosagem do concreto), a presença de umidade, as variações de temperatura, as influências externas e o tempo. Wang (1990, apud TIECHER, 2006) cita várias classificações utilizadas para abordar estes fatores, dividindo-se por exemplo em:

- Agentes relacionados ao meio ambiente como a umidade, temperatura e ciclos de molhagem e secagem;
- Agentes químicos como a presença de sais, aditivos em geral;
- Agentes relacionados a dosagem do concreto como a relação água/cimento, teor de álcalis do cimento, e o tamanho das partículas dos agregados;
- Agentes controladores da reação e de expansão como as adições pozolânicas, teor de ar incorporado, porosidade dos agregados e aditivos químicos que inibem expansão.

Neville (2016) enfatiza que outro fator que influencia o processo da reação álcali agregado é a permeabilidade da pasta de cimento hidratada, devido ao controle que ela exerce sobre a entrada de vários íons e a movimentação de água bem como do gel. Segundo o autor vários fatores físicos e químicos tornam o problema da RAA altamente complexo.

A seguir serão abordados de maneira detalhada os principais fatores que influenciam o desencadeamento da patologia da RAA.

2.4.1 Alcalinidade do concreto

Para Tiecher (2006), o cimento é a principal fonte de álcalis, sendo os mais comuns o sódio (Na) e o potássio (K). De acordo com Hasparyk (1999), encontramos no cimento duas formas principais de álcalis:

- Álcalis Solúveis: presentes nos sulfatos alcalinos (representam de 10 % a 60% dos álcalis totais);
- Álcalis Insolúveis: provenientes das soluções sólidas das fases presentes no clínquer.

Os álcalis solúveis geram um aumento do pH da solução nos poros do concreto, ocasionando aumento na concentração dos íons hidroxilas (OH^-) que são responsáveis pela RAA, isto é, a formação destes íons está condicionada à quantidade de álcalis no cimento. Conforme Roy et al (2003, apud TIECHER, 2006), a concentração de hidróxidos alcalinos influencia o pH da mistura, podendo o mesmo variar de 12,7 para um cimento com baixo equivalente alcalino, para 13,9 para um cimento com teor de álcalis elevado. Isto resulta em uma maior concentração de íons hidroxilas, na solução dos poros do concreto. Este pH elevado, acelera e facilita a dissolução de algumas formas de sílica, o que contribui para a formação do produto da reação.

Segundo Hobbs (1988, apud TIECHER, 2006), a presença de álcalis solúveis no cimento pode variar de 0,3% a 1,3%. Esta quantidade é representada pela porcentagem equivalente de óxido de sódio.

A ASTM C150 (1997), com o intuito de evitar a reação cimento-agregado, limitou a quantidade de equivalente alcalino em 0,60%, mas com o avanço dos estudos, verificou que essa limitação não evitava a incidência das reações expansivas.

Segundo Neville (2016), a prevenção da RAA, pela limitação do teor de álcalis no cimento só é válida se duas condições são satisfeitas: a não existência de outra fonte de álcalis no concreto e a não ocorrência de concentração de álcalis em certas regiões em detrimento de outras. Ainda segundo o autor não basta limitar o teor de álcalis, deve se limitar a quantidade de cimento utilizada na dosagem do concreto e

se especifica um valor máximo de 3 kg de álcalis (medido em equivalente de óxido de sódio), por metro cúbico de concreto que contenha agregados potencialmente reativos.

2.4.2 Agregados

Para Tiecher (2006), os agregados correspondem aproximadamente 70% dos os materiais sólidos componentes do concreto, influenciando em várias propriedades deste material, dentre elas a durabilidade.

Segundo Nogueira (2010), os agregados reativos possuem fases mineralógicas silicosas em sua composição, características como forma, tamanho, composição e área específica dos grãos, influenciam na magnitude da reação. Conforme Valduga (2002), um fator importante na atividade reativa dos agregados é a sua graduação ou distribuição granulométrica, levando a entender que quanto maior é a dimensão da partícula do agregado reativo, menor é a expansão gerada por ele. Ainda conforme Paulon (1981, apud TIECHER, 2006), isto ocorre devido a reação do pó e os álcalis ocorre de maneira mais rápida, causando uma redução da concentração de álcalis nos bordos dos agregados maiores. Com isso, os produtos da RAA se localizam distribuídos por toda a matriz e não locais específicos.

Segundo Silva (2007), a sílica é encontrada na maioria dos depósitos geológicos do planeta, e se apresenta em diversas estruturas cristalinas e tamanhos de grãos. Apenas a sílica desordenada e/ou partículas finas presentes nos agregados, reagem com os álcalis no concreto. O tamanho, tipo e proporção de partículas de sílica, influenciam diretamente na taxa e severidade da reatividade incidente no concreto.

Segundo Arrais (2011), existem rochas e minerais considerados potencialmente reativos. Os mais lembrados na literatura são os minerais de sílica, além de rochas que contenham quartzo fortemente deformado. As Tabelas 2 e 3, representam uma correlação de minerais e rochas constituintes, suscetíveis ao desencadeamento de reações com álcalis.

Tabela 2 - Representação dos minerais e rochas suscetíveis a ocorrência da RAA

Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica meta-estável e vidros vulcânicos		
Material reativo	Rochas de ocorrência	
Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico	Rochas sedimentares contendo: opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito	Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riolito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítrea, alguns basaltos

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15577-3, 2008.

Tabela 3 - Representação dos minerais e rochas suscetíveis a ocorrência da RAA

Rochas reativas contendo quartzo	
Material reativo	Tipos de rocha
Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino. Quartzo macrogranular, com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado, com quartzo microcristalino no contato do grão	<ul style="list-style-type: none"> - Chert, flint, veio de quartzo, quartzito, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso - Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino - Rochas micro ou macrogranulares que contenham quartzo micro ou criptocristalino ou quantidade significativa de quartzo moderadamente ou intensamente tensionado: - Rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito - Rochas sedimentares: arenito, grauvasca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso, arenito e arcóseo - Rochas metamórficas: gnaiss, quartzo-mica xisto, quartzito, filito, Ardósia

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 15577-3, 2008.

2.4.3 Temperatura

Segundo Neville (2016), as reações cimento-agregado, só ocorrem na presença de água. Sendo a mínima umidade relativa no interior do concreto para ocorrer a reação é de 85% a uma temperatura de 20 °C, sendo que quando a temperatura é mais elevada, a reação pode ocorrer com umidade um pouco menor. Em geral, uma temperatura mais elevada acelera o progresso da RAA, mas não aumenta a sua expansão total causada pela reação. O efeito da temperatura pode ser decorrente do fato que o seu aumento diminui a solubilidade do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e eleva o da sílica. Este efeito acelerador que a temperatura fornece, pode ser aproveitado para a realização de ensaios acelerados para a verificação da potencialidade reativa de agregados.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), uma vez que as reações químicas dependem da temperatura, no princípio pensava-se que em locais com clima frio, como, Dinamarca, Alemanha e Inglaterra, os mecanismos de expansão da RAA, não seriam problema. Após estudos mostraram que esta hipótese estava incorreta, devido aos ciclos de gelo e degelo não possuírem influência significativa na incidência da RAA.

2.4.4 Umidade

Segundo Arrais (2011) o aumento da umidade pode levar a expansões elevadas do gel, gerando assim um aumento de volume e por consequência de tensões provocando fissuras no concreto endurecido.

Ainda para Neville (2016), como a água é essencial para a continuidade das reações cimento-agregado, por outro modo os ciclos de molhagem e secagem alternados agravam a migração dos íons alcalinos que se movem das partes úmidas para as partes secas.

Segundo Silva (2007), os danos provocados pela reação são mais prováveis em concretos expostos ao ambiente, em contato ou enterrados no solo, imersos ou parcialmente imersos em água, e em estruturas sujeitas a elevada condensação. Também podem ocorrer no interior de concretos massa ou impermeabilizados, devido a umidade residual proveniente da água de amassamento.

2.5 Tipos de cimento existentes no Brasil e suas composições

No Brasil segundo o IBRACON (2008), os principais tipos de cimentos normatizados são: CP I – Cimento Portland comum, CP II, E, F ou Z Cimento Portland composto, CP III – Cimento Portland de alto forno, CP IV – Cimento Portland Pozolânico e o CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial.

De acordo com Prizskulnik (2005), a distribuição destes cimentos varia de acordo com a disponibilidade de recursos minerais de cada localidade do país. Como por exemplo, o estado do Rio Grande do Sul utiliza em ampla escala o CP IV – Cimento Portland Pozolânico, devido à grande disponibilidade de cinza volante proveniente das usinas termoelétricas movidas a carvão mineral presentes no estado.

A Tabela 4 representa as porcentagens de adições presentes em cada tipo de cimento produzido no Brasil.

Tabela 4- Representação de cimentos e suas respectivas composições

Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)			
		Clínquer + Sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
CP I	25,32,40	100	-	-	-
CP II-E	25,32,40	94-56	6-34	-	0-10
CP II-Z	25,32,40	94-76	-	6-14	0-10
CP II-F	25,32,40	94-90	-	-	6-10
CP III	25,32,40	65-25	35-70	-	0-5
CP IV	32,40	85-45	-	15-50	0-5
CP V ARI	-	100-95	-	-	0-5

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 5732,5733,5735, 5736, 11578, 1991.

Estão apresentadas a seguir os principais tipos de cimentos Portland, e suas composições.

2.5.1 CP I – Cimento Portland comum

Segundo a NBR 5732 (1991), este é um tipo de cimento Portland comum sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega). Possui classes de resistência variando de 25 até 40 MPa.

2.5.2 CP II, E, F ou Z Cimento Portland composto

Segundo a NBR 11578, o cimento Portland composto possui 3 grandes variações, CP II-E, CP II-F e CP II-Z, eles possuem classes de resistência variando de 25 a 40 Mpa. O cimento Portland CP II-E, contém adição de escória granulada de alto-forno, que varia de 6% à 34%. A escória granulada de alto-forno é proveniente de rejeito da indústria de ferro. O CP II F-32 tem adição de fíler calcário, em teor variando de 6 a 10%. O cimento Portland CP II-Z, possui adição de material Pozolânico que varia de 6% à 14% em massa, sendo seu principal material Pozolânico, é a cinza volante.

2.5.3 CP III – Cimento Portland de alto forno

Segundo a NBR 5735, o cimento Portland de alto-forno contém adição de escória no teor de 35 a 70%. Segundo Neville (2016), a presença desta adição, confere a este cimento Portland propriedades como; baixo calor de hidratação, maior impermeabilidade e durabilidade, sendo recomendado tanto para obras de grande porte e agressividade.

