

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS MG**  
**ENGENHARIA CIVIL**  
**GUILHERME TEODORO**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM BARRAS  
DE ARGAMASSA: Avaliação de agregados de gnaisses provenientes do município  
de Varginha-MG**

**VARGINHA-MG**

**2019**

**GUILHERME TEODORO**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM BARRAS  
DE ARGAMASSA: Avaliação de agregados de gnaisses provenientes do município  
de Varginha-MG**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil  
do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS -  
MG, como pré-requisito para obtenção do grau de  
bacharel em Engenharia Civil sob orientação do Prof.  
Orientador: Prof. Me. Ivan Francklin Junior

**VARGINHA-MG  
2019**

**GUILHERME TEODORO**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM BARRAS  
DE ARGAMASSA: Avaliação de agregados de gnaisses provenientes do município  
de Varginha-MG**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora.

Aprovado em        /        /

---

Eng.

---

Eng.

---

Eng.

OBS.:

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por possibilitar a realização deste trabalho. À minha família, meus pais Águeda e João Carlos, meus avós José P. Teodoro e Ana Maria, responsáveis por tudo que sou, meu porto seguro, meu espelho e constantemente minha fonte de inspiração e incentivo para alçar voos cada vez mais desafiadores. À Lilian, pelo incentivo e amor. Sem eles nada seria possível. Aos meus amigos e companheiros de caminhada da graduação. Aos professores pelos ensinamentos e apoios durante todos estes anos. Ao professor e orientador Ivan, pelo auxílio e empenho para a realização deste trabalho. A todos muito obrigado.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”

Marthin Luther King

## RESUMO

Existem patologias que ocorrem em estruturas de concreto armado que ao longo dos anos vem sendo estudadas e questionados os métodos investigativos a fim de descobrir suas causas e como inibi-las para evitar possíveis catástrofes. O objetivo principal da pesquisa é determinar o potencial de reação álcali-agregado em concretos produzidos com gnaisses combinado ao cimento CP III e ao cimento CP V-ARI. A reação álcali-agregado (RAA) é um fenômeno expansivo que ocorre em diversas estruturas de concreto que vivenciam frequentes condições de umidade. O produto formado é um “gel” expansivo que ocasiona processos de fissuração e deslocamentos diferenciais em estruturas de concreto. Atualmente, há vários pesquisadores que vem estudando as diversas formas de diagnosticar a presença da RAA em estruturas, para avaliar previamente o potencial reativo dos agregados utilizados nas obras gerais de estrutura de concreto. Os métodos comumente empregados na avaliação da RAA envolvem ensaios laboratoriais normalizados pela NBR 15577 (ABNT, 2018). A metodologia empregada nesta pesquisa foi o método acelerado em barras de argamassa segundo a ABNT NBR 15577-4:2018. Foram confeccionadas nove barras de argamassa, sendo três barras utilizando o cimento CPIII, três utilizando CPV-ARI e três utilizando CPV-ARI modificado, mas com as granulometrias dos agregados menores. Os resultados apresentaram que só as barras de argamassa com CPV-ARI modificado deu um grau de reatividade significativo perante as outras.

**Palavras-chave:** Cimento Portland. Gnaisse. Reação Álcali-Agregado.

## **ABSTRACT**

*There are pathologies that occur in reinforced concrete structures that over the years have been studied and questioned investigative methods in order to find out their causes and how to inhibit them to prevent possible disasters. The main objective of the research is to determine the alkali-aggregate reaction potential in gneiss concrete mixed with CP III cement and CP V-ARI cement. The alkali-aggregate reaction (RAA) is an expansive phenomenon that occurs in various concrete structures that experience frequent humidity conditions. The product formed is an expansive gel that causes cracking processes and differential displacements in concrete structures. Currently, there are several researchers who have been studying the various ways to diagnose the presence of AAR in structures, to previously assess the reactive potential of aggregates used in general concrete structure works. The methods commonly used in the assessment of AAR involve laboratory tests standardized by NBR 15577 (ABNT, 2018). The methodology used in this research was the accelerated method in mortar bars according to ABNT NBR 15577-4: 2018. Nine mortar bars were made, three bars using CPIII cement, three using CPV-ARI and three using modified CPV-ARI, but with smaller aggregate particle size. The results presented showed that only the modified CPV-ARI mortar bars gave a significant degree of reactivity to the others.*

**Keywords:** *Portland cement. Gneiss. Alkali-Aggregate Reaction.*

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 01-Trindade Reativa do RAA .....  | 18 |
| Figura 02 - Fase de formação de micro rachaduras.....  | 19 |
| Figura 03-ASG em estado avançado .....   | 20 |
| Figura 04 -Textura, morfologia e composição de algumas rochas susceptíveis a RAA e características do modelo de desenvolvimento da reação. ....                      | 26 |
| Figura 05 - Representação esquemática da floculação de partículas de cimento quando hidratadas e a dispersão com adição do aditivo surfactante redutor de água ..... | 31 |
| Figura 06-Beneficiamento feito pelo Grupo Pedreira Santo Antônio .....   | 34 |
| Figura 07-Local onde é extraído o Gnaisse da Pedreira Santo Antônio.....   | 35 |
| Figura 08-Beneficiamento feito pelo Grupo Pedreira Santo Antônio .....   | 35 |
| Figura 09-Lavagem do agregado.....   | 36 |
| Figura 10-Vibrador elétrico para separação do agregado.....  | 37 |
| Figura 11-Agregado gnaisse separado em cada granulometria.....   | 38 |
| Figura 12- Quantidade requerida para ensaio modificada.....  | 39 |
| Figura 13-Água destilada usada na mistura.....   | 43 |
| Figura 14-Mistura do agregado .....  | 44 |
| Figura 15-Misturador da argamassa .....  | 45 |
| Figura 16-Moldagem das barras .....  | 46 |
| Figura 17-Moldes na câmara úmida .....   | 47 |
| Figura 18-Recipiente para as barras .....  | 47 |
| Figura 19-Leitura da barra de argamassa .....  | 49 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 01-Relação de métodos de determinação de RAA .....                                       | 20 |
| Tabela 02-Características dos principais métodos de identificação da reação alcali-silica ..... | 21 |
| Tabela 03-Agregados ígneos potencialmente reativos .....  | 25 |
| Tabela 04-Agregados metamórficos potencialmente reativos.....                                   | 26 |
| Tabela 05-Grau de Reatividade do Agregado .....   | 32 |
| Tabela 06 - Quantidade requerida para ensaio modificada .....                                   | 39 |
| Tabela 07- Análise química do cimento com ênfase no equivalente alcalino.....                   | 51 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 01- Estruturas de concreto no Brasil afetadas pela reação álcali-agregado.....   | 24 |
| Quadro 02-Grau de Risco da Ocorrência do RAS.....   | 33 |
| Quadro 03 - Quantidade de agregado requerida para ensaio.....   | 37 |
| Quadro 04 - Limites de DRM.....   | 49 |
| Quadro 05 - Composição do gnaisse de Varginha por meio de análise petrográfica, realizado pelo laboratório SGS Geosol Laboratórios LTDA ..... | 50 |
| Quadro 06 - Massa do agregado .....   | 51 |
| Quadro 07 - Leituras das barras com CPIII.....  | 52 |
| Quadro 08 - Leituras das barras com CPV-ARI.....  | 53 |
| Quadro 09 - Leituras das barras com CPV-ARI modificado.....   | 54 |

## **LISTA DE GRÁFICOS**

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 01 -Leituras de expansibilidade das barras com CPIII e CPV-ARI.....  | 55 |
| Gráfico 02 - Leituras de expansibilidade das barras com CPIII e CPV-ARI..... | 56 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | 14 |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | 15 |
| <b>2.1 Objetivo Geral</b> .....   | 15 |
| <b>2.2 Objetivo Específico</b> .....  | 15 |
| <b>3. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO</b> .....  | 16 |
| <b>3.1 Reação Alkali-Silica</b> .....   | 16 |
| <b>3.2 Agentes Causadores do RAA</b> .....  | 17 |
| <b>3.3 Gel expansivo</b> .....  | 18 |
| <b>3.4 Métodos de detecção de RAA em laboratório</b> .....                              | 20 |
| <b>3.5 Casos RAA ocorridos no mundo</b> .....   | 22 |
| <b>3.6 Ocorrências de RAA no Brasil</b> .....   | 23 |
| <b>3.7 Rochas reativas</b> .....  | 25 |
| <b>4. METODOLOGIA</b> .....   | 32 |
| <b>4.1 Materiais</b> .....  | 33 |
| <b>4.2 Preparo do agregado</b> .....  | 34 |
| 4.2.1 Escolha do agregado.....  | 34 |
| 4.2.2 Separação dos agregados.....  | 36 |
| 4.2.3 Empacotamento dos grãos.....  | 38 |
| 4.2.4 Ensaio de determinação da massa específica do agregado graúdo.....                | 39 |
| <b>4.3 Preparo do cimento</b> .....   | 40 |
| 4.3.1 Escolha do cimento .....  | 40 |
| 4.3.2 Caracterização padrão do cimento .....  | 40 |
| 4.3.3 Peneiramento do Cimento .....   | 41 |
| <b>4.4 Escolha do aditivo</b> .....   | 41 |
| <b>4.5 Preparo do reagente</b> .....  | 42 |
| <b>4.6 Preparo da argamassa</b> .....   | 42 |
| 4.6.1 Mistura da argamassa.....   | 42 |
| <b>4.7 Moldagem das barras</b> .....  | 45 |
| <b>4.8 Período de cura e confinamento das barras em solução</b> .....                   | 46 |
| <b>4.9 Leituras das barras</b> .....  | 48 |
| <b>4.10 Cálculo das barras</b> .....  | 49 |
| <b>5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....                                   | 50 |
| <b>5.1 Análise petrográfica- composição mineralógica dos agregados gnáissicos</b> ..... | 50 |
| <b>5.2 Massa específica do agregado</b> .....   | 51 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5.3 Equivalência alcalina do cimento.....</b>    | <b>51</b> |
| <b>5.4 Verificação da expansão das barras .....</b> | <b>52</b> |
| <b>6. CONCLUSÃO .....</b>                           | <b>57</b> |
| <b>7. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA.....</b>             | <b>59</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil em todo o território brasileiro é muito diversificada, por possuir vários métodos construtivos, tendo como estruturas de concreto armado como a principal. Relacionado a este método tem-se uma ampla variedade de matérias, e um deles são os agregados que por sua vez estão ligados a riqueza mineral que são encontrados na superfície da crosta terrestre e juntamente ao tamanho do território do Brasil.

A formação do concreto é uma mistura de um aglomerante (cimento), agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia) e água. Sendo que, especificamente os agregados variam muito de uma região para outra possuindo composições mineralógicas diferentes, o qual podem ser submetidos a diversos ambientes agressivos podendo gerar patologias relacionadas a diversidade chegando ao ponto de comprometer a vida útil de uma estrutura.

Uma das patologias mais comuns em estruturas de concreto armado é a Reação Álcali-Agregado (RAA), atualmente encontra-se em foco de pesquisas e estudos afim de entender melhor sua formação, os minerais envolvidos são as sílicas presentes nos agregados e os álcalis no cimento Portland, gerando um gel expansivo em seu interior que acaba consumindo a estrutura de dentro para fora.

Segundo Hasparyk (1999), a reação álcali-agregado (RAA) é a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto entre os hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, aditivos químicos, adições pozolânicas, entre outros) e alguns tipos de minerais presentes nos agregados. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto.

A reação álcali-agregado é subdividida em duas partes, sendo elas a álcali-sílica e a álcali-carbonato. Existem vários ensaios que tentam prever, diagnosticar e comprovar se haverá ou não RAA. Entre eles, há o ensaio de expansão de argamassa pelo método acelerado descrito na ABNT NBR 15577-4:2018. Este método se destaca entre os outros pelo seu tempo, sua simplicidade ao realizá-lo, eficiência e por apresentar resultados rápidos.

Uma das rochas que abundantemente aflora na crosta terrestre brasileira é o Gnaisse. Muitas são as obras estruturais em concreto armado produzidas com o agregado desta rocha, sendo proveniente do metamorfismo do granito.

Um exemplo de obra brasileira que serviu de base para estudos da RAA foi a barragem de Jupiá, localizada no estado de Mato Grosso do Sul (MS), o agregado utilizado na execução das estruturas de concreto foi o Gnaisse, proveniente da formação geológica parecida com a que será utilizada para realização das barras de argamassa para o estudo.

O agregado gnaisse é abundante na região do município de Varginha-MG, onde é extraído, portanto muito utilizado para fins construtivos. Então, para o tema principal da pesquisa, o agregado será investigado através do método acelerado de expansão das barras de argamassa, seguindo a norma ABNT NBR 15577-4:2018.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Determinar se o agregado gnáissico encontrado na região de Varginha-MG é potencialmente reativo quando combinado aos álcalis dos cimentos, mediante método acelerado em barras de argamassa conforme ABNT NBR 15577-4:2018.

### **2.2 Objetivo Específico**

- Realizar a amostragem e caracterização dos agregados;
- Determinar petrografia dos gnaisses;
- Escolha dos cimentos por meio de pesquisa;
- Determinação da composição química das amostras de cimento;
- Dosar as argamassas conforme procedimento estabelecido pela ABNT NBR 15577-4:2018;
- Dosar barras de argamassa utilizando um método alternativo, conforme modelos de empacotamento de partículas com auxílio do software EMMA;
- Produzir as barras de argamassa em laboratórios;

- Determinar os índices de expansibilidade dos Barras de argamassa.

### **3. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

A reação álcali-agregado, também conhecida como RAA é uma manifestação que na maioria das vezes possui caráter expansivo, sendo considerada patológica. Por meio de reações químicas entre hidróxidos alcalinos, que são provenientes do cimento, dos minerais reativos encontrados no meio dos agregados, onde formam compostos que na presença de umidade se tornam expansivos podendo levar a deslocamentos, fissurações e gerando até mesmo uma completa deterioração das estruturas de concreto.

Segundo Silveira (2006) tem-se conhecimento de dois tipos de RAA: reação álcali-sílica e álcali-carbonato.

- Reação Álcali-Sílica (RAS): ocorre entre a sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais e os íons hidroxilas provenientes da dissolução dos hidróxidos alcalinos.
- Reação Álcali-Carbonato (RAC): ocorre entre certos calcários dolomíticos e as soluções alcalinas nos poros do concreto.

Para que realizem a identificação, deve-se avaliar e conter os efeitos álcali-agregado, onde é necessária uma compreensão ampla da maneira como ela se desenvolve e ataca uma dada estrutura de concreto, inclusive suas características micromecânicas.

Conveniente, com o aumento do conteúdo de álcalis nos cimentos, e ao fato de nem sempre se dispor de agregados com boa qualidade gerou-se interesse de pesquisadores sobre o RAA.

#### **3.1 Reação Álcali-Silica**

Referente a norma ABNT NBR 15577-1/2018 conceitua a reação álcali-silicato (RAS) como sendo um tipo específico de reação álcali-sílica e que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presente em certas rochas. Os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presente em ardósias, filitos, xistos, gnaisse, granulitos, quartizitos, entre outros. Geralmente, esta reação é mais lenta do que a RAS ( Reação Álcali-Silicato).

Segundo Zombotto (2014), a reação álcali-silicato se manifesta por uma zona sombria no contato do agregado com a pasta de cimento e por depósito branco sobre os agregados, nos planos de clivagem. A zona sombria é constituída de um gel expansivo de silicato alcalino que, dependendo do excesso de álcalis ou hidróxido de cálcio, poderá ser parcialmente expansivo.

Van Aardt e Visser (1997), propuseram uma teoria na tentativa de explicar como os feldspatos podem tornar-se um material reativo, esta teoria é conhecida como a “Solution Theory”. Deve-se ainda considerar a presença de outros fatores que influenciam o processo de reação, como é o caso da finura dos feldspatos, posto que grãos finamente divididos, mesmo sem ação de intempérie reagem com relativa rapidez com o hidróxido de cálcio.

Além disso, considera-se que o quartzo embora seja um dos minerais termodinamicamente mais estáveis, pode ser potencialmente reativo quando apresenta o retículo cristalino deformado, principalmente por tensões de origem geológica. Esta deformação do quartzo pode ser mensurada sob a forma de extinção ondulante dos cristais em lâmina delgada, quando submetido à análise ao microscópio de luz polarizada.

Apesar de ser um tipo de reação muito estudada até hoje, não está completamente esclarecida, sendo merecedora de mais estudos pela grande frequência em que ocorrem.

### **3.2 Agentes Causadores do RAA**

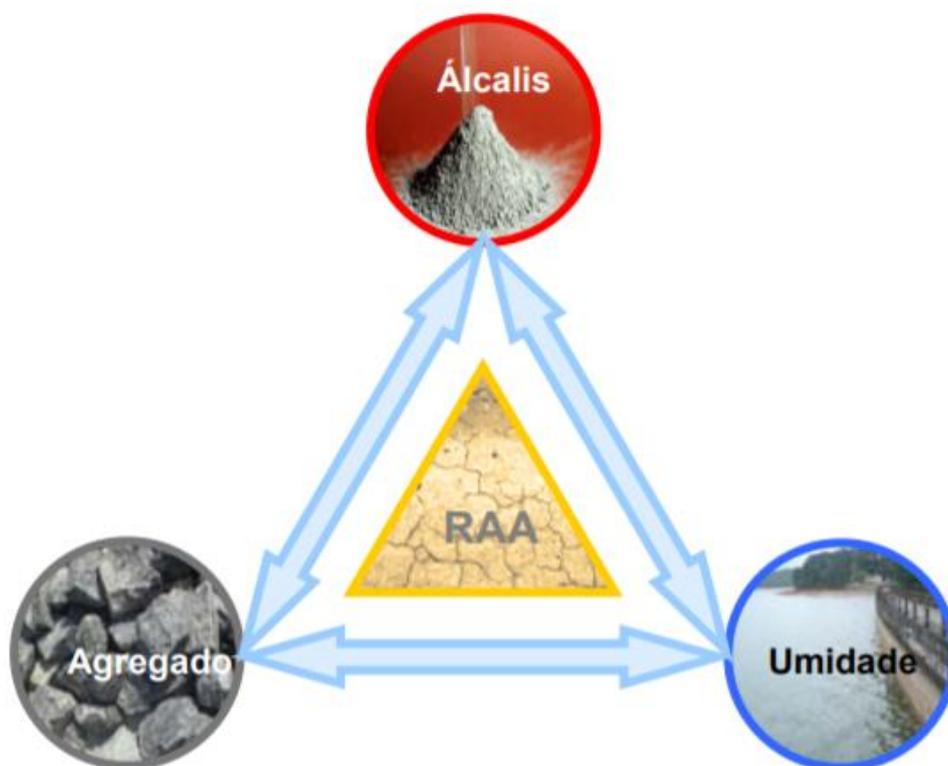
Existem vários fatores que influenciam diretamente na micromecânica da RAA, tendendo atuar isoladamente ou simultaneamente com outros, agindo de forma a inibir ou até mesmo acelerar a deterioração do concreto. Segundo Couto (2008), tais fatores que podem vir a intervir na RAA são divididos nos seguintes grupos:

- Agentes químicos: presença de sais, aditivos acelerados de pega, aditivos redutores de água e superplastificantes;
- Agentes relacionado ao concreto: relação água/ cimento, teor de álcalis do cimento, dimensão das particular dos agregados;
- Agente relacionados ao meio ambiente: umidade, temperatura, ciclos de molhagem e secagem;

- Agentes que controlam a reação e a expansão: adições pozolânicas, teor de ar incorporado, porosidade dos agregados, aditivos químicos que inibem a expansão;

Resumindo de uma forma geral, existem três fatores que se mantem quando ocorrem em estruturas de concreto podendo causar a RAA deletéria, sendo eles a presença de um agregado reativo, a presença de umidade suficiente e a concentração elevada de hidróxidos alcalinos na solução dos poros do concreto. (Figura 01)

Figura 01-Trindade Reativa do RAA



Fonte: Couto (2008)