2.5.4 CP IV – Cimento Portland Pozolânico

Segundo a NBR 5735, o cimento Portland Pozolânico contém adição de pozolana entre 15 a 50%, Segundo Neville (2016), o concreto dosado com este tipo de cimento possui um baixo calor de hidratação, que o torna de melhor utilização em concretagens de grandes volumes. Devido ao alto teor de pozolanicidade, este cimento Portland proporciona a mitigação da RAA no concreto com a presença de agregados reativos.

2.5.5 CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

Segundo a NBR 5733 (1991), este é um tipo de cimento Portland semelhante ao cimento Portland comum, CP I, contudo o mesmo pode possuir até 5% de material carbonático.

2.6 Principais adições presentes nos tipos cimento existentes no Brasil

Segundo Carles-Gibergues e Hornain (2014), após vários estudos e observações do comportamento das estruturas, ficou estabelecido que a utilização de adições minerais no concreto, seja em substituição parcial ao material cimentício, adição, ou utilização de cimentos compostos, estas adições minerais, reduzem ou inibem as expansões provocadas pela RAA. Destacando que as adições são todas pozolanas enquadradas ou não em normas vigentes. As pozolanas artificiais são resultado de tratamentos térmicos, e processos de moagem de produtos naturais e ou resíduos industriais, já as pozolanas naturais encontradas na natureza, sofrem apenas processos de moagem.

Para Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, e usualmente adicionados no concreto em quantidades consideráveis, que podem variar de 20 a 70% de substituição por massa de material cimentício. Apesar de ainda serem utilizadas pozolanas naturais em estado bruto ou após ativação térmica em todo o mundo, torna-se viável economicamente e ambientalmente a utilização de subprodutos industriais como fonte primária de adições minerais para concreto.

Segundo Neville (2016), uma razão principal é que estes materiais pozzolânicos são mais finos que o cimento. Devido a este fato melhoram o empacotamento das partículas, reduzindo a permeabilidade do concreto, com isso pode-se dizer que os cimentos compostos por estas adições e ou concretos com adições minerais favorecem aspectos de durabilidade relacionada a transporte de agentes agressivos através do concreto.

Para Neville (2016), o controle da RAA é um assunto complexo, onde se necessita de conhecimento aprofundado sobre os agregados utilizados na dosagem do concreto. Entretanto, devem ser destacados os efeitos benéficos da utilização de cinza-volante (cerca de 30 a 40% em massa) ou de escória de alto-forno (cerca de 40 a 50%) nos cimentos compostos. Estes materiais possuem uma pequena parcela de álcalis solúveis em água, de modo a reduzir o teor de álcalis mesmo utilizando um cimento com elevado teor de álcalis na mistura. Segundo Mehta e Monteiro (2008), os tipos de adições minerais são bastante variados. Os mais conhecidos e difundidos para inibir ou reduzir a RAA são a cinza volante, a escória de alto-forno.

A seguir serão abordadas as principais adições presentes nos cimentos citados no Item 2.5, e suas principais funcionalidades relacionadas a RAA.

2.6.1 Cinza Volante

Segundo Mehta e Monteiro (2008) e Neville (2016), a cinza volante, também conhecida como cinza volante pulverizada é a cinza precipitada mecanicamente ou eletricamente, a partir dos gases de combustão de usinas termoelétricas a carvão mineral. As partículas de cinza volante são esféricas, o que já é benéfico no ponto de vista de utilização de água e tem finura bastante elevada. A maioria das partículas tem diâmetros muito pequenos e a sua superfície específica pelo método de Blaine varia

de 250 a 600 m²/kg. Estes valores têm grande influência para a reação com o hidróxido de cálcio.

Para Mehta e Monteiro (2008) as cinzas volantes podem ser divididas em dois grandes tipos, que se distinguem pelo teor de cálcio. A cinza de primeira categoria contém menos de 10% de CaO, produto da combustão de antracito e carvões betuminosos, já a cinza de segunda categoria contém de 15 a 40% de CaO, geralmente sendo produto de combustão de carvões de lignita e sub-betuminosos.

Segundo Carles-Gibergues e Hornain (2014), para ser eficaz, as cinzas volantes devem atender a parâmetros, como teor, finura, composição química e teor de álcalis variando entre 2 a 3%. É importante salientar que em dois casos elas não são eficazes, ou seja, na reação álcali-carbonato e para certas cinzas volantes com elevados teores de álcalis, sendo que o último pode aumentar as expansões devido a uma RAS.

Carles-Gibergues e Hornain (2014), também descrevem que as cinzas volantes devem possuir teores de álcalis inferiores a 2 ou 3%, e o teor de substituição empregado na dosagem deve ser de pelo menos 30% para que elas auxiliem na prevenção da RAA.

Conforme Sabbag (2003), a permeabilidade do concreto que possui cinza volante na sua dosagem, pode ser reduzida consideravelmente após 28 dias de sua cura, isso torna o concreto mais resistente a meios agressivos.

2.6.2 Escória de alto forno

Segundo Carles-Gibergues e Hornain (2014), a escória de alto forno é um rejeito da indústria siderúrgica, mais especificamente na produção de ferro fundido ou ferro gusa. O rejeito é resfriado lentamente ao ar e não reage com água a temperatura ambiente. Quando moído em partículas muito pequenas e de pequeno diâmetro, o material tem características cimentantes e pozolânicas.

Ainda segundo os autores a relação entre a presença de escória e o surgimento da RAA, é inversamente proporcional, isto quer dizer que quanto maior a porcentagem de adição de escória de alto forno ao concreto, menor é a incidência de expansão relacionada a RAA, portanto a utilização de um cimento com presença desta

adição é indicada devido a ser benéfico se na dosagem do concreto se possuir algum agregado potencialmente inócuo.

Conforme Sabbag (2003), ensaios realizados por autores constataram que o teor ótimo de substituição da escória de alto forno na dosagem de concretos pode variar de 37 a 45%.

2.6.3 Fíler Calcário

Segundo Neville (2016), fíler é um material moído, que se aproxima da finura do cimento Portland, que devido a suas propriedades físicas, enaltece algumas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, permeabilidade e massa específica, eles são quase sempre inertes quimicamente.

Ainda Conforme Munhoz (2007), a adição de fíler calcário ao cimento Portland, reduz os custos de produção, emitindo assim menores taxas de CO₂ e preservando o meio ambiente. Ela reduz o número de vazios devido ao melhor empacotamento das partículas da mistura, podendo-se dizer que o fíler serve como um material de enchimento para uma menor utilização de clínquer na composição dos cimentos onde esta adição se encontra presente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as variáveis independentes e de resposta, os materiais e os métodos utilizados para a realização desse trabalho.

3.1 Materiais

Os itens 3.1.1 a 3.1.2 apresentam uma descrição detalhada dos materiais selecionados para o desenvolvimento dessa pesquisa.

3.1.1 Cimento

Para o desenvolvimento do trabalho foram selecionados três tipos distintos de cimento Portland (CPIV, CPII-Z e CPV ARI). O cimento CPIV foi adquirido na cidade de Alegrete/RS, os cimentos CPII – Z e CPV ARI foram adquiridos nas cidades de Santo Ângelo/RS e Rosário do Sul/RS, respectivamente.

A escolha dos cimentos, tem como principal objetivo caracterizar os agregados como inócuos ou potencialmente reativos para o cimento padrão (CP V ARI) e para verificar o potencial inibidor da RAA de cimentos com adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV). A caracterização físico/química dos cimentos foram obtidas dos fabricantes e são apresentadas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente comparadas aos limites normativos.

Tabela 5 - Propriedades físicas dos cimentos Portland

Propriedades Físicas		CPV ARI		CPII – Z		CPIV	
		Valor	Limites ⁽¹⁾	Valor	Limites ⁽¹⁾	Valor	Limites ⁽¹⁾
Blaine (cm ² /g)		4427	≥ 2600	4460	> 2600	4427	> 2600
Tempo de Pega	Inicial (h: min)	2:13	≥ 01:00	3:23	≥ 01:00	4:56	≥ 01:00
	Final (h: min)	3:00	≤ 10:00	4:26	≤ 10:00	6:06	≤ 12:00
Finura na peneira # 200 (%)		0,18	≤ 6	0,30	≤ 12	0,40	≤ 8
Finura na peneira # 325 (%)		1,8	-	3,90	-	2,40	-
Consistência normal (%)		29,20	-	30,90	-	33,5	-
Massa específica (kg/dm ³)		3,12	-	3,00	-	2,77	-

(1) Limites Normativos - NBR 5733 (ABNT, 1991)

Fonte: Adaptado ABNT NBR 5733, 1991.

Tabela 6 - Propriedades químicas dos cimentos Portland

Composição Química	CPV ARI		CPII - Z		CPIV	
	Valor (%)	Limites NBR 5733 ⁽¹⁾	Valor (%)	Limites NBR 5733 ⁽¹⁾	Valor (%)	Limites NBR 5733 ⁽¹⁾
Trióxido de enxofre (SO ₃)	3,1	≤ 4,0	2,9	≤ 4,0	2,6	≤ 4,0
Óxido de magnésio (MgO)	5,7	≤ 6,5	5,9	≤ 6,5	4,8	≤ 6,5
Perda ao fogo	3,3	≤ 6,5	4,6	≤ 6,5	2,6	≤ 4,5
Resíduo insolúvel	1,11	-	13,3	-	34,8	-
Óxido de cal livre (CaO livre)	1,43	-	-	-	-	-

(1) Limites Normativos - NBR 5733 (ABNT, 1991)

Fonte: Adaptado ABNT NBR 5733, 1991.

Os dados acima citados, foram retirados dos boletins de ensaios de cimento fornecidos pela empresa Votorantim Cimentos, através das datas e locais de fabricação. CP V ARI, fabricação Dez/16, unidade de Rio Branco/PR, CP II-Z, fabricação Dez/2015, unidade de Esteio/RS e o CP IV, fabricação Dez/2016, unidade de Pinheiro Machado/RS.

3.1.2 Agregados

O Tabela 7 apresenta a identificação dos agregados da região sudoeste do Rio grande do Sul selecionados para a pesquisa e a sua procedência. Para comparação dos resultados de RAA foi selecionado um agregado potencialmente inócuo (areia do Rio Tietê), identificado como “agregado - A” na Tabela 7.