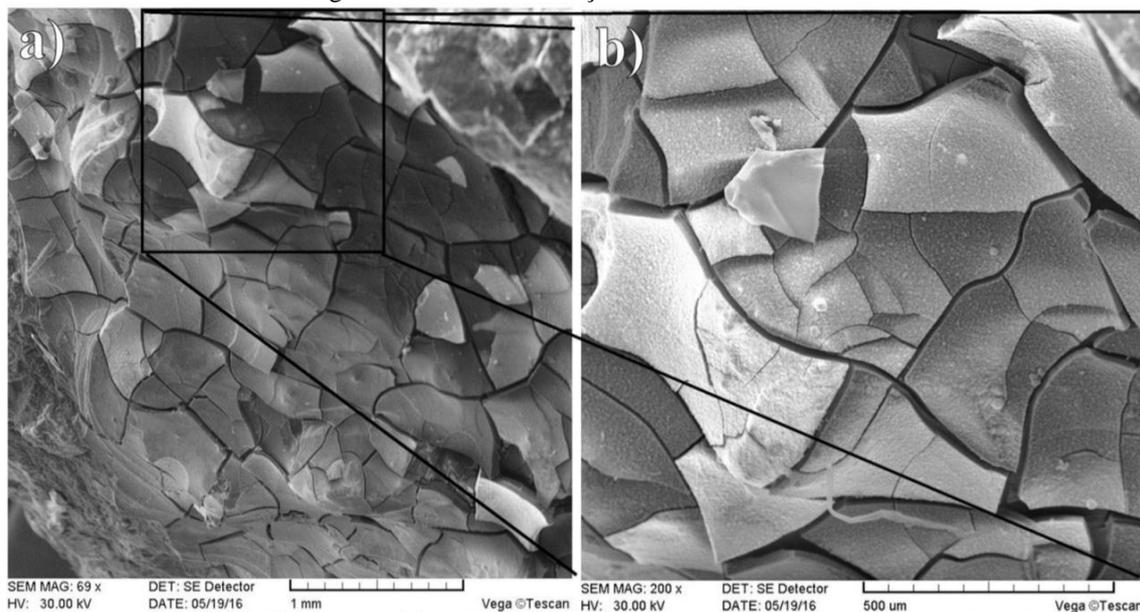
### 3.3 Gel expansivo

Segundo Frýbort et al. (2018), as reações químicas entre os hidróxidos alcalinos (sódio e potássio), presentes na formação dos minerais em determinados agregados, juntamente ao cimento pode gerar um gel de sílica alcalino (ASG) que em contato com água tende a se expandir, conseqüentemente podendo deteriorar as propriedades mecânicas do concreto gerando patologias.

Frýbort et al. (2018) ainda ressalta que essa deterioração gerada pelo ASG possui manifestações em escalas microscópicas e macroscópicas.

As manifestações microscópicas começam pelos pequenos vazios de ar dentro do concreto, surgindo as primeiras micros expansões, que gradativamente vão se espalhando pelas zonas enfraquecidas do agregado formando uma textura e gerando pequenas rachaduras como mostra na figura 02.

Figura 02 - Fase de formação de micro rachaduras



Fonte: Frýbort et al. (2018).

Após ter evoluído as manifestações elas se encontram macroscópicas, onde podem ser observados os fios do gel na superfície do concreto, que progressivamente forma uma teia em toda estrutura. Esses fatores juntamente a outras ações negativas, podem gerar a fragmentação de toda estrutura, observado na figura 03.

Figura 03-ASG em estado avançado



Fonte: Mizumoto (2018).

### 3.4 Métodos de detecção de RAA em laboratório

Mizumoto (2009) ressalta, que como nas décadas de 1940 e 1950 começaram aparecer patologias relacionadas ao RAA, houve uma necessidade de criação de métodos de para identificação de reações álcali-agregado. Porém, novos métodos assumiram grande impulso a partir da década de 1990, devido ao grande número de ocorrências de casos relacionados a detecção de RAA, onde todos métodos foram apresentados em um Simpósio sobre a Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto na cidade de Goiânia, GO (1997).

Alguns autores conhecidos como Touma, Fowler e Carrasquillo (2001), fizeram uma tabela apresentando uma relação de ensaios, de forma mais simplificada apresentaram os métodos de ensaio em laboratório para detecção do RAA, pois a bibliografia sobre os métodos de ensaio em laboratório são bastantes extensas. Na Tabela 01 são apresentados os métodos para determinação da RAA.

Tabela 01-Relação de métodos de determinação de RAA

| Tipo de Método    | Duração Aproximada |
|-------------------|--------------------|
| Método Petrógrafo |                    |
| -ASTM C295        | ≥ 1 dia            |

Tabela 02-Relação de métodos de determinação de RAA (Continuação)

|   |                 |
|---|-----------------|
| Método Químico  |                 |
| -ASTM C289 E ASTM C289 modificado                       | 2 a 3 dias      |
| -Método de dissolução (Alemanha)                        | 1 dia           |
| -Teste da célula osmótica                               | < 40 dias       |
| -Teste da pasta de gel                                  |                 |
| -Método da retração química                             |                 |
| Métodos das barras das barras de Argamassa              |                 |
| -ASTM C227  | 6 meses a 1 ano |
| -AFNOR P18-585, CCA                                     | 6 meses         |
| -Método Dinamarquês Acelerado                           | 5 meses         |
| -Métodos acelerados: NBRI, ASTM 1260, RILEM TC 106-2    | 2 semanas       |
| -Método da autoclave (China, Japão e Canadá)            | ≥3 dias         |
| Métodos dos prismas de concreto                         |                 |
| -ASTM 1293, CAN/CSA A 23.2-14 A, BSI 812 RILEM TC 106-3 | 1 ano           |
| -ASTM 1293 acelerado                                    |                 |
| -AFNOR P 18-587   | 3 meses         |
| -Método Sul-Africano                                    | 8 meses         |
| -CCA  | 21 a 24 dias    |
| -Método Acelerado de Quebec                             | 6 meses         |
| -Método de autoclave                                    | 1 mês           |
|   | 1 mês           |

Fonte: Touma, Fowler e Carrasquillo,(2001)

A tabela 02, foi adaptada dos mesmos autores da tabela 01, onde sintetiza os principais ensaios laboratoriais que, supostamente, permitem prever se uma certa mistura de materiais originará reações álcali-sílica. Tendo como a análise petrográfica a base fundamental para avaliação dos agregados, pois verificando se na amostra pode possuir tendências a ocorrência de RAS nas amostras do concreto.

Tabela 03-Características dos principais métodos de identificação da reação alcali-silica

| Método de Ensaio                              | Procedimento   | Tipo de amostra                       | Critério   |
|---|--|---------------------------------------|--|
| ASTM C227<br>(Método das barras de argamassa) | Barras de argamassa são estocadas em ambiente hermético, sobre lâmina d'água, em elevada umidade relativa à 38°C. Expansões medidas até 12 e, após isto, a cada 6 meses se necessário. | Pelo menos 2 barras com 25x25x 285mm. | Expansão a 1 ano:<br>- >0,10%= reativo<br>- <0,10%= inócuo<br>Expansão com 3 meses:<br>- >0,05%= reativo<br>- <0,05%= aguardar resultado de 1 ano. |

Tabela 04-Características dos principais métodos de identificação da reação alcali-silica (Continuação)

|   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| ASTM C289<br>(Método químico)                                   | Agregados pulverizados reagem com uma solução alcalina a 80°C durante 24 horas. Mede-se a quantidade de sílica dissolvida e a alcalinidade. | Três amostras de 25g agregado pulverizado e peneirado.               | Plotagem das medidas num gráfico que possui curva delimitando áreas deletérias e inócuas.  |
| <u>ASTM C1260</u><br>(Método acelerado das barras de argamassa) | Barras de argamassa são imersas em uma solução de NaOH, a 80°C e as expansões são medidas, não mínimo, até 14 dias.                         | Ao menos 3 barras de argamassa com 25x25x285mm.                      | Expansão a 14 dias:<br>-0,10%=inócuo<br>- Entre 0,10% e 0,20% = não conclusivo.            |
| ASTM C 295<br>(Análise petrográfica de agregados)               | Exames visuais da amostra por microscopia, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura.  | Amostras de agregados, seções delgadas e testemunhos extraídos.      | Presença de constituintes reativos. Presença de borda de reação na superfície do agregado. |
| ASTM C 1293<br>(Método das barras de concreto).                 | Primas de concreto são colocados sobre água a 38°C. Expansões são medidas aos 7, 28, 56 dias e 3, 6, 9, 12 meses, após se necessário.       | Três prismas de 75x75x285mm de uma combinação de cimento e agregado. | Expansão a 1 ano:<br>≥ 0,04% = agregado potencialmente reativo.                            |

Fonte: Touma, Fowler e Carrasquillo (2001)

### 3.5 Casos RAA ocorridos no mundo

As reações álcalis-agregados vem marcando a história no mundo da construção civil, pois alguns dos grandes países já sofreram problemas relacionados ao RAA como:

- Estados Unidos (EUA): Onde teve o primeiro pesquisador Thomas Stanton, em 1940, foi o primeiro pesquisador a sugerir que a grande quantidade de fissuras em pontes e rodovias de concreto na costa da Califórnia estava associada a interação entre os agregados empregados (opala e chert) e a solução de álcalis gerada no processo de hidratação do cimento. Que juntamente a outras patologias a partir da verificação dos problemas de RAA em várias barragens importantes (Parker, Stewart Mountain, Gene Wash, Copper Basin, Buck, American Falls, Coolidge, Owyhee, Chickamauga e Fontana) e em obras rodoviárias e de arte, pesquisas independentes e estudos aprofundados, mas com informações coordenadas, foram iniciados ente 1940-1941, através do

Bureau of Reclamation, Corps of Engineers, Portland Cement Association, American Concrete Institute e os principais laboratórios do State Highway, juntamente de algumas universidades;

- África do Sul: Apesar de a RAA ter sido observada na África do Sul, pela primeira vez em 1974, o aprofundamento com uma série de pesquisas coordenadas acabou tendo início somente no segundo semestre de 1977;
- China: Apesar do primeiro caso observado da deterioração ter sido em 1991 em estruturas de concreto, os estudos sobre RAA tiveram início nos anos 60. Mas mesmo com os estudos com feitos antes dos acontecimentos não tomaram medidas preventivas, assim ocorreu simultaneamente um grande número de problemas nas estruturas de concreto, principalmente no norte do país pelo grande teor de Cimento Portland, contendo elevados teores de álcalis o uso de aditivos químicos, é de se prever a ocorrência de estruturas afetadas pelo RAA.
- Holanda: o número de casos de estruturas com danos devido à RAA, aumentou de 3 para cerca de 35, entre 1990 e 1995 (Zombotto, Ana 2014), causado com isso surpresa na expectativa dos profissionais envolvidos com o assunto naquele país.

### **3.6 Ocorrências de RAA no Brasil**

Nogueira (2010), menciona que os primeiros trabalhos e pesquisa sobre o RAA no Brasil surgiram nos meados da década de 60, juntamente com a construção da barragem de Jupia um dos casos mais famosos da reação álcali-agregado do país, cujo cascalho usado retirado do Rio Paraná tinha a característica de reativa por conter calcedônia. Para viabilizar a utilização desse agregado, construiu-se canteiro de obras de Jupia uma fábrica de pozolana a partir da argila caulinitica disponível na região, que após a calcinação era adicionada ao cimento Portland no teor de 35%.

Segundo Hasparyk (1999), até o ano 1999 havia mais de 20 casos confirmados de barragens afetadas por esta reação no Brasil, dentre eles encontram-se a barragem Apolônio Sales, localizada na divisa entre a Bahia e Alagoas; as barragens de Billings/Pedras, situadas no estado de São Paulo; as barragens de Furnas, em Minas

Gerais e a barragem Joanes, no estado da Bahia entre outras que serão mencionadas no quadro 01 :

Quadro 01- Estruturas de concreto no Brasil afetadas pela reação álcali-agregado.

| Nome da Estrutura     | Tipo de Estrutura | Fim da Construção | RAA notada no ano | Tipo de agregado        |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Billings-Pedras       | Barragem          | 1936              | 1992              | Granito                 |
| Furnas                | Barragem          | 1963              | 1976              | Quartzito               |
| Ilha dos Pombos       | Barragem          | 1924              | 1991              | Gnaisse                 |
| Jaguara               | Barragem          | 1971              | 1996              | Quartzito e Granito     |
| Joanes II             | Barragem          | 1971              | 1988              | Gnaisse                 |
| Jurupará              | Barragem          | 1937              | -                 | Gnaisse Biotita Granito |
| Mascarenhas de Moraes | Barragem          | 1957              | -                 | Quartzito               |
| Moxotó                | Casa de Força     | 1974              | 1980              | Granito-Gnaisse         |
| Paulo Afonso I        | Barragem          | 1955              | 1978              | Granito-Gnaisse         |
| Paulo Afonso II       | Barragem          | 1962              | 1978              | Granito-Gnaisse         |
| Paulo Afonso III      | Barragem          | 1973              | 1978              | Granito-Gnaisse         |
| Paulo Afonso IV       | Barragem          | 1979              | 1985              | Granito-Gnaisse         |
| Pedro-Beicht          | Barragem          | 1932              | 1991              | Granito-Gnaisse         |
| Peti                  | Barragem          | 1945              | 1964              | Gnaisse                 |
| Porto Colombia        | Casa de Força     | 1973              | 1985              | Cascalho de Basalto     |
| Sá Carvalho           | Barragem          | 1951              | -                 | Gnaisse                 |
| Tapacurá              | Barragem          | 1975              | 1990              | -                       |
| Tunel 6               | Tomada d'agua     | 1974              | 1989              | Granito-Gnaisse         |

Fonte: Hasparyk (1999).

### 3.7 Rochas reativas

Segundo Couto (2008), a reação álcali-sílica, reação álcali silicato envolve algumas formas de sílica metaestáveis ou tensionadas eventualmente presentes nos agregados, salientando que seu efeito deletério é dependente da quantidade de álcalis encontrados. O pesquisador ressalta também que o efeito deletério do quartzo está ligado à sua deformação geológica, da opala em função da sua amorficidade, dos vidros vulcânicos devido a sua amorficidade e características ácidas e por fim dos silicatos a função de sua capacidade de esfoliação.

Desta maneira, é indispensável a realização da análise petrográfica para identificar estes minerais que podem apresentar uma possível potencialidade reativa. Couto ressalta uma correlação entre a natureza da rocha, o tipo de agregado e as fases mineralógicas reativas presentes, a partir de informações publicadas por diversos pesquisadores, conforme as tabelas 03,04 e a figura 04 representativa dos minerais :

Tabela 05-Agregados ígneos potencialmente reativos

| Rochas Ígneas  |   |
|--|---|
| Tipo de agregado   | Fase Mineralógica Reativa   |
| Andesito, dacito, fonolito, latito, obisidiana, pedra púmica, riolito, traquito e tufo vulcânico | Vidro vulcânico ácido intermediário, tridimita e minerais de alteração (vidro devitrificado).           |
| Basalto  | Minerais de alteração (clorofeíta), calcedônia, cristobalita, opala, palagonita, vidro vulcânico básico |
| Granito, granodiorito  | >30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e minerais de alteração    |

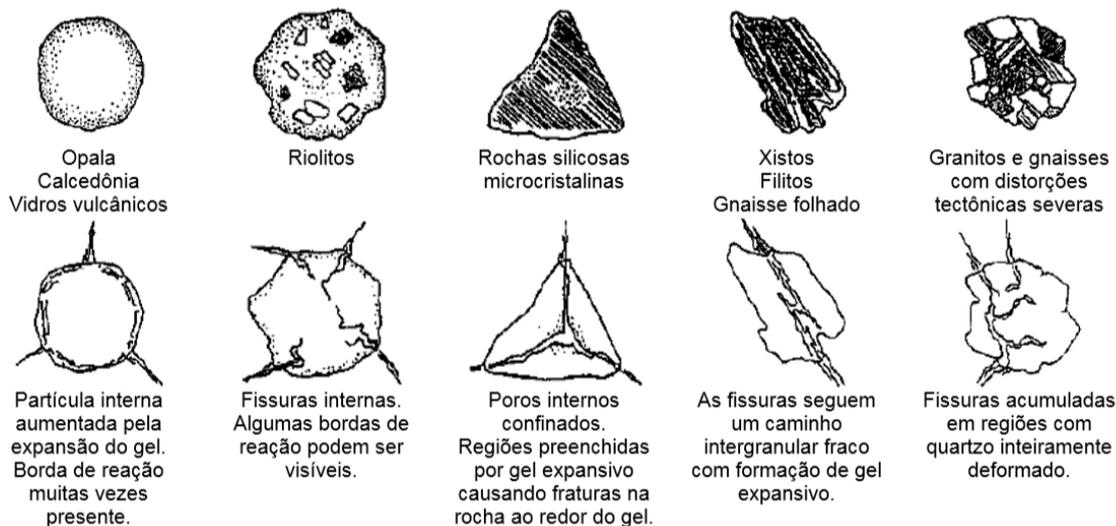
Fonte: Couto (2008).

Tabela 06-Agregados metamórficos potencialmente reativos.

| Rochas Metamórficas                              |  |
|--|--|
| Tipo de Agregado                                 | Fase mineralógica reativa  |
| Ardósia  | Quartzo tensionado argilominerais (filossilicatos)   |
| Filito   | >30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e quartzo microcristalino a criptocristalino vermiculita(filossilicatos)  |
| Hornfel  | >30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e quartzo microcristalino a criptocristalino vermiculita (filossilicatos) |
| Gnaisse, Granulito, Micaxista, Quartzito e Xisto | >30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ , feldspato deformado e quartzo de granulação fina                        |
| Milonito   | Quartzo tensionado e de granulação fina  |
| Rochas   |  |
| Metassedimentares                                | Quartzo tensionado e filossilicatos  |

Fonte: Couto (2008)

Figura 04 -Textura, morfologia e composição de algumas rochas susceptíveis a RAA e características do modelo de desenvolvimento da reação.



Fonte: Couto (2008)

### 3.8 Granulometria dos agregados

A granulometria é a distribuição das partículas de várias dimensões, usada em porcentagens acumuladas em uma série de peneiras variando em aberturas da maior para o menor. Sua importância está relacionada na influência da trabalhabilidade e custos como areias grossas; estas produzem concretos ásperos e secos, sem trabalhabilidade, porém, areias finas aumentam o consumo de água e aumentam a relação água aglomerante (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), uma característica a ser avaliada na granulometria dos agregados é a dimensão máxima característica do agregado que é designada pela abertura da peneira na qual ficam retidos 15% ou menos das partículas do agregado. Quanto maior dimensão máxima do agregado menor será a área superficial por unidade de volume que precisa ser envolta pela pasta de aglomerante para dada relação água aglomerante.

Uma boa distribuição granulométrica para a trabalhabilidade é o mesmo fator de água aglomerante, corresponde ao mínimo de consumo de cimento. Sendo assim o valor varia de acordo com a proporção cimento/agregado, onde é necessário avaliar a menor porcentagem de finos, economicamente viável para conduzir menor quantidade de águas.

### 3.9 Empacotamento das Partículas

O empacotamento de partículas consiste em preencher os espaços vazios deixados por partículas de maior diâmetro por partículas de menor diâmetro. O espaço entre estas partículas é preenchido por partículas ainda menores e, assim, sucessivamente (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

De acordo com De Larrard (1999), a distribuição granulométrica das partículas, a forma ou morfologia dos grãos e o método de compactação utilizado são os principais fatores que influenciam o empacotamento de partículas.

A densidade de empacotamento é dada pela porcentagem de sólidos presentes em uma unidade de volume, partículas incluindo a porosidade (KWAN e MORA, 2001; DE LARRARD, 2009;).

Na prática, em monodispersões de partículas esféricas, ou seja, quando há apenas um tamanho de partícula totalmente esférica, a densidade de empacotamento pode variar entre 0,6 e 0,64; apesar de ser teoricamente possível obter densidades de até 0,7404 em estruturas totalmente ordenadas (OLIVEIRA et al., 2000). O valor máximo de 0,7404 foi

proposto por Johannes Kepler em 1611 (conjectura de Kepler) e foi provado numericamente em 2005 (DE LARRARD, 2009).

A elevação da densidade de empacotamento ocorre pelo preenchimento de vazios entre partículas maiores por partículas menores, que por sua vez são preenchidas por partículas ainda menores e assim sucessivamente (KWAN et al., 2010;).

Em concretos, a seleção e combinação dos agregados apresenta influência dominante na qualidade do mesmo. Isto ocorre, pois, os agregados representam de 60% a 80% do volume total de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008; HE et al., 2012).