Tabela 7- Identificação e procedência dos agregados

Identificação	Classificação	Procedência
Agregado – A	Areia natural	Rio Tietê - São Paulo/SP
Agregado – B	Areia natural	Rio Ibicuí - Manoel Viana/RS
Agregado – C	Areia natural	Rio Santa Maria – Rosário do Sul/RS
Agregado – D	Areia de brita (Basalto)*	Jazida da região de Alegrete-RS
Agregado – E	Areia de brita (Calcário)*	Jazida da região de Bagé-RS
Agregado – F	Areia de brita (Granito)*	Jazida da região de Bagé-RS
Agregado – G	Areia de brita (Basalto)*	Jazida da região de Quaraí-RS
Agregado – H	Areia de brita (Basalto)*	Jazida da região de São Borja-RS
Agregado – I	Areia de brita (Basalto)*	Jazida da região de Uruguaiana-RS

*Dados fornecidos pelas empresas que comercializam o material.

Fonte: Elaboração própria

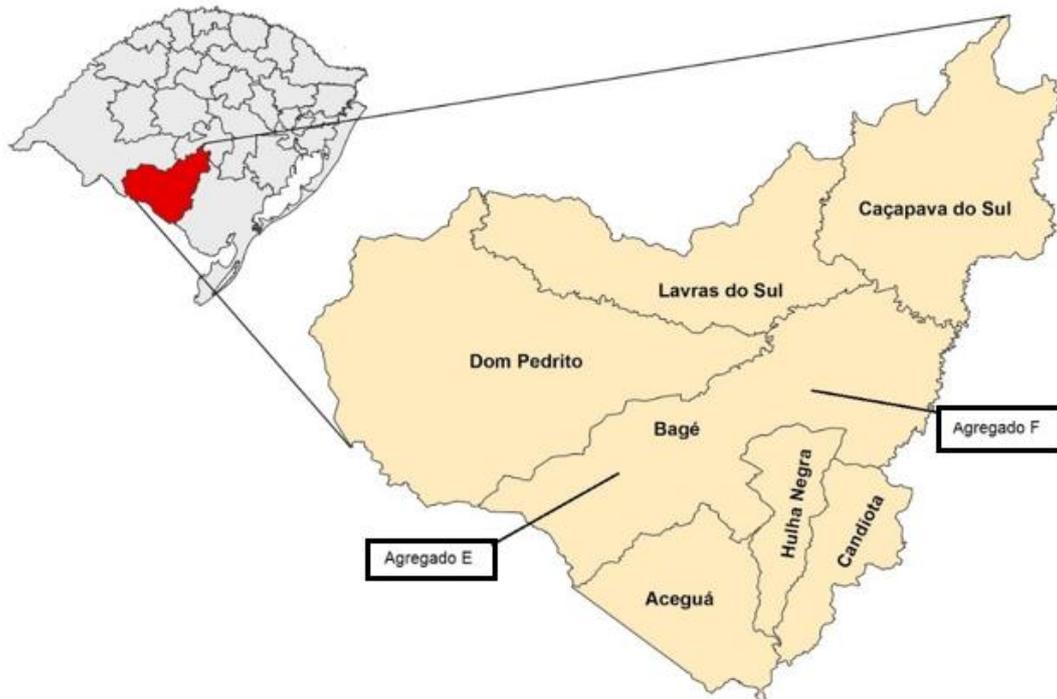
As figuras 5 e 6, apresentam a disposição das cidades de onde foram extraídas as amostras de agregados estudados do estado do Rio Grande do Sul.

Figura 5 - Localização das coletas das amostras da região Oeste do RS



Fonte: Adaptado de NERU-FEE/RS, 2009.

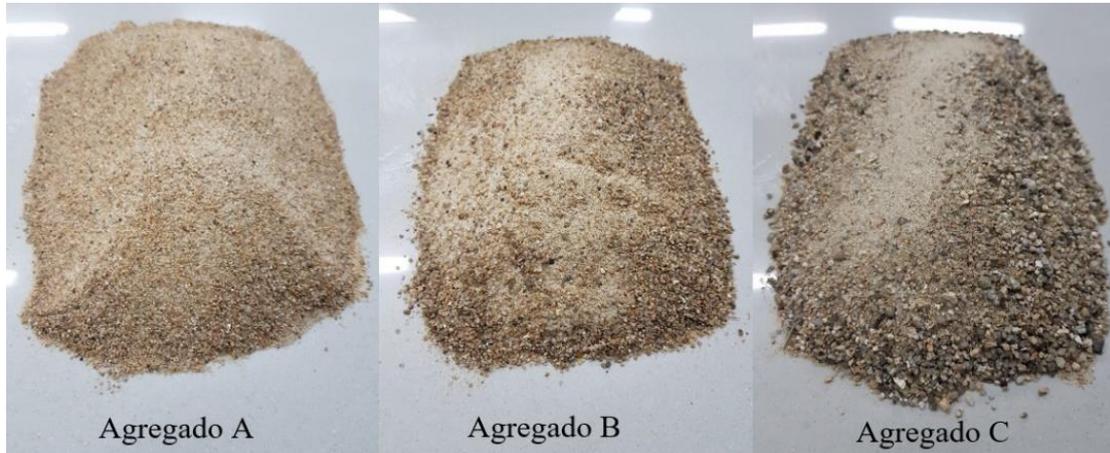
Figura 6 - Localização das coletas das amostras da região Sul do RS



Fonte: Adaptado de NERU-FEE/RS, 2009.

As figuras de 7 e 8, apresentam as amostras de agregados utilizados no programa experimental.

Figura 7- Fotos das areias naturais utilizadas no estudo



Fonte: Elaboração própria

Figura 8 - Fotos das areias de brita utilizadas no estudo

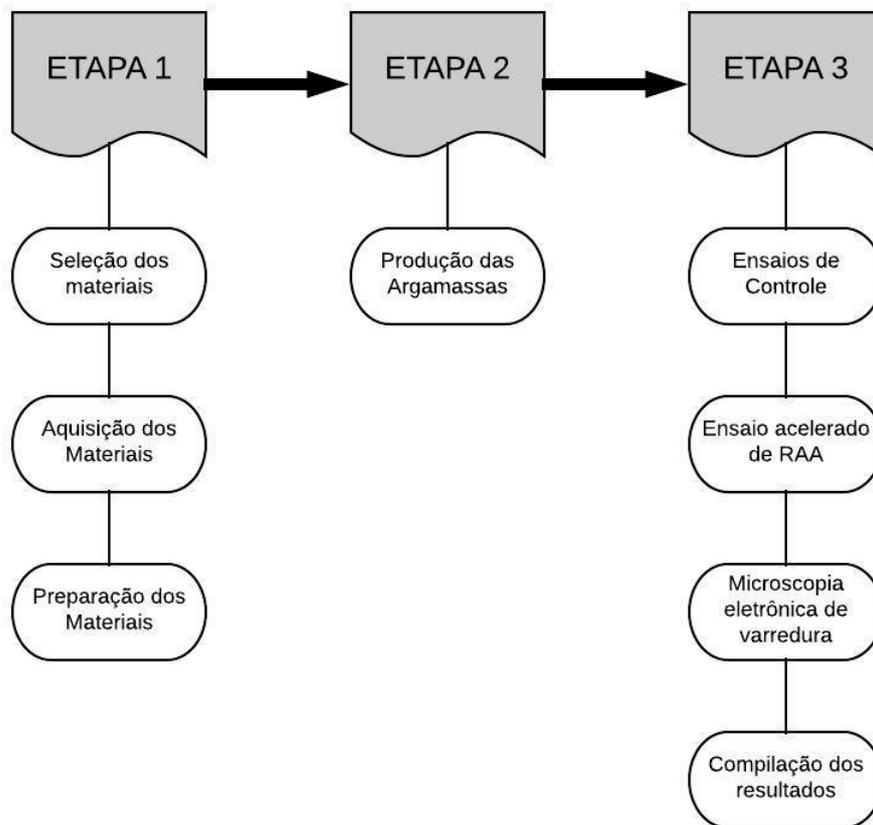


Fonte: Elaboração própria

3.2 Programa Experimental

O programa experimental foi dividido em 3 etapas distintas: escolha e aquisição dos agregados, preparação dos materiais, produção das argamassas e realização dos ensaios de controle. A Figura 9 apresenta o detalhamento do programa experimental dessa pesquisa.

Figura 9 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaboração própria

3.2.1 Métodos de Ensaio

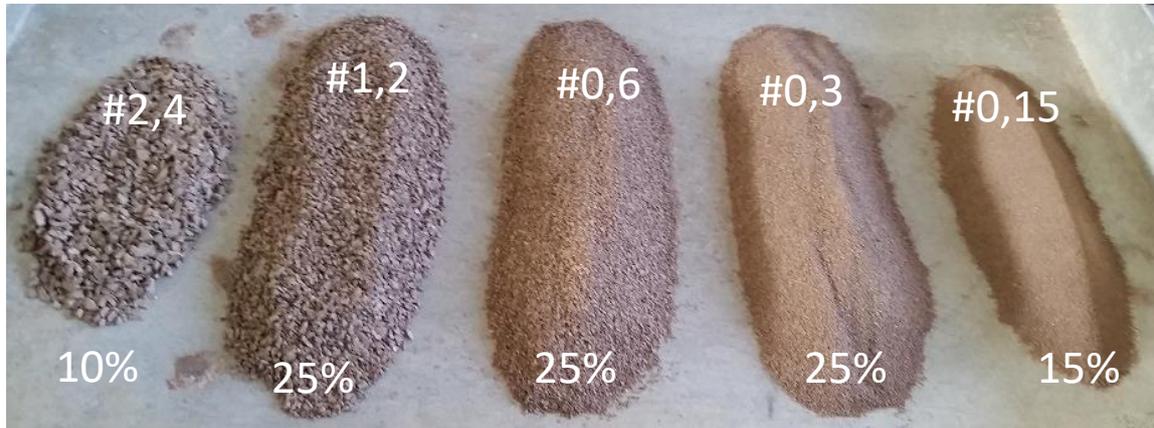
Os itens 3.2.1.1 a 3.2.1.3 apresentam a metodologia que será aplicada para o desenvolvimento dessa pesquisa.

3.2.1.1 Produção das Argamassas

As argamassas foram produzidas no laboratório de materiais de construção civil da UNIPAMPA, campus Alegrete/RS. Os procedimentos de fabricação, moldagem,

traço, cura, relação a/c e número de amostras seguiram os procedimentos da ABNT NBR 15577-4 (2018). As Figuras 10 e 11 mostram a composição de uma amostra de agregado e a preparação das argamassas, respectivamente.

Figura 10: Amostra preparada dos agregados dos ensaios.



Fonte: Elaboração própria

Figura 11: Preparação da argamassa com os agregados estudados.

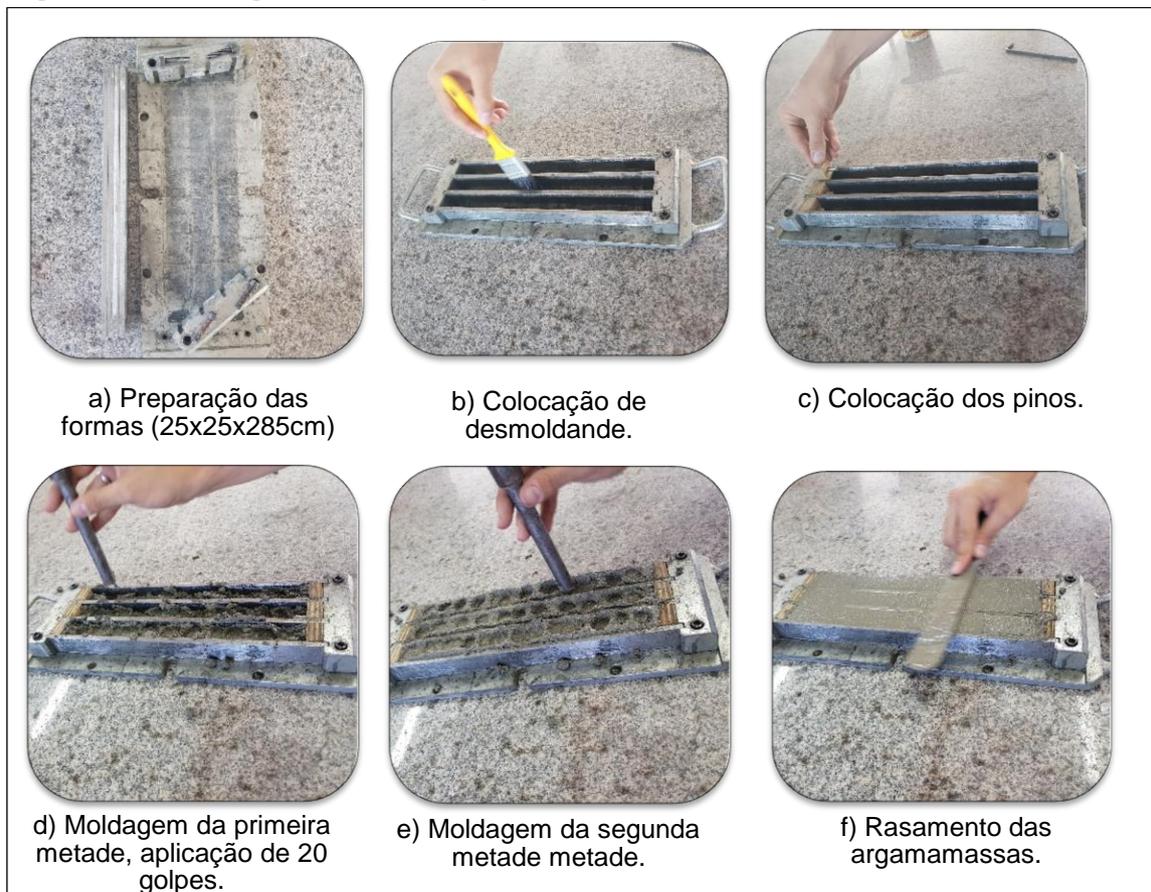


Fonte: Elaboração própria

3.2.1.2 Avaliação da Potencialidade Reativa das Barras de Argamassa

A avaliação da potencialidade reativa dos tipos de agregados (areia e rocha britada), da região sudoeste do Rio Grande do Sul, foi realizada através do Método Acelerado das Barras de Argamassa (ABNT NBR 15577-4 e NBR 15577-5). Este método é bastante utilizado para avaliar o comportamento dos agregados frente a reação álcali-agregado e busca observar possíveis variações de comprimento nas barras de argamassa imersas em uma solução de 1 molar de Hidróxido de Sódio (NaOH) à 80°C. As leituras de controle principais foram realizadas nas idades de 16 e 30 dias (decorridos da imersão), conforme as prescrições normativas. Como forma de auxiliar o monitoramento das expansões foram feitas leituras diárias. As Figura 12 e 13 mostram a fabricação das barras de argamassa e um exemplo de leitura das barras do ensaio acelerado nas barras, respectivamente.

Figura 12: Moldagem das barras para o ensaio acelerado.



Fonte: Elaboração própria

Figura 13: Exemplo de leitura das barras do ensaio.



Fonte: Elaboração própria

3.2.1.3 Análise de Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários (MEV)

Após a finalização do ensaio de RAA foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura nas argamassas que apresentarem maior potencial reativo.

Os ensaios de microscopia têm por objetivo analisar os produtos da RAA, Segundo Valduga (2002). Vale ressaltar que o mesmo não é um método de avaliação de RAA, mas sim um método de apoio para algum outro tipo de ensaio que já tenha sido realizado. Os ensaios foram realizados no microscópio eletrônico de varredura da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), localizado no campus de Alegrete – RS.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

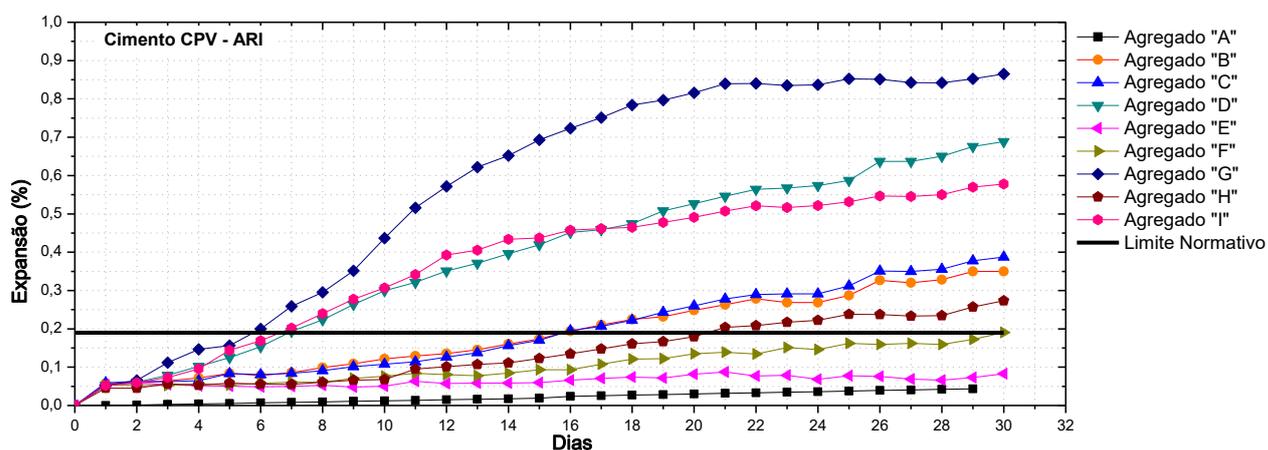
Nesta seção estão apresentados e analisados os resultados obtidos nesta pesquisa para cada agregado investigado.

4.1 Ensaio acelerado em barras de argamassa - (NBR 15577/2018)

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 15577 de 2018, todos os agregados foram combinados com os 3 tipos de cimento (CP V ARI, CPII-Z e CP IV). Os resultados adquiridos com a realização deste ensaio foram analisados através de gráficos, que estão plotados a partir da variação média da expansão das 3 barras ao longo do tempo de imersão, vale lembrar que as leituras foram feitas em relação a leitura inicial, quando as barras ainda não haviam sido colocadas em imersão na solução de NaOH.

Os gráficos das Figuras 14, 17 e 16 apresentam os resultados das expansões médias das barras de argamassa ensaiadas, decorrente da reação álcali-agregado.

Figura 14: Expansão das barras de argamassa em função do tempo para combinação dos agregados com o cimento Portland CP V ARI.



Fonte: Elaboração própria

Com a análise da Figura 14 pode-se considerar o comportamento dos agregados "A" e "E" classificados como inócuos para as misturas com o cimento CPV ARI. Os agregados "B", "C", "D", "F", "G", "H", "I" foram classificados como potencialmente reativos, segundo as NBR 15577-4/2018 e NBR 15577-5/2018. As variações dimensionais das barras de argamassas confeccionadas com estes

agregados apresentaram expansões superiores aos limites normativos nas idades de controle de 30 dias de acordo com NBR 15577-5/2018.

A Tabela 8 abaixo, apresenta os valores médios de expansão das barras de argamassa, para as duas idades de controle normatizadas, bem como a classificação das combinações quanto a sua potencialidade reativa.

Tabela 8: Expansões médias e classificação da potencialidade reativa das combinações agregado/CP V ARI.

Agregado utilizado	Classificação (%)				Classificação	
	16 dias	Desvio padrão	30 dias	Desvio padrão	Potencialmente reativa	Potencialmente inócua
Agregado - A	0,024	0,010	0,051	0,016		X
Agregado - B	0,194	0,002	0,357	0,010	X	
Agregado - C	0,195	0,003	0,388	0,007	X	
Agregado - D	0,452	0,027	0,689	0,024	X	
Agregado - E	0,066	0,006	0,083	0,009		X
Agregado - F	0,093	0,004	0,190	0,011	X	
Agregado - G	0,723	0,014	0,865	0,025	X	
Agregado - H	0,135	0,015	0,273	0,020	X	
Agregado - I	0,457	0,020	0,578	0,027	X	