O empacotamento dos agregados em concretos e argamassas segundo De Larrard (2009), gera benefícios como elevação da resistência mecânica, do módulo de elasticidade, maior durabilidade, redução da retração redução da fluência, redução da exsudação. Além disso o realizando um empacotamento preciso permite a redução do consumo de cimento deixando mais econômico.

Há vários métodos conhecidos de empacotamento de partículas, mas neste tópico serão abordados o Modelo de Andreasen e o Modelo de Andreasen Modificado ou também conhecido por modelo de Alfred.

### 3.9.1 Modelo de Andreasen

A distribuição de partículas pelo modelo de Andreasen é tratada como distribuições contínuas, pois todos os diâmetros podem ser encontrados em distribuições reais de partículas.

Neste modelo o empacotamento ideal de partículas possui condições de similaridade em torno de duas partículas com tamanhos muito diferentes, essa condição de similaridade define a distribuição de tamanho das partículas em termos de uma lei de potencias dada pela equação 01:

$$CPFT = 100 \left( \frac{D_p}{D_L} \right)^q \quad (01)$$

Sendo:

- CPFT = Porcentagem acumulada passante de finos;
- $D_p$  = Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;
- $D_L$  = Diâmetro da maior partícula de empacotamento;
- $q$  = Coeficiente de empacotamento.

Neste modelo, o coeficiente “q” com o valor de 0,37 proporciona máximo empacotamento teoricamente possível, porém isso só ocorre quando o diâmetro da menor partícula do empacotamento é zero, portanto, na prática, não ocorre. Assim, deve-se utilizar o menor diâmetro possível para maximizar o empacotamento em produção real.

### 3.9.2 Modelo de Andreasen Modificado

O modelo de Alfred é conhecido como Modelo de Andreasen Modificado. Funk e Dinger (1992) realizaram uma série de estudos nos modelos de empacotamento, provando que os modelos de Furnas e Andreasen convergem para uma única equação chamada de modelo de Alfred.

O modelo de Alfred é formulado a partir da comparação entre o modelo de Andreasen e o modelo de Furnas. Provando matematicamente a convergência dos dois modelos para uma única equação 2.

$$CPFT = 100 \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_p^q} \right) \quad (02)$$

Sendo:

- CPFT = Porcentagem acumulada passante de finos;
- $D_p$  = Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;
- $D_s$  = Diâmetro da menor partícula de empacotamento;
- $D_L$  = Diâmetro da maior partícula de empacotamento;
- $q$  = Coeficiente de empacotamento

### 3.10 Aditivos

Segundo Romano (2013), o advento dos aditivos e sua utilização em matéria cimentícios representou um importante avanço tecnológico do setor de construção civil no último século. Pois possibilitam a capacidade:

- Melhorar a trabalhabilidade;
- Melhorar a coesão dos sistemas;
- Reduzir a tendência à exsudação;
- Facilitar o manuseio e aumentar a produtividade;
- Facilitar o espalhamento manual;
- Reduzir ou aumentar o modulo de elasticidade;
- Reduzir o consumo de cimento nas composições;
- Reduzir de água para concretos e argamassas.

Entre tantos tipos de aditivos utilizados os redutores de água, serão utilizados neste estudo.

### 3.11 Aditivos Redutores de Água

Os aditivos redutores de água são largamente empregados no preparo do concreto, sendo que a principal função do aditivo é aprimorar as propriedades do concreto no estado fresco ou endurecido (Grillo, 2014).

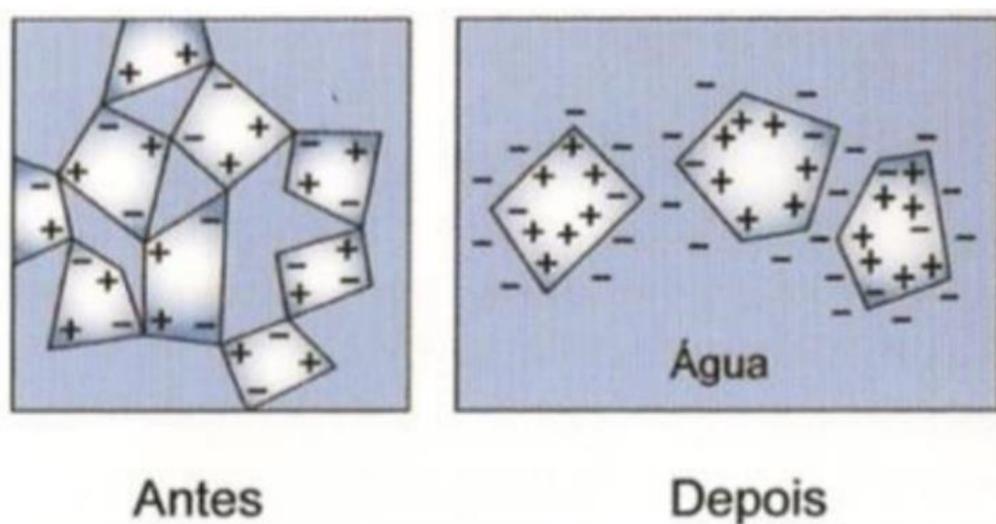
De acordo com Hartmann & Helene (2003), os aditivos atuam diretamente nas partículas de cimento, pois quando este entra em contato com a água, liquido polar, existe uma tendência muito forte à floculação. Estes flocos aprisionam água no seu interior, que por sua vez compromete muito a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. O que geralmente ocorre na tentativa de contornar o problema é a adição de mais água na mistura, uma vez que esta água aprisionada não será liberada mesmo no processo de homogeneização dos componentes.

A água utilizada só será liberada cerca de quatro horas após dar o início da hidratação, depois que a estrutura já foi concretada. O efeito que esta água causa quando liberada são diversos: ela pode se estabelecer embaixo de um agregado com dimensões maiores, causando ali uma porosidade localizada. Caso ela caminhe até a superfície, vai causar um vazio por toda a extensão do percurso onde, na superfície, esse excesso de

água, ao secar, causa uma retração superficial, podendo levar à fratura. Todos estes efeitos causam um aumento de porosidade na microestrutura do concreto, diminuindo sua resistência à compressão.

De acordo com Grillo (2014), para evitar problemas como a falta de água na mistura dos concretos e argamassas, é necessária a adição de aditivos que promovam a defloculação do sistema (cimento em hidratação). Como consequência, melhora-se a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Portanto quando se tem um sistema defloculado, essa água, anteriormente aprisionada, agora será liberada para o sistema, fazendo que se reduza a quantidade de água utilizada no preparo do concreto sendo representada na figura 05:

Figura 05 - Representação esquemática da flocculação de partículas de cimento quando hidratadas e a dispersão com adição do aditivo surfactante redutor de água



Fonte: Mehta & Monteiro (2008)

Os aditivos redutores de água (plastificantes e superplastificantes) tem o modo de ação muito complexo e razoavelmente conhecido, ficando assim difícil avaliar o potencial teórico do aditivo com um determinado tipo específico de cimento. No entanto a melhor maneira de se avaliar esta compatibilidade é estudar as características reológicas do aditivo com cimento em uma pasta de cimento ou em um concreto

Os principais aditivos redutores de águas são divididos em famílias como:

- Sais sulfonados de policondensados de naftaleno e formaldeído, ou usualmente naftaleno sulfonato.

- Sais sulfonados de policondensados de melamina e formaldeído, usualmente denominado melamina sulfonato.
- Poliacrilatos ou policarboxilato-poliésteres.
- Sais de ácido hidrocarboxílicos com teores muito baixos de açúcares e de surfactantes, mais conhecidos como lignossulfonatos (AITCIN, 2000).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve como foi a realização da pesquisa, seguindo a ABNT NBR 15577/2018, onde se detalha o método para determinação da expansão em barras de argamassa.

O ensaio teve duração de 30 dias, gerando ao máximo a expansibilidade das barras e, portanto, verificando as possíveis ocorrências de RAA. O reagente utilizado para ficar em contato com as barras foi o composto hidróxido de sódio e água, isto é, uma solução com alta alcalinidade, juntamente com temperatura de 80 °C onde as barras permaneceram por 30 dias.

Esse ensaio realizado conforme a ABNT NBR 15577-4:2018 e, com seus resultados, foi possível estipular, segundo a ABNT NBR 15577-1:2018, a classificação potencial do grau de reatividade do agregado e também do grau de risco de ocorrência do RAS, sendo eles estipulados conforme as tabela 05 e o quadro 02.

Tabela 07-Grau de Reatividade do Agregado

| Classificação da reatividade potencial do agregado | Expansão das barras de argamassa aos 30 dias | Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias |
|--|--|---|
| Potencialmente inócuo grau R0                      | Menor que 0,19%                              | Menor que 0,04%                               |
| Potencialmente reativo grau R1                     | Entre 0,19% e 0,40%                          | Entre 0,04% e 0,12%                           |
| Potencialmente reativo grau R2                     | Entre 0,41% e 0,60%                          | Entre 0,13% e 0,24%                           |
| Potencialmente reativo grau R3                     | Maior que 0,60%                              | Maior que 0,24%                               |

Fonte: ABNT (2018) – adaptado pelo autor.

De acordo com a tabela 05 acima, a expansão das barras de argamassa permite classificar os graus de reatividade potencial do agregado como inócuo R0, ou reativos R1, R2 e R3.

Quadro 02-Grau de Risco da Ocorrência do RAS

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

Fonte: ABNT (2018) – adaptado pelo autor.

De acordo com o quadro 02, a classe de reatividade do agregado já classificada pode ser comparada com as dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto, gerando assim os níveis de risco de ocorrer a RAA com o agregado.

#### 4.1 Materiais

Segundo a ABNT NBR 15577:2018-4, as principais aparelhagens utilizadas para realização dos ensaios de expansão em barras de argamassas pelo método acelerado foram:

- Balanças de precisão;
- Paquímetro;
- Relógio comparador de comprimento;
- Espátulas;
- Soquetes;
- Recipientes;
- Peneiras com aberturas de: 4.75mm, 2.36mm, 1.18mm, 850µm, 600µm, 300µm e 150µm;
- Vibrador para peneiras;
- Vibrador para adensamento da argamassa;

- Moldes para as barras;
- Barra-padrão para verificação do comparador de comprimento;
- Estufa ventilada ou banho termorregulador.

A solução reagente utilizada para ficar em contato com as barras, segundo a NBR 15577/2018-4 é composta por:

- Água destilada;
- Hidróxido de sódio.