Fonte: Elaboração própria

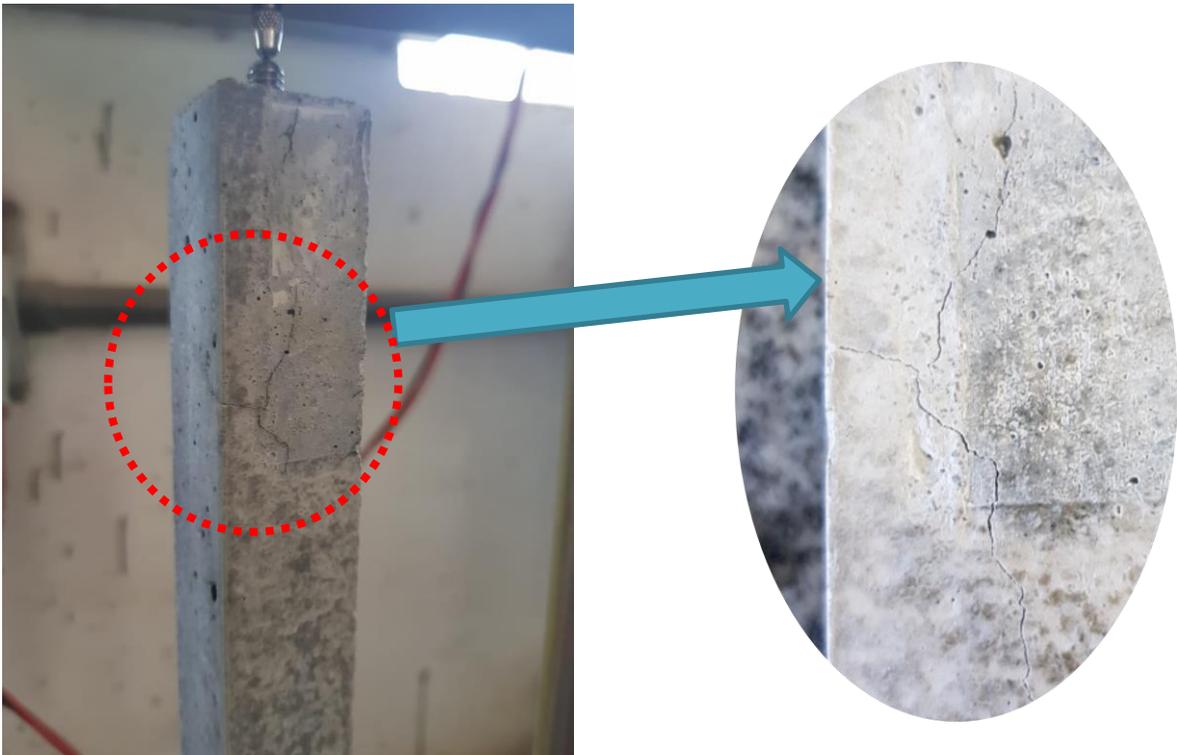
Vale ressaltar que ao decorrer do tempo de ensaio foram observadas microfissuras superficiais em determinadas barras de argamassa, para a mistura do CPV ARI com o agregado “G” e “I”, conforme mostrado nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Figura 15: Microfissuras observadas nas barras confeccionadas com a combinação do agregado “G” com o cimento Portland CP V ARI.



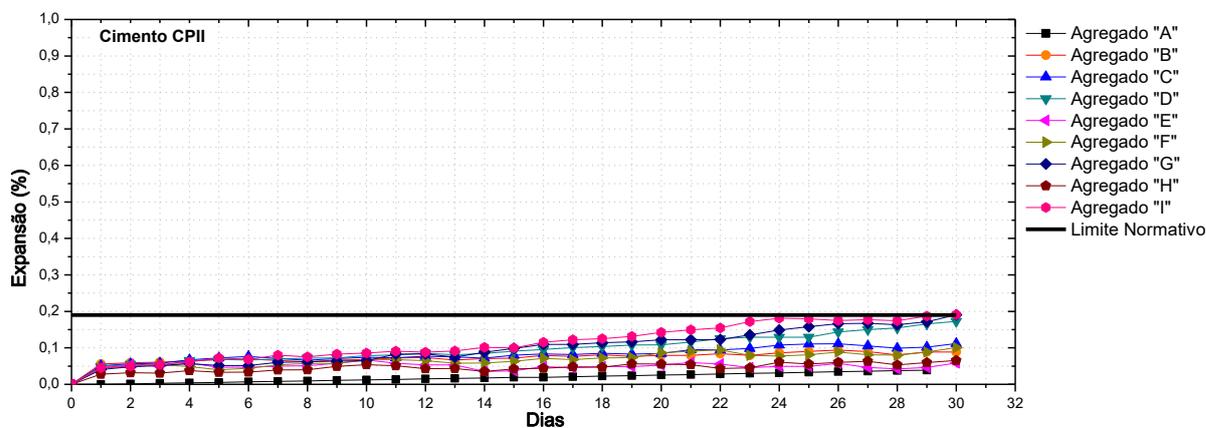
Fonte: Elaboração própria

Figura 16: Microfissuras observadas nas barras confeccionadas com a combinação do agregado “I” com o cimento Portland CP V ARI.



Fonte: Elaboração própria

Figura 17: Expansão das barras de argamassa em função do tempo para combinação dos agregados com o cimento Portland CP II-Z.



Fonte: Elaboração própria

A análise da Figura 17 mostra que o comportamento dos agregados “A”, “B”, “C”, “E”, “F”, “H”, foram classificados como inócuos para as misturas com o cimento CPV II-Z. Os agregados “D”, “G”, “I” foram classificados como potencialmente reativos, segundo as NBR 15577-4/2018 e NBR 15577-5/2018. As variações dimensionais das barras de argamassas confeccionadas com estes agregados apresentaram expansões superiores aos limites normativos nas idades de controle de 30 dias de acordo com NBR 15577-5/2018. Pode-se verificar através da comparação das Figuras 14 e 17, que as combinações dos Agregados “G” e “I”, com os cimentos Portland CP V ARI e CP II-Z respectivamente, apresentaram-se potencialmente reativas, contudo os valores das expansões foram minorados consideravelmente, com índices de redução da ordem de 75,2 % para o agregado “D”, de 77,9 % para o agregado “G” e de 66,95% para o agregado “I”.

A Figura 18, abaixo apresenta a aparência da barra produzida com combinação do agregado “G” e o cimento Portland CP II-Z, pode-se verificar que apesar de classificada como potencialmente reativa, a barra não possui microfissuração aparente, apresentando uma melhora considerável em relação a RAA.

Figura 18: Aparência da barra confeccionada com a combinação do agregado “G” com o cimento Portland CII Z.



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 9 abaixo, apresenta os valores médios de expansão das barras de argamassa, para as duas idades de controle normatizadas, bem como a classificação das combinações quanto a sua potencialidade reativa.

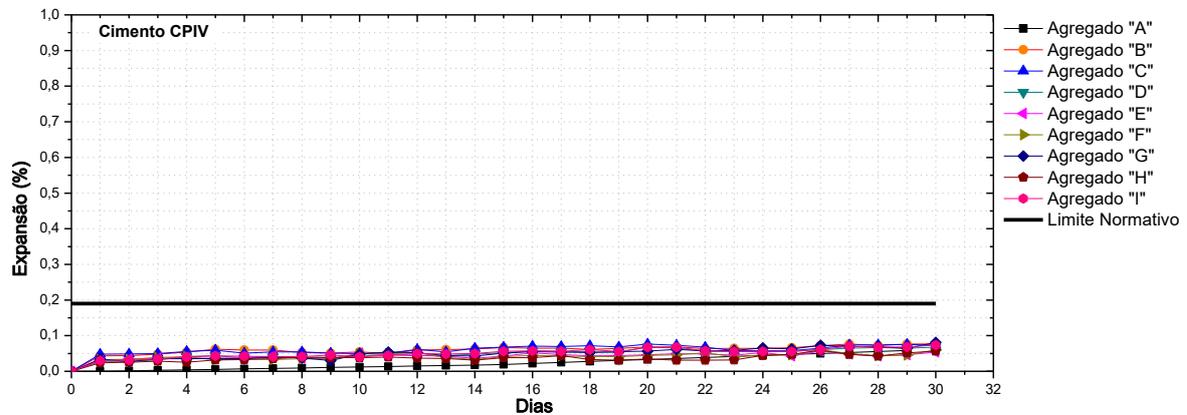
Tabela 9: Expansões médias e classificação da potencialidade reativa das combinações agregado/CP II-Z.

Agregado utilizado	Classificação (%)				Classificação	
	16 dias	Desvio padrão	30 dias	Desvio padrão	Potencialmente reativa	Potencialmente inócua
Agregado - A	0,019	0,005	0,050	0,010		X
Agregado - B	0,080	0,003	0,088	0,005		X
Agregado - C	0,083	0,009	0,112	0,008		X
Agregado - D	0,095	0,008	0,173	0,007	X	
Agregado - E	0,049	0,015	0,053	0,018		X
Agregado - F	0,071	0,005	0,101	0,006		X
Agregado - G	0,110	0,007	0,191	0,017	X	
Agregado - H	0,044	0,006	0,065	0,003		X
Agregado - I	0,115	0,010	0,191	0,015	X	

Fonte: Elaboração própria

Vale ressaltar que Segundo a NBR 15577-1 (2018), que quando as expansões obtidas no ensaio acelerado (NBR 15577-5/2018), forem iguais ou superiores ao limite de 0,10% aos 16 dias, é recomendada a realização de novos ensaios, de forma a atender este limite a partir de novas misturas, sendo as mesma podendo utilizar, cimentos Portland com maiores teores de pozolanas, ou realizar adições ou aumentar os teores de sílica ativa ou metacaulim, e como medida última , trocar o agregado quando não se conseguir comprovar mitigação da reação os inibidores indicados pela referida norma.

Figura 19: Expansão das barras de argamassa em função do tempo para combinação dos agregados com o cimento Portland CP IV.



Fonte: Elaboração própria

A análise da Figura 19 mostra que o comportamento de todos os agregados estudados, foi classificado como inócuo para as combinações com o cimento CPV IV. As variações dimensionais das barras de argamassas confeccionadas com estes agregados apresentaram expansões inferiores aos limites normativos nas idades de controle de 16 e 30 dias de acordo com NBR 15577-5/2018. A Tabela 10 abaixo, apresenta os valores médios de expansão das barras de argamassa, para as duas idades de controle normatizadas, bem como a classificação das combinações quanto a sua potencialidade reativa. A Figura 20, abaixo apresenta a aparência da barra produzida com combinação do agregado "G" e o cimento Portland CP IV, é possível verificar que, a barras não possui microfissuração.

Figura 20: Aparência da barra confeccionada com a combinação do agregado "G" com o cimento Portland CPIV.



Fonte: Elaboração própria

Tabela 10: Expansões médias e classificação da potencialidade reativa das combinações agregado/CP IV

Agregado utilizado	Classificação (%)				Classificação	
	16 dias	Desvio padrão	30 dias	Desvio padrão	Potencialmente reativa	Potencialmente inócua
Agregado - A	0,022	0,004	0,063	0,010		X
Agregado - B	0,065	0,002	0,077	0,003		X
Agregado - C	0,071	0,001	0,073	0,002		X
Agregado - D	0,057	0,004	0,068	0,003		X
Agregado - E	0,051	0,005	0,054	0,007		X
Agregado - F	0,045	0,002	0,060	0,005		X
Agregado - G	0,055	0,005	0,081	0,005		X
Agregado - H	0,038	0,007	0,057	0,009		X
Agregado - I	0,057	0,007	0,074	0,003		X

Fonte: Elaboração própria

De modo geral, ao comparar as expansões entre as 3 combinações possíveis, pode-se observar que com a mudança do tipo de cimento da mistura, as expansões foram sendo minoradas. Segue em nos Anexos A, B e C a análise estatística que comprova a significância do ensaio e das mudanças do tipo de cimento, dos agregados e das idades de controle.