## 4.2 Preparo do agregado

### 4.2.1 Escolha do agregado

O agregado escolhido para realização dos ensaios de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado foi o gnaiss. Onde a escolha dessa rocha foi devido ao fato de ser abundante na região do sul de Minas, consequentemente muito utilizado nas construções dos municípios ao entorno. O gnaiss utilizado nos ensaios foi extraído na cidade de Varginha.

O material foi fornecido em parceria com o Grupo Pedreira Santo Antônio, responsável pelo beneficiamento da rocha. A pedreira Santo Antônio explora as jazidas locais, selecionando e caracterizando a rocha de acordo com as aplicabilidades requeridas da construção civil, como areia, britas, matacões entre outros como será mostrada nas figuras a seguir figura 06 e 07.

Figura 06-Beneficiamento feito pelo Grupo Pedreira Santo Antônio



Fonte: Grupo Pedreira Santo Anto (2019)

Figura 07-Local onde é extraído o Gnaiss da Pedreira Santo Antônio



Fonte: O Autor (2019).

A localização da Pedreira Santo Antônio fica nas coordenadas  $21^{\circ}33' 23.20''$  Sul e  $45^{\circ}22' 11.15''$  Oeste de acordo o Meridiano de Greenwich e vista de satélite está na figura 08.

Figura 08-Beneficiamento feito pelo Grupo Pedreira Santo Antônio



Fonte: Google Earth Pro (2019).

Na região de Varginha a exploração é feita em paragnais ricos em K-feldspato, cianita, localmente granada, com intercalações de rochas meta básicas e calcissilicáticas, pertencentes à Unidade Arantina, em fácies granulítica como é relatado por Trouw (2008).

#### 4.2.2 Separação dos agregados

Para a preparação dos agregados foi feita uma separação antes de cada granulometria, em seguida foi feito a lavagem do mesmo sobre água corrente para retirada de impurezas. Logo após a lavagem levou-se o mesmo para estufa onde permaneceu por 48 horas a uma temperatura de 100 ° C.

A Figura 09 mostra a lavagem do material em água corrente.

Figura 09-Lavagem do agregado



Fonte: O Autor (2019).

Para separação do agregado utilizado no ensaio foi seguido do quadro 03, onde se encontra as quantidades de agregado retido em cada abertura de peneira.

Quadro 03 - Quantidade de agregado requerida para ensaio

| Peneira com abertura de malha<br>(ABNT NBR NM ISO 3310-1) |             | Quantidade de<br>materiaal em massa |       |
|---|-------------|-------------------------------------|-------|
| Passante  | Retido      | %                                   | g     |
| 4,75 mm   | 2,36 mm     | 10                                  | 99    |
| 2,36 mm   | 1,18 mm     | 25                                  | 247,5 |
| 1,18 mm   | 600 $\mu$ m | 25                                  | 247,5 |
| 600 $\mu$ m   | 300 $\mu$ m | 25                                  | 247,5 |
| 300 $\mu$ m   | 150 $\mu$ m | 15                                  | 148,5 |

Fonte: NBR15577:2018-4

Foi utilizado um vibrador elétrico para separação dos agregados em suas respectivas aberturas de peneira, como mostra a figura 10.

Figura 10-Vibrador elétrico para separação do agregado



Fonte: O Autor (2019).

O vibrador foi calibrado para trabalhar, em média, 5 minutos por cada amostra de agregado, sempre em velocidade máxima. O tempo estabelecido foi decidido com base na execução do ensaio, pois 5 minutos foram suficientes para passar a granulometria e reter, se necessário.

As peneiras foram colocadas em ordem de acordo com suas aberturas. Na parte inferior, foi utilizado o fundo, onde a granulometria retida no fundo foi descartada ao final de cada rodada de peneiração.

Na figura 11 é possível observar as respectivas amostras de cada granulometria do agregado quartzito separadas.

Figura 11-Agregado gnaisse separado em cada granulometria



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.2.3 Empacotamento dos grãos

Para realização das barras de argamassas com os agregados menores realizou-se um empacotamento dos grãos, no intuito de tentar deixar os minerais mais expostos a ligação do cimento e solução reagente de hidróxido de sódio.

As peneiras utilizadas para a separação granulométrica foram as de abertura 600( $\mu\text{m}$ ), 300( $\mu\text{m}$ ), 150( $\mu\text{m}$ ), 74( $\mu\text{m}$ ) e 37( $\mu\text{m}$ ) orientadas pelo Prof. Me. Ivan Francklin Junior. Para facilitar empacotamento foi utilizado o Software EMMA (Elkem Materiais Mixture Analyzer), que para efeito de análise utiliza-se os modelos de Andreassen e Andreassen Modificado.

Para realização do traço foi estipulado 700g de cimento por argamassa, em que não se alterou o fator água cimento, mas a relação entre os agregados ficou divididos conforme a tabela 06:

Tabela 08 - Quantidade requerida para ensaio modificada

| Abertura( $\mu\text{m}$ ) | Quantidade Retida% | Peso (g) |
|---------------------------|--------------------|----------|
| 600                       | 20%                | 140      |
| 300                       | 12%                | 84       |
| 150                       | 20%                | 140      |
| 74                        | 13%                | 91       |
| 37                        | 35%                | 245      |

Fonte: O Autor (2019).

Referente ao traço especificado pela norma ABNT NBR 15577:2018-4, o traço é visivelmente diferente do anterior como mostra na imagem 12.

Figura 12- Quantidade requerida para ensaio modificada



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.2.4 Ensaio de determinação da massa específica do agregado graúdo

Foi realizado o ensaio de determinação da massa específica do agregado seguindo a norma NM 53(2009).

Para início de ensaio foi separada uma amostra significativa de gnaiss, com a granulometria maior na qual foi utilizado para fabricação da argamassa, no intuito de facilitar o processo de execução.

Depois de separado o agregado, ele foi lavado para retirada de impurezas que poderiam ter ao seu redor. Logo após foi colocado na estufa onde permaneceu por aproximadamente 72 horas em temperatura 100°C, para que toda sua umidade fosse retirada. Mediu-se a massa do agregado chamando de “massa seca”. Em seguida, foi

colocada a amostra do agregado em um recipiente com água deixando- a submersa, no qual permaneceu por 24 horas.

Passando-se 24 horas, à amostra foi retirada do recipiente com água e colocada no cesto de medição, onde utilizou-se de uma balança de precisão junto com um cesto na parte inferior para fazer a medição da chamada “massa submersa” da amostra.

Com isso foi possível determinar a massa específica do agregado de acordo com a equação 03.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (03)$$

Onde:

- “d” é a massa específica do agregado;
- “m” é a massa da amostra seca;
- “m<sub>a</sub>” é a massa da amostra em água (submersa).

### 4.3 Preparo do cimento

#### 4.3.1 Escolha do cimento

Os cimentos escolhidos para desenvolvimento desta pesquisa foram o cimento CP III e o Cimento CP V-ARI, ambos do mesmo fabricante Holcim para que não houvesse variação de qualidade do material.

#### 4.3.2 Caracterização padrão do cimento

A análise química utilizada foi fornecida pela própria Holcim. As análises são de janeiro a abril de 2018.

O equivalente alcalino foi determinado pela Equação 04:

$$Na_2O_{equivalente} = Na_2O\% + 0,658 \cdot (K_2O)\% \quad (04)$$

### 4.3.3 Peneiramento do Cimento

Antes do ensaio é realizado um peneiramento na abertura de 600  $\mu\text{m}$ , no intuito de remoção de eventuais impurezas e grumos contidos no cimento que podem atrapalhar o desempenho do procedimento. O material retido na peneira é descartado.

O peneiramento foi executado pelo vibrador elétrico de modo que o resultado seja padrão e de qualidade.

## 4.4 Escolha do aditivo

O aditivo usado para confeccionar as barras de argamassa foi o Gleniun 54 um hiperplastificante que de acordo com seu fabricante BASF S.A é um líquido branco turvo, pronto para o uso e livre de cloretos, desenvolvido para produção de concretos fluidos, concretos reodinâmicos e concretos de alto desempenho (CAD), geralmente utilizados na indústria de pré-moldados e concretos protendidos, onde se requer maior durabilidade e desempenho.

As propriedades e os benefícios vão além do que é preciso para o ensaio como:

- Reduz o fator água cimento, a permeabilidade, a segregação, as fissuras e os tempos de cura ambiente ou a vapor;
- Aumenta a durabilidade do concreto;
- Aumenta a trabalhabilidade, módulo de elasticidade e a coesão;
- Aumenta a resistência à compressão e flexão;
- Facilita o adensamento, o lançamento e o bombeamento;
- Melhora o acabamento;
- Não altera o tempo de pega do cimento Portland.

A causa da utilização deste produto para ensaio está relacionado diretamente aos campos de aplicação, em que os principais lugares recomendados são onde ocorrem maior índice de RAA, como concretos usinado para barragens e fundações.

Método de dosagem adotado é especificado pelo fabricante, no qual recomenda-se utilizar de 0,2% a 1% sobre o peso do cimento. Foi utilizado 700g para confecção das barras e empregou 7 mililitros de aditivo adicionados a água.

#### 4.5 Preparo do reagente

O reagente utilizado no ensaio é, basicamente, feito de hidróxido de sódio dissolvido em água. A solução foi efetuada contendo a relação de 40 g de NaOH para 900 ml de água, para assim obter-se 1 litro de solução. Seguiram-se as especificações segundo a NBR 15577:2018-4.

Ainda segundo a NBR 15577:2018-4 o reagente pode causar queimaduras e problemas severos de saúde em caso de contato com partes sensíveis do corpo, por isso, utilizaram-se equipamentos de proteção individual.

#### 4.6 Preparo da argamassa

Após feito o preparo, separação nas suas respectivas dosagens dos materiais que irão compor na confecção das barras de argamassa, foi seguido de acordo com a NBR 15577:2018-4.

Porém, a quantidade de material depende da massa específica do agregado, segundo a norma, para agregados com massa específica superiores a 2,45 g/cm<sup>3</sup> as quantidades de materiais são de: 440 g de cimento, 990 g de agregado e relação água / cimento de 0,47.

Para massa específica menores que 2,45 g/cm<sup>3</sup> a quantidade de materiais são de: 440 g de cimento, relação água / cimento de 0,47, para quantidade de agregado deve seguir a equação 05 a seguir.

$$ma = 990 \cdot \frac{d}{2,65} \quad (05)$$

Onde:

- “ma” é a massa de agregado;
- “d” é a massa específica do agregado.

##### 4.6.1 Mistura da argamassa

Definidas as quantidades de agregado, de cimento e de água, foi preparada a mistura de argamassa seguindo os procedimentos da ABNT NBR 15577/2018-4.

A água utilizada na mistura foi destilada, tomado o devido cuidado quanto sua massa e temperatura, que segundo a norma deve ser de aproximadamente  $(24 \pm 4)^\circ \text{C}$ . Para controle de temperatura foi utilizado um termômetro digital.

Figura 13-Água destilada usada na mistura



Fonte: O Autor (2019).

A quantidade de água usada na mistura, foi o fator água / cimento de 0,47.

Ainda em relação a quantidade de água nas barras de argamassas no qual foram feitas as barras com os agregados menores, utilizou um aditivo hiperplastificante Gleniun 54, em que foi utilizado 1% em relação peso do cimento totalizando 7 mililitros do produto, que foram adicionados água.

Com relação ao agregado utilizado na argamassa, como visto anteriormente, ele foi separado, pesado em suas respectivas frações de acordo com sua granulometria,

realizou-se então a mistura do agregado, a fim de facilitar o processo. Utilizou-se um recipiente de cerâmica para se fazer a mistura, como mostra a figura 14.

Figura 14-Mistura do agregado



Fonte: O Autor (2019).

A NBR 15577/2018-4 estabelece tempo mínimo e máximo para mistura de cada material da argamassa, para isso, foi utilizado um cronômetro no momento da mistura, a fim de facilitar o entendimento do passo a passo estabelecido pela norma.

- Colocar água na cuba;
- Adicionar cimento;
- Ligar misturador em velocidade baixa por 30 segundos;
- Adicionar o agregado no intervalo de 30 segundos;
- Aumentar a velocidade para alta durante 30 segundos;
- Desligar o misturador;
- Nos primeiros 15 segundos, retirar o excesso de argamassa na lateral da cuba com auxílio de uma espátula;
- Deixar a argamassa em repouso durante 1 minuto e 15 segundos;
- Ligar o misturador em velocidade alta por 1 minuto.

Vale ressaltar que no misturador, no momento de “descanso” da argamassa, foi utilizado um pano limpo úmido, a fim de evitar ao máximo a evaporação de umidade. Como mostra figura 15.

Figura 15-Misturador da argamassa



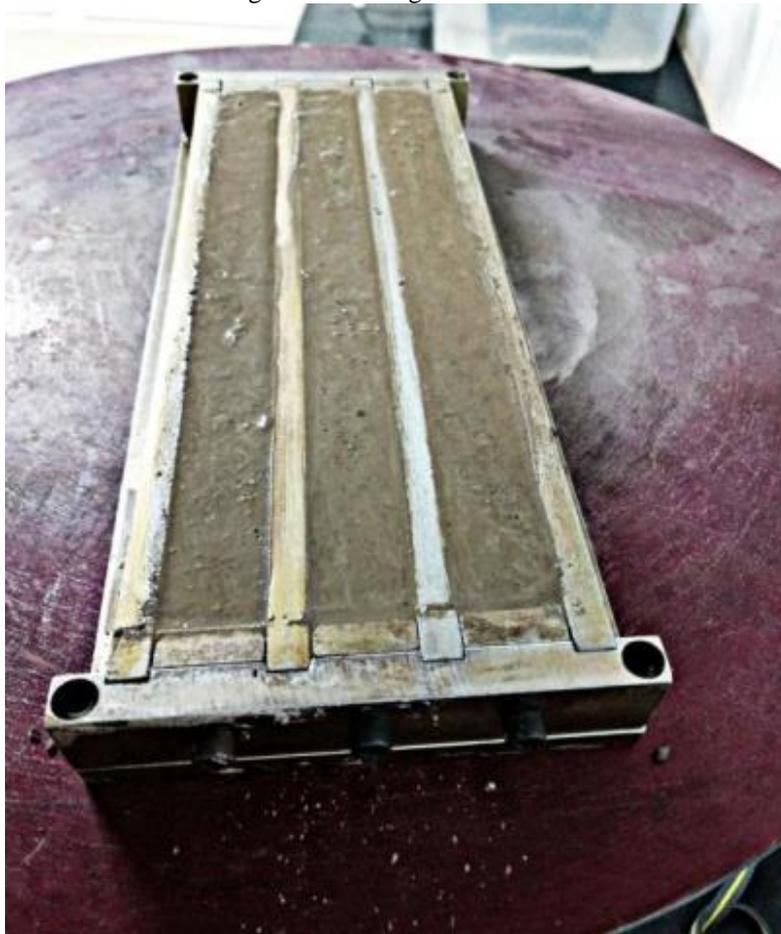
Fonte: O Autor (2019).

#### **4.7 Moldagem das barras**

Após a mistura da argamassa, foram moldadas as barras. A ABNT NBR 15577/2018-4 estabelece um tempo máximo de 2 minutos e 15 segundos para moldagem das barras. Além disso, a massa foi adensada quando atingiu a metade da profundidade do molde e também a altura total do molde, com 20 golpes em cada, a fim de evitar “vazios”.

Na figura 16 é possível observar as barras sendo preenchidas.

Figura 16-Moldagem das barras



Fonte: O Autor (2019).

Após a colocação e adensamento da argamassa nos moldes, foi retirado todo excesso de argamassa que estava fora do molde. Além de que foi necessário observar a altura da argamassa, pois, como o molde não tem fechamento superior, poderia faltar ou ultrapassar a altura.

#### **4.8 Período de cura e confinamento das barras em solução**

Para a cura, levou em consideração a utilização de uma câmara úmida como específica a NBR 15577/2018-4, então, empregou um recipiente de plástico grande o suficiente para colocar os moldes em seu interior, além disso, preencheu o recipiente cerca de 30% com água. Logo, foi posicionado os moldes sobre um suporte sem deixar ter contato direto com a água, por fim, foi coberto com uma tampa, afim de confinar ao máximo o ambiente do molde e manter a umidade o mais alta possível.

Na figura 17 é possível visualizar melhor os moldes dentro da câmara úmida.

Figura 17-Moldes na câmara úmida



Fonte: O Autor (2019).

Os moldes permaneceram na câmara por aproximadamente 24 horas, tempo de cura inicial estabelecido pela NBR 15577:2018-4.

Logo após a cura inicial, as barras foram desenformadas dos moldes e marcadas de acordo com o cimento utilizado em cada uma; colocadas submersas em água destilada em um recipiente de aço, o qual foi colado na estufa em uma temperatura de 80°C, onde permaneceu por mais 24 horas.

Figura 18-Recipiente para as barras



Fonte: O Autor (2018).

Como mostra a figura 18, o recipiente é feito de aço com profundidade o suficiente para cobrir toda barra com água e posteriormente com a solução de hidróxido de sódio.

Ao fim do tempo de cura, as barras foram retiradas do recipiente. O recipiente então foi esvaziado e depois preenchido com a solução. As barras foram colocadas no mesmo novamente e levadas na estufa em temperatura de 80°C. Vale ressaltar que foi gasto o menor tempo possível entre o esvaziamento e o enchimento do recipiente, a fim de evitar que as barras ficassem fora da estufa e em contato com a umidade.

Além disso, como o recipiente estava a uma temperatura (80°C) 24 horas por dia, foi inevitável que a água contida na solução não evaporasse. Portanto, teve de ser monitorado e preenchido a cada dois dias o recipiente com solução. Evitando assim que não faltasse solução para cobrir as barras e prejudicando no resultado e credibilidade da pesquisa.

#### **4.9 Leituras das barras**

Para efetuar as medições foi utilizado um relógio comparador digital. Onde as barras são encaixadas por seus pinos superior e inferior no relógio. Após encaixadas no relógio, é realizado uma volta de 360° nas barras como estabelece a NBR 15577:2018-4.

A primeira leitura foi feita logo após a desmoldagem das barras, assim, a primeira medida considerada como a medida em que teoricamente a barra não sofreu expansão. Junto com as barras de argamassa foi medido também a barra padrão, assim como em toda as outras barras. As leituras foram feitas no 1°, 7°, 14°, 21° e 30° dia.

A Figura 19 ilustra melhor o processo de leitura em uma das barras.

Figura 19-Leitura da barra de argamassa



Fonte: O Autor (2019).

No momento das leituras das barras, foi retirado de uma barra por vez da estufa, a fim de minimizar os efeitos da variação de temperatura fora da estufa. Além disso, foi tirado a leitura das barras no menor tempo possível, para também não haver efeitos da temperatura.

#### 4.10 Cálculo das barras

Para o cálculo de possível expansão de cada barra ou até possível retração, foi utilizado de acordo com os valores de cada leitura. No entanto, o relógio comparador pode variar sua leitura em pequeno período, devido principalmente a condições de temperatura e manuseio do equipamento. Para isso, foi utilizado a barra padrão em todas as medições. Sendo assim, possível determinar a expansibilidade das barras de argamassa.

A NBR 15577/2018-4 especifica também o desvio relativo máximo (DRM) com relação à média das amostras, de acordo com a quadro 04 abaixo.

Quadro 04 - Limites de DRM

| Valores de expansão         | Desvio relativo máximo (DRM) |
|-----------------------------|------------------------------|
| Até 0,10% aos 30 dias       | Até 40%                      |
| Maior que 0,10% aos 30 dias | Até 20%                      |

Fonte: O Autor (2019).

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo será apresentado os resultados obtidos ao longo do processo de fabricação das barras de argamassa, apresentando discussões sobre assunto e as leituras das barras.

E por fim, serão apresentados os resultados de ensaios interligados ao principal, que foram de suma importância, pois serviram de base para realização do ensaio em barras de argamassa pelo método acelerado de acordo com a ABNT NBR 15577:2018-4.

### 5.1 Análise petrográfica- composição mineralógica dos agregados gnáissicos

Conforme apresentado na seção 4.2.3 os resultados de composição mineralógica foram fornecidos pela empresa de mineração Pedreira Santo Antônio, o ensaio de análise química, que foi realizado pela empresa SGS Geosol Laboratórios LTDA e os resultados são apresentados no Quadro 05.