O ensaio executado com o cimento Portland CP V ARI, que por ser um cimento mais puro, possuindo apenas 1,1% de resíduo insolúvel, apresentou as maiores expansões nos agregados estudados, totalizando 77,8% dos agregados considerados como potencialmente reativos, após ao utilizar cimento Portland composto CP II-Z na mistura com os agregados, o mesmo foi utilizado para verificar seu potencial mitigador, devido as suas adições pozolânicas na grandeza de 13,3%, o ensaio apresentou expansões minoradas, mas ainda alguns agregados foram diagnosticados como potencialmente reativos, totalizando 22,2% dos agregados estudados, comprovando um potencial mitigador para agregados menos reativos com expansões não muito acentuadas. O mesmo ensaio foi realizado com a utilização do cimento Portland Pozolânico CP IV na mistura com os agregados, o mesmo foi utilizado para verificar seu potencial mitigador, devido a grande presença de adições pozolânicas, em uma ordem de grandeza de 34,8%, o ensaio apresentou resultado satisfatório ao caracterizar todos os agregados como inócuos para a mistura com o referido cimento.

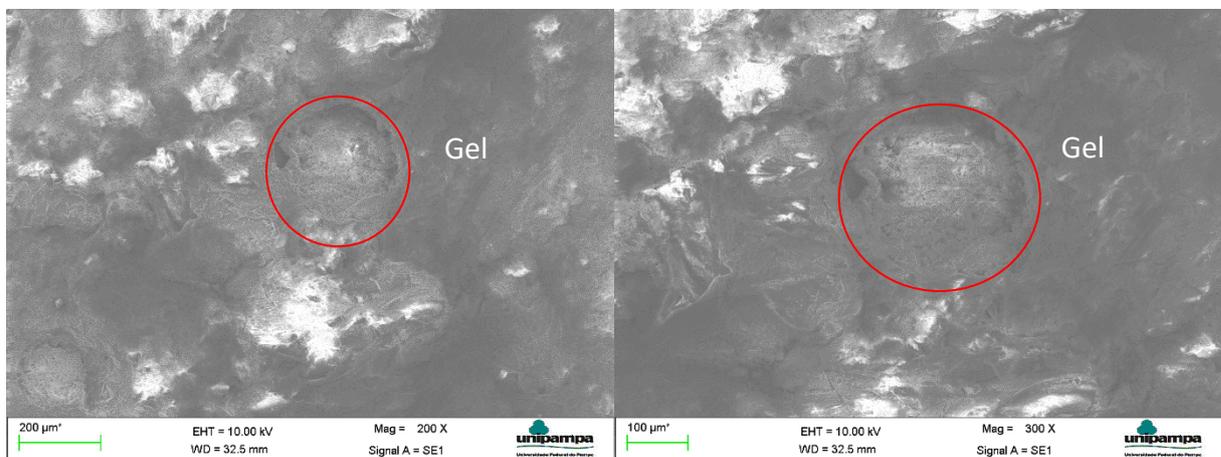
4.2 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Conforme Carles-Gibergues e Hornain (2014), a RAA cria uma rede de microfissuras no interior da matriz, as quais resultam das pressões de inchamento ocorridas dentro das partículas reativas, elas também podem aparecer nos bordos dos grãos, com o passar do tempo as microfissuras se propagam em várias direções podendo seguir pela pasta, interligando vários agregados.

Prezzi (1995) afirma que os vazios deixados pela incorporação de ar podem gerar espaço para o gel expandir. Posteriormente, quando esses espaços estiverem preenchidos e ainda houver presença de minerais reativos na matriz cimentícia, a estrutura tenderá a ficar mais suscetível a um processo de fissuração e expansão. Para Hasparyk (1999), o gel proveniente da RAA pode ser encontrado nos poros das amostras, assim como disperso na argamassa e ou depositados na interface ou nas fissuras dos agregados.

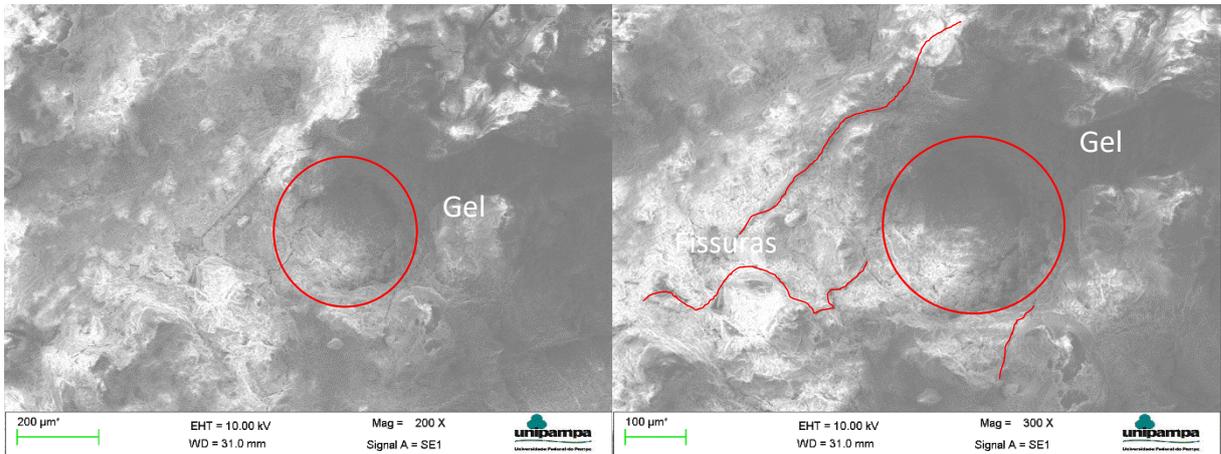
Baseando-se nestas bibliografias que descrevem a formação do gel, decidiu-se que seriam executas análises de MEV, nas amostras que tiveram grandes expansões pelo método acelerado. As Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27, apresentam algumas imagens de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários (MEV), realizadas após os 30 dias em amostras extraídas das misturas com a combinação com o cimento Portland CPV ARI, e os agregados “B”, “C”, “D”, “F”, “G”, “H”, “I”, respectivamente.

Figura 21: MEV em amostras confeccionadas com agregado “B”



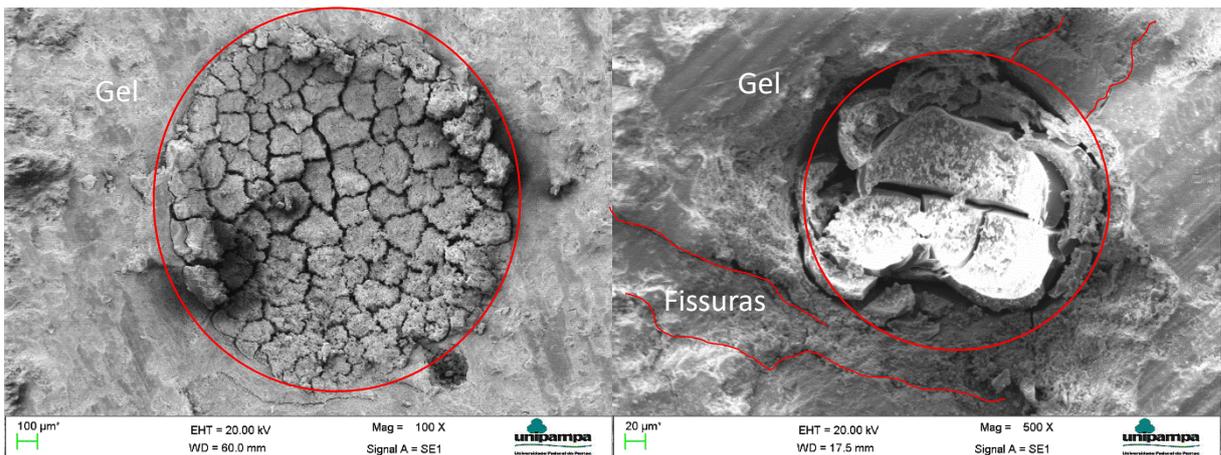
Fonte: Elaboração própria

Figura 22: MEV em amostras confeccionadas com agregado "C"



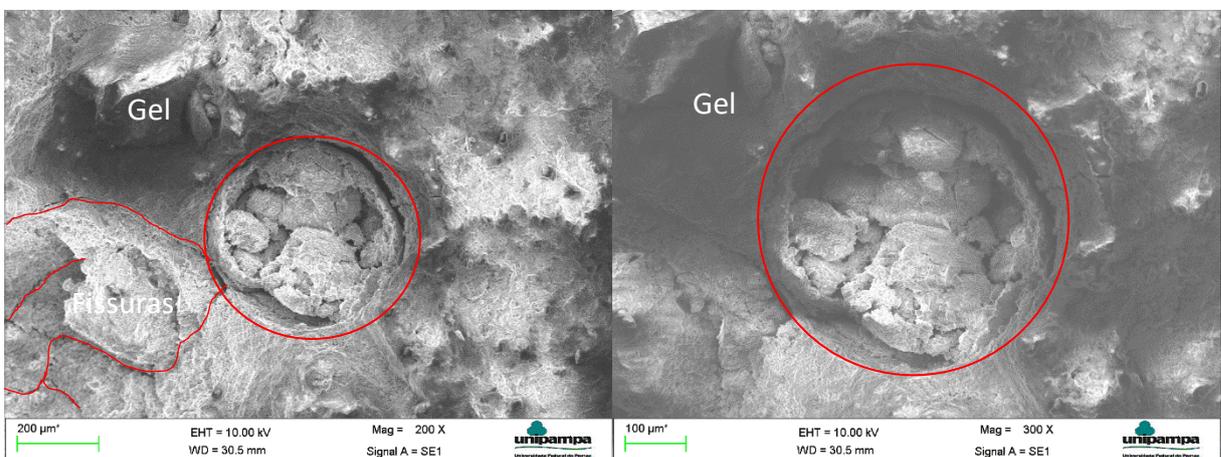
Fonte: Elaboração própria

Figura 23: MEV em amostras confeccionadas com agregado "D".



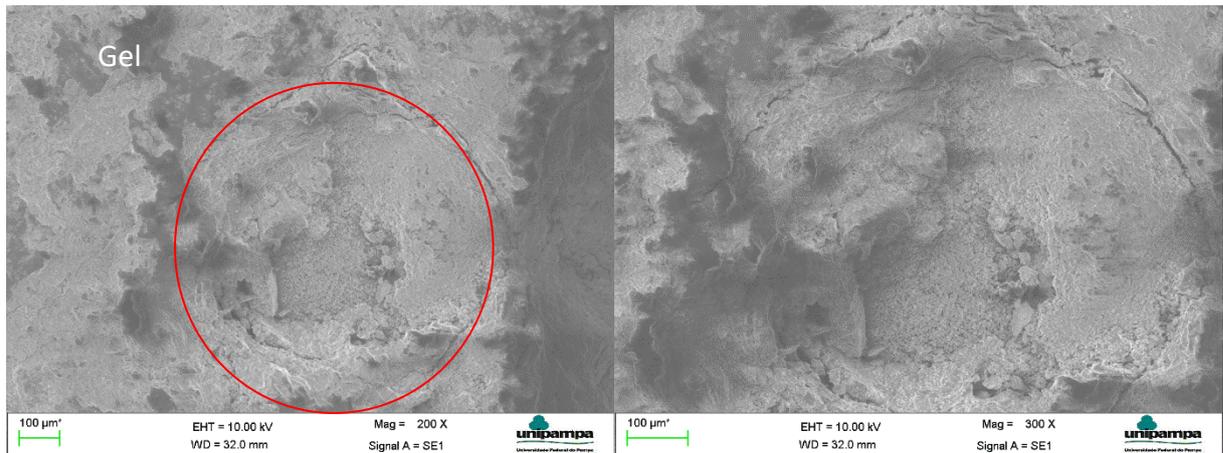
Fonte: Elaboração própria

Figura 24: MEV em amostras confeccionadas com agregado "F".



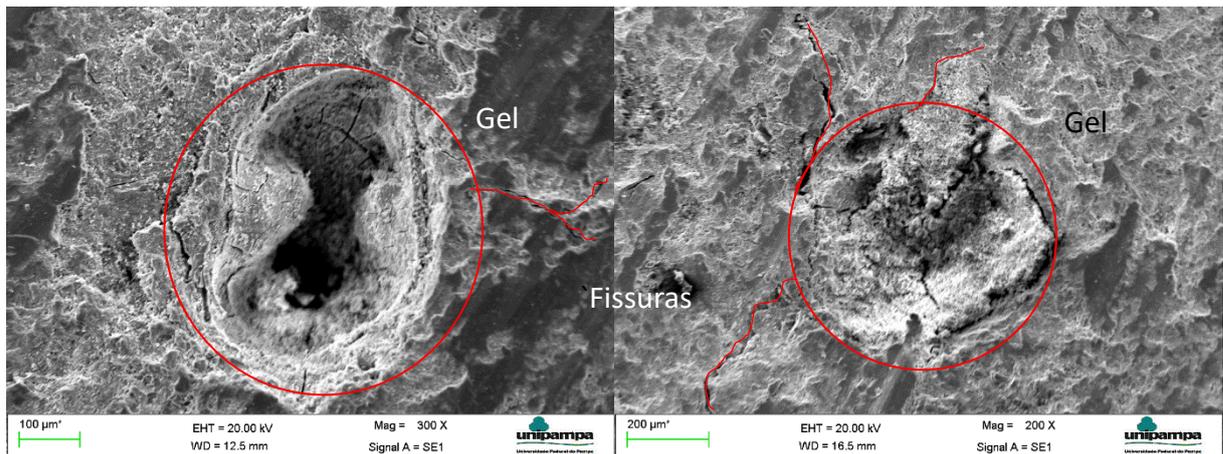
Fonte: Elaboração própria

Figura 25: MEV em amostras confeccionadas com agregado “G”.



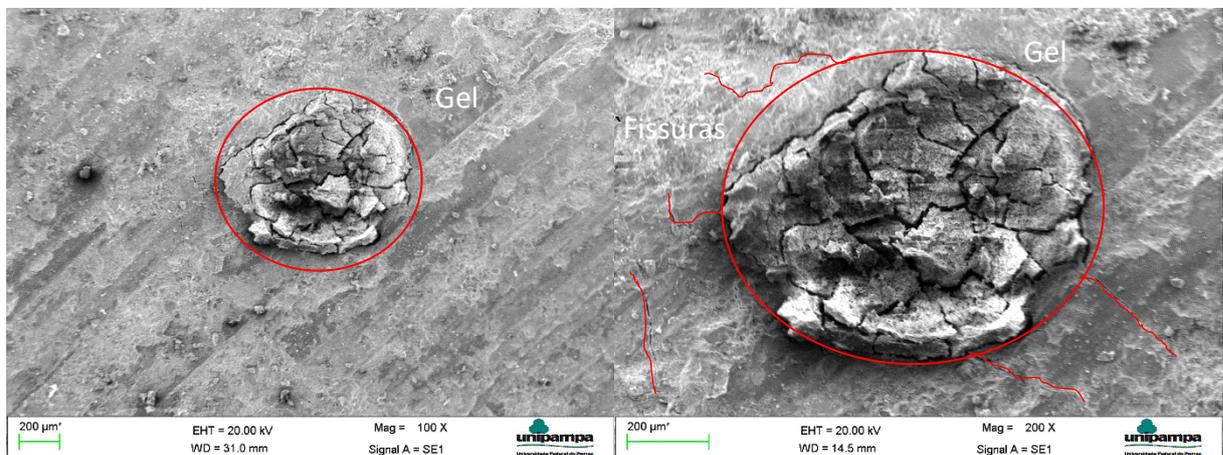
Fonte: Elaboração própria

Figura 26: MEV em amostras confeccionadas com agregado “H”.



Fonte: Elaboração própria

Figura 27: MEV em amostras confeccionadas com agregado “I”.



Fonte: Elaboração própria

Em todas as figuras é possível observar o aspecto do gel incluso nos poros do concreto. De acordo com a literatura (Valduga (2002); Sollero et al. (2016)) é frequente encontrar gel dentro dos vazios do concreto em análises microscópicas. Já nas Figuras 22 a 27, podemos verificar a presença do produto da RAA depositado nos poros das barras de argamassa, e podemos verificar o surgimento de microfissuras, ao redor dos poros da matriz cimentícia o que provavelmente se formaram devido ao grande potencial expansivo do referido gel.

Com a análise das imagens, podemos afirmar que os agregados classificados como potencialmente reativos para o método acelerado em barras de argamassa, possuem intrinsicamente em seus poros, a formação do gel silico-álcalino, uma das principais características da incidência da RAA, sobre elementos de concreto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou avaliar o desempenho de agregados em combinação com diferentes tipos de cimentos Portland, frente a Reação Álcali-Agregado. Para esta avaliação foi realizado o ensaio acelerado em barras de argamassa e análises de MEV.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os agregados utilizados na dosagem de concreto na região sudoeste do Rio Grande do Sul, possuem potencial reativo, que depende do cimento Portland utilizado na mistura.

Os resultados dos ensaios acelerados de RAA (NBR 15577/2018) permitiram concluir que o tipo de cimento, influenciou de forma significativa as expansões provenientes da reação álcali-agregado. O aumento da pozolanicidade dos cimentos contribuiu de forma relevante para a mitigação e/ou inibição da incidência da reação álcali-agregado nas misturas investigadas.

De acordo com os limites normativos da NBR 15577/2018, relativos a potencialidade reativa, apenas duas amostras investigadas foram consideradas potencialmente inócuas para as misturas com o cimento Portland CP V ARI. Deste modo, pode-se concluir que este cimento não é recomendado para evitar o risco da incidência da RAA em estruturas de concreto.

Para as misturas confeccionadas com o cimento Portland CP II-Z, as expansões foram minoradas em relação às misturas produzidas com o cimento CP V ARI. Porém, apesar da redução na expansão das misturas, dois agregados ainda foram classificados como potencialmente reativos. Os resultados mostraram que o teor de adições pozolânicas (resíduo insolúvel) presentes no cimento CP II-Z (13,3%), não é o ideal para evitar a RAA em alguns dos agregados estudados.

O cimento Portland CP IV se mostrou consideravelmente eficaz como inibidor da RAA, sendo que todas as amostras moldadas com este cimento, apresentaram expansões que se classificaram como potencialmente inócuas, ou seja, todas as misturas sofreram expansões inferiores aos limites normativos. Diante do exposto, é possível afirmar que o teor de adições pozolânicas (resíduo insolúvel) presentes no cimento CP IV (34,8%) é suficiente para evitar as possíveis expansões da RAA para os agregados estudados. Pode-se afirmar que os cimentos comercializados na região são do referido estudo, são adequados para evitar ou minimizar a incidência da RAA.

Em resumo, é possível afirmar que a escolha do cimento adequado influenciou significativamente no desencadeamento das expansões decorrentes da RAA em ensaio acelerado, assim, fica comprovado neste estudo, que a utilização de um cimento com adições pozolânicas adequadas é a melhor opção para se minimizar/evitar as expansões decorrentes da RAA. Vale lembrar que por ser um ensaio acelerado em condições laboratoriais, o mesmo pode não representar fielmente o comportamento da RAA em condições ambientais normais.

5.1 Sugestões de futuras pesquisas.

Ao findar esta pesquisa, alguns questionamentos surgiram, a fim de comprovar e tornar mais abrangente este estudo, aperfeiçoando e melhorando a compreensão da RAA na região da pesquisa, assim se sugerem os seguintes questionamentos para pesquisas futuras:

- a) Avaliar a potencialidade reativa dos agregados utilizados na dosagem do concreto no restante do estado do Rio Grande do Sul.
- b) realizar análises petrográficas pelo método da NBR 1577-3/2018, dos agregados utilizados neste estudo, buscando outras conclusões sobre os mesmos.
- c) realizar ensaio acelerado e lento em prismas de concreto pelo método da NBR 1577-6/2018 e 1577-7/2018, respectivamente, a fim de comprovar o diagnóstico do ensaio acelerado em barras de argamassa.
- d) Estudar possíveis adições presentes na região, que possam mitigar e/ou inibir a RAA.
- e) Realizar os ensaios acelerado em barras de argamassa, pelo método da NBR 1577-4/2018, com os mesmos agregados deste estudo e os cimentos Portland CP II-E e CP III, a fim de verificar o potencial mitigador da escória de alto-forno.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, T. **Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana de Recife**. In: Anais do Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto. Rio de Janeiro, Ibracon, 2006.

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**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

Associação Brasileira de Cimento Portland. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto**. Brasil, 2013. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em: 25 maio, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **EB 208: Cimento Portland de alto-forno: especificação**. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 5732: Cimento Portland comum: especificação**. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial: especificação**. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico: especificação**. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.

_____. **NBR 11578: Cimento Portland composto: especificação**. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 7389: Agregados – Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 1: Agregado miúdo**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7389: Agregados – Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 2: Agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para a verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2008.

BATTAGIN, A.; SILVEIRA, A.L.; MUNHOZ, F.; BATTAGIN, I. Associação Brasileira de Cimento Portland. **A evolução da cultura da prevenção da reação álcali-agregado no mercado nacional.** In: Concreto e construções. Ano 44. Ed. Ibracon, Jul-Set 2016.

BONATO, L. C. **Reação álcali-agregado, principais causas e estudo de reatividade potencial.** Trabalho de conclusão de curso, (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal de Paraná, Campo Mourão, 2015.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; CAETANO, G. **Contribuição à previsão de danos para estruturas de concreto atacadas pela reação álcali-silica.** In: Concreto e construções. Ano 44. Ed. Ibracon, Jul-Set 2016.

CARLES-GIBERGUES, A; HORNAIN, H. **A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena.** In: OLLIVIER, J.P; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** São Paulo: Ed. Ibracon, 2014.

DAHER, C. H. S. **Avaliação do grau de influência de parâmetros de contorno no ensaio de reatividade potencial álcali-agregado pelo método acelerado.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

Fundação de Economia e estatística do RS. **Municípios do conselho regional de desenvolvimento (corede) Campanha – 2008.** Porto Alegre, 2009. Disponível em:<http://mapas.fee.tche.br/wpcontent/uploads/2009/08/corede_campanha_2008_municipios.pdf>. Acesso em: 10 junho, 2018.

_____. **Municípios do conselho regional de desenvolvimento (corede) Fronteira Oeste – 2008.** Porto Alegre, 2009. Disponível em:<http://mapas.fee.tche.br/wpcontent/uploads/2009/08/corede_frenteiroeste_2008_municipios.pdf>. Acesso em: 10 junho, 2018.

GOMES, E. A. O. **Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado – a experiencia do Recife.** Dissertação (Mestrado), Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros.** In: Anais do 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, São Paulo. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1993.

KIHARA, Y.; SBRIGHI NETO, C.; KUPERMAN, S. C. **Reação álcali-agregado: visão atual e a situação brasileira.** In: Anais do Simpósio sobre Durabilidade Concreto, São Paulo. São Paulo: IBRACON-USP, 1998.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

_____. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** 2ª ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MUNHOZ, F.A.C. **Efeito das adições ativas na mitigação das reações álcali -sílica e álcali-silicato.** Dissertação (Mestrado), Universidade São Paulo, São Paulo, 2007.

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

NOGUEIRA, Q. A. **“Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008”.** Trabalho de conclusão de curso, (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2010.

OTOCH, S. **Reação álcali-agregado: o que é e como evitar?** Ano 44. Ed. Ibracon, Jul-Set 2016.

PEDROSO, F.L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais utilizado pelo homem.** In: Concreto e construções, Ano 37. Ed. Ibracon, Jan-Mar 2009.

PREZZI, M. **Analysis of the mechanisms of concrete deterioration.** 1995. PhD (Thesis). University of California, Berkeley, USA.

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. Vol 2.

ROUGEAU, P; GUIRAUD, P. **A durabilidade no contexto normativo europeu.** In: OLLIVIER, J.P; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** São Paulo: Ibracon, 2014.

SANCHEZ, F. M. S. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali agregado em concretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2008.

SABBAG, A. F. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso / CHESF, Influência da reação as propriedades do concreto.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2007.

SOLLERO, M.B.S.; BAIMA, L.Q.G.; BOLORINO, H., I. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Avaliação de RAA na Barragem de Pirapora.** In: Concreto e construções, Ano 44. Ed. Ibracon, Jul-Set 2016.

STANTON, T.E. **Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate.** Proceedings of American Society of Civil Engineers, New York, v. 66, n, Dec 1940.

TIECHER, F. B. **Reação álcali-agregado: Avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo.** 2002. 213f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ANEXOS

ANEXO A - Análise de variância (ANOVA) dos resultados de expansão por reação álcali agregado (RAA).

Tabela – 1: Análise de variância (ANOVA) gerada a partir do programa STATÍSTICA RELEASE 7.0

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	Significância (p)
Intercepto	0,967978	1	0,967978	61,67139	0,000000
Tipo de Cimento	0,554858	2	0,277429	17,67542	0,000001
Tipo de Agregado	0,257616	7	0,036802	2,34473	0,034817
Idade de ensaio (dias)	0,533657	2	0,266828	17,00004	0,000001
Erro	0,941745	60	0,015696		

Fonte: Elaboração própria

A análise de variância (ANOVA), mostrou que todas as variáveis independentes (tipo de cimento, tipo de agregados e idade de ensaio) foram significativas ($p < 0,05$). Ou seja, as variáveis independentes influenciaram a variável de resposta (expansão por RAA).

ANEXO B – Comportamento da expansão por RAA em função do tipo de cimento Portland

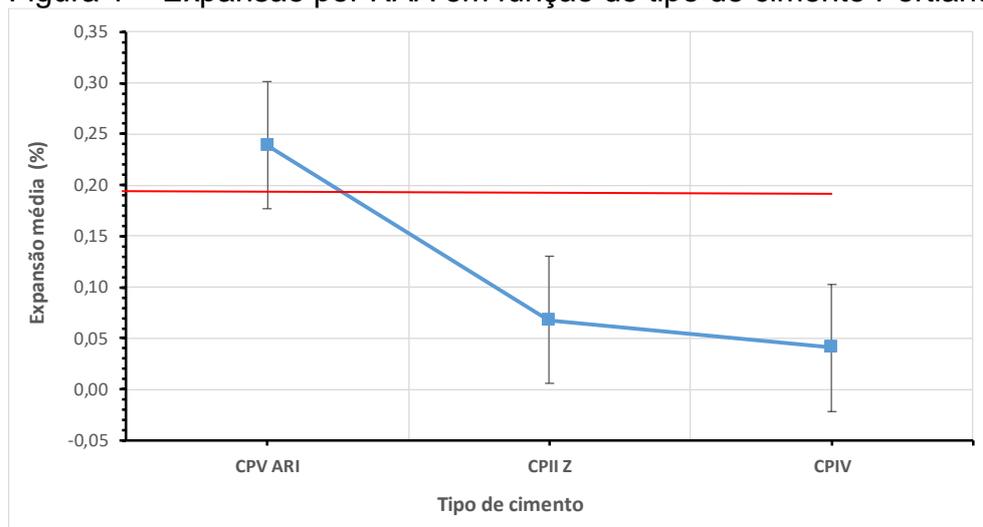
A Tabela 2 e a Figura 1 foram obtidas através da análise de variância (ANOVA), realizada através do Programa Statística Release 7.0 e mostram a expansão das argamassas em função do tipo de cimento.

Tabela 2 – Expansão em função do tipo de cimento, gerada a partir da análise ANOVA.

Cimento	Expansão média	Erro médio	Expansão +95%	Expansão -95%	N
CPV ARI	0,2391	0,025573	0,18797	0,290280	24
CPII Z	0,0678	0,025573	0,01662	0,118933	24
CPIV	0,0409	0,025573	-0,01021	0,092096	24

Fonte: Elaboração própria

Figura 1 – Expansão por RAA em função do tipo de cimento Portland.



Fonte: Elaboração própria

A análise ANOVA (Tabela 1) mostrou que a variável independente “tipo de cimento” influenciou significativamente a expansão das argamassas por RAA. A Figura 1 mostra uma tendência de redução das expansões por RAA com a variação da pozolanicidade dos cimentos. Entre os cimentos investigados, os melhores resultados (menores expansões) foram obtidos para as misturas confeccionadas com o cimento CPIV.

ANEXO C - Comportamento da expansão por RAA em função das idades de controle.

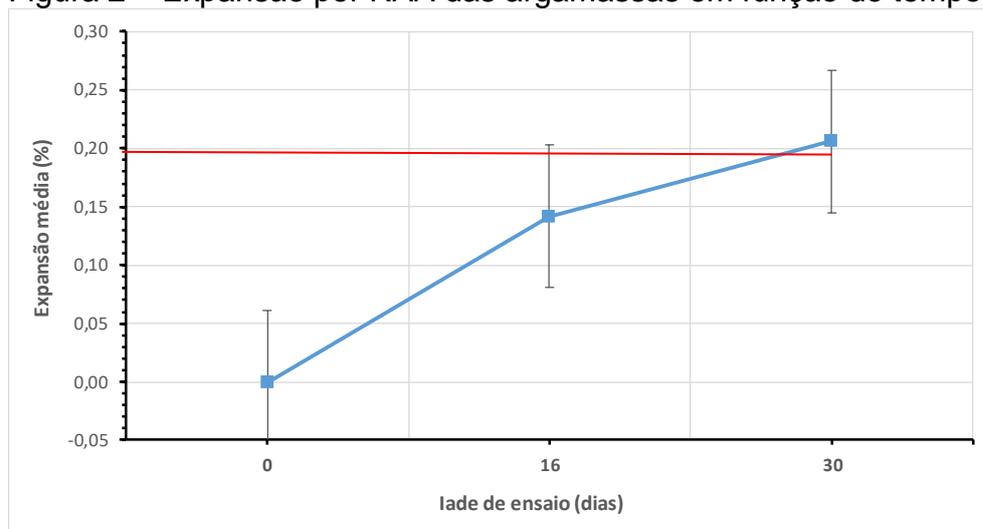
A Tabela 3 e a Figura 2 foram obtidas através da análise de variância (ANOVA), realizada através do Programa Statística Release 7.0 e mostram a expansão das argamassas em função da idade de controle (idades de ensaios).

Tabela 3 – Expansão por RAA em função da idade de controle, gerada a partir da análise ANOVA.

Idade de Controle (dias)	Expansão média	Erro médio	Expansão +95%	Expansão - 95%	N
0	0,0000	0,025573	-0,05115	0,051154	24
16	0,1418	0,025573	0,09060	0,192910	24
30	0,2061	0,025573	0,15494	0,257245	24

Fonte: Elaboração própria

Figura 2 – Expansão por RAA das argamassas em função do tempo.



Fonte: Elaboração própria

A análise ANOVA (Tabela 1) mostrou que a variável independente “idade de ensaio” influenciou significativamente as expansões das argamassas por RAA. A Figura 2 mostra uma tendência de aumento da expansão das argamassas por RAA com a variação da idade de controle (idades de ensaios estabelecidas por norma), para ambos os tipos de cimento.