Quadro 05 - Composição do gnaiss de Varginha por meio de análise Fluorescência de Raio-X, realizado pelo laboratório SGS Geosol Laboratórios LTDA

| Mineral  | %       |
|--|---------|
| SiO <sub>2</sub> (Sílica)                            | 61,225  |
| Ai <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Alumina)             | 15,925  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de ferro)      | 11,0115 |
| CaO (Óxido de cálcio)                                | 2,2375  |
| MgO (Óxido de magnésio)                              | 17,72   |
| TiO <sub>2</sub> (Dióxido de titânio)                | 0,8475  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Pentóxido de fósforo) | 0,165   |
| Na <sub>2</sub> O (Óxido de sódio)                   | 1,695   |
| K <sub>2</sub> O (Óxido de potássio)                 | 2,092   |
| MnO (Óxido de manganês)                              | 0,76    |
| LOI  | -0,4    |

Fonte: O Autor (2019).

Conforme a ABNT NBR 15577-3:2018 é possível classificar a primeira amostra do agregado como sendo potencialmente reativo ao RAA, já que apresenta estimativa de 61.225% de Sílica, sendo superior ao limite de 5% estabelecido pela norma para ser classificado como potencialmente inócuo.

## 5.2 Massa específica do agregado.

Para realização da massa específica foi preciso da massa do agregado seco e submersa. Obtendo-se o seguinte conforme quadro 06 abaixo:

Quadro 06 - Massa do agregado

| <b>Seco</b> | <b>Submersa</b> |
|-------------|-----------------|
| 500,99g     | 328,3g          |

Fonte: O Autor (2019).

Com isso, foi possível obter a massa específica do agregado de acordo com a equação 04:

(06)

$$d = \frac{500,99}{500,99 - 328,3} = 2,9 \text{ g/cm}^3$$

## 5.3 Equivalência alcalina do cimento

Para fins de estudo para melhor compreensão, foi determinado alcalinidade dos dois tipos de cimento CPM e o CPV-ARI. No qual, realizou algumas análises químicas com ênfase no equivalente químico, em que foram feitas no laboratório do IPT, mostrado na tabela 07, realizado pela Professora Doutora Alessandra Lorenzetti de Castro, docente no departamento de engenharia e de estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Tabela 09- Análise química do cimento com ênfase no equivalente alcalino.

| <b>Determinações</b>  | <b>Resultado, em %</b> |                     |
|---|------------------------|---------------------|
|   | <b>Cimento CP III</b>  | <b>Cimento CP V</b> |
| Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)                            | 0,23                   | 0,14                |
| Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)                          | 0,51                   | 0,71                |
| Equivalente alcalino (em Na <sub>2</sub> O) <sup>Nota 2</sup> | 0,57                   | 0,61                |

Nota 2: Equivalente alcalino (em Na<sub>2</sub>O) = % Na<sub>2</sub>O + 0,6587 x % K<sub>2</sub>O.

Fonte: (Adaptado do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2019).

Conforme foram apresentados os resultados a equivalência alcalina dos dois cimentos estão próximos, o que tende a não influenciar tanto nos resultados do RAA nas barras de argamassa.

#### 5.4 Verificação da expansão das barras

As verificações de cada barra foram feitas do dia 1 ao dia 28, sendo o primeiro dia de medição com 0,0 mm de expansão e as medidas seguintes com sua expansão referente.

As leituras das barras de argamassa com cimento CPIII estão representadas no quadro 07.

Quadro 07 - Leitura das barras com CPIII

| IDADE<br>(Dias) | BARRA<br>PADRÃO<br>(mm) | Corpos de<br>Prova | TRAÇO            |        |        |            |                 |                |
|-----------------|-------------------------|--------------------|------------------|--------|--------|------------|-----------------|----------------|
|                 |                         |                    | CP III - GNAISSE |        |        |            |                 |                |
|                 |                         |                    | ZERO             | MEDIDO | REAL   | $\Sigma/n$ | $\Delta L$ (mm) | $\Delta L$ (%) |
| 0               | -5,520                  | CP 1               | 0,026            | -6,461 | -6,487 | -6,201     | 0,000           | 0,00%          |
|                 |                         | CP 2               | 0,037            | -6,273 | -6,310 |            |                 |                |
|                 |                         | CP 3               | 0,031            | -5,775 | -5,806 |            |                 |                |
| 7               | -5,559                  | CP 1               | -0,003           | -6,543 | -6,540 | -6,259     | 0,097           | 0,03%          |
|                 |                         | CP 2               | -0,006           | -6,358 | -6,352 |            |                 |                |
|                 |                         | CP 3               | -0,006           | -5,890 | -5,884 |            |                 |                |
| 14              | -5,566                  | CP 1               | -0,003           | -6,552 | -6,549 | -6,292     | 0,137           | 0,05%          |
|                 |                         | CP 2               | 0,001            | -6,425 | -6,426 |            |                 |                |
|                 |                         | CP 3               | -0,002           | -5,902 | -5,900 |            |                 |                |
| 21              | -5,573                  | CP 1               | -0,011           | -6,582 | -6,571 | -6,312     | 0,164           | 0,06%          |
|                 |                         | CP 2               | 0,002            | -6,452 | -6,454 |            |                 |                |
|                 |                         | CP 3               | -0,003           | -5,915 | -5,912 |            |                 |                |
| 28              | -5,563                  | CP 1               | 0,005            | -6,592 | -6,597 | -6,327     | 0,169           | 0,06%          |
|                 |                         | CP 2               | -0,002           | -6,460 | -6,458 |            |                 |                |
|                 |                         | CP 3               | 0,002            | -5,923 | -5,925 |            |                 |                |

Fonte: O Autor (2019)

Com os dados apresentados das barras de argamassa de CPIII, não houve expansão significativa, pois aos 285 dias a expansão total da barra não ultrapassou a 0,06%, mesmo tendo uma expansão de 0,03% aos 7 dias ao longo das seguintes medições a sua expansibilidade foi bem menor que a primeira, não mantendo um índice expansivo ativo.

As leituras de expansibilidade das barras de argamassa com cimento CPV-ARI são apresentadas no quadro 08.

Quadro 08 - Leitura das barras com CPV-ARI

| IDADE<br>(Dias) | BARRA<br>PADRÃO<br>(mm) | TRAÇO           |                |        |        |        |       |            |                    |                   |
|-----------------|-------------------------|-----------------|----------------|--------|--------|--------|-------|------------|--------------------|-------------------|
|                 |                         | Corpos de Prova | CP V - GNAISSE |        |        |        |       | $\Sigma/n$ | $\Delta L$<br>(mm) | $\Delta L$<br>(%) |
|                 |                         |                 | ZERO           | MEDIDO | REAL   |        |       |            |                    |                   |
| 0               | -5,520                  | CP 1            | 0,025          | -6,029 | -6,054 | -6,049 | 0,000 | 0,00%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | 0,025          | -6,279 | -6,304 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | 0,026          | -5,764 | -5,790 |        |       |            |                    |                   |
| 7               | -5,559                  | CP 1            | -0,002         | -6,118 | -6,116 | -6,110 | 0,100 | 0,04%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | -0,003         | -6,366 | -6,363 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | 0,002          | -5,850 | -5,852 |        |       |            |                    |                   |
| 14              | -5,566                  | CP 1            | -0,001         | -6,231 | -6,230 | -6,288 | 0,285 | 0,10%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | 0,001          | -6,528 | -6,529 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | 0,001          | -6,104 | -6,105 |        |       |            |                    |                   |
| 21              | -5,573                  | CP 1            | -0,003         | -6,284 | -6,281 | -6,323 | 0,327 | 0,11%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | -0,001         | -6,575 | -6,574 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | 0,001          | -6,113 | -6,114 |        |       |            |                    |                   |
| 28              | -5,563                  | CP 1            | 0,001          | -6,347 | -6,348 | -6,360 | 0,354 | 0,12%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | 0,004          | -6,598 | -6,602 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | 0,007          | -6,123 | -6,130 |        |       |            |                    |                   |

Fonte: O Autor (2019)

Assim, a expansão média aos 28 dias das barras de argamassa utilizando o cimento CPV-ARI foi de 0,354mm dando uma expansibilidade de 0,12%.

As leituras de expansibilidade das barras de argamassa com cimento CPV-ARI realizado com os grãos menores quadro 09.

Quadro 09 - Leitura das barras com CPV-ARI modificado

| IDADE<br>(Dias) | BARRA<br>PADRÃO<br>(mm) | TRAÇO           |         |        |        |        |       |            |                    |                   |
|-----------------|-------------------------|-----------------|---------|--------|--------|--------|-------|------------|--------------------|-------------------|
|                 |                         | Corpos de Prova | GNAISSE |        |        |        |       | $\Sigma/n$ | $\Delta L$<br>(mm) | $\Delta L$<br>(%) |
|                 |                         |                 | ZERO    | MEDIDO | REAL   |        |       |            |                    |                   |
| 0               | -4,177                  | CP 1            | -0,002  | -4,529 | -4,527 | -4,503 | 0,000 | 0,000      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | -0,002  | -3,991 | -3,989 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | -0,002  | -4,996 | -4,994 |        |       |            |                    |                   |
| 7               | -4,192                  | CP 1            | -0,001  | -0,001 | -6,097 | -5,141 | 0,292 | 0,10%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | -0,002  | -0,002 | -4,123 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | 0,001   | 0,001  | -5,203 |        |       |            |                    |                   |
| 14              | -4,360                  | CP 1            | -0,001  | -5,254 | -5,253 | -4,681 | 0,361 | 0,13%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | -0,006  | -3,998 | -3,992 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | -0,006  | -4,804 | -4,798 |        |       |            |                    |                   |
| 21              | -4,170                  | CP 1            | -0,006  | -5,996 | -5,990 | -4,967 | 0,471 | 0,17%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | -0,002  | -3,989 | -3,987 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | -0,003  | -4,928 | -4,925 |        |       |            |                    |                   |
| 28              | -4,166                  | CP 1            | 0,002   | -6,270 | -6,272 | -5,108 | 0,615 | 0,21%      |                    |                   |
|                 |                         | CP 2            | -0,001  | -3,979 | -3,978 |        |       |            |                    |                   |
|                 |                         | CP 3            | 0,001   | -5,072 | -5,073 |        |       |            |                    |                   |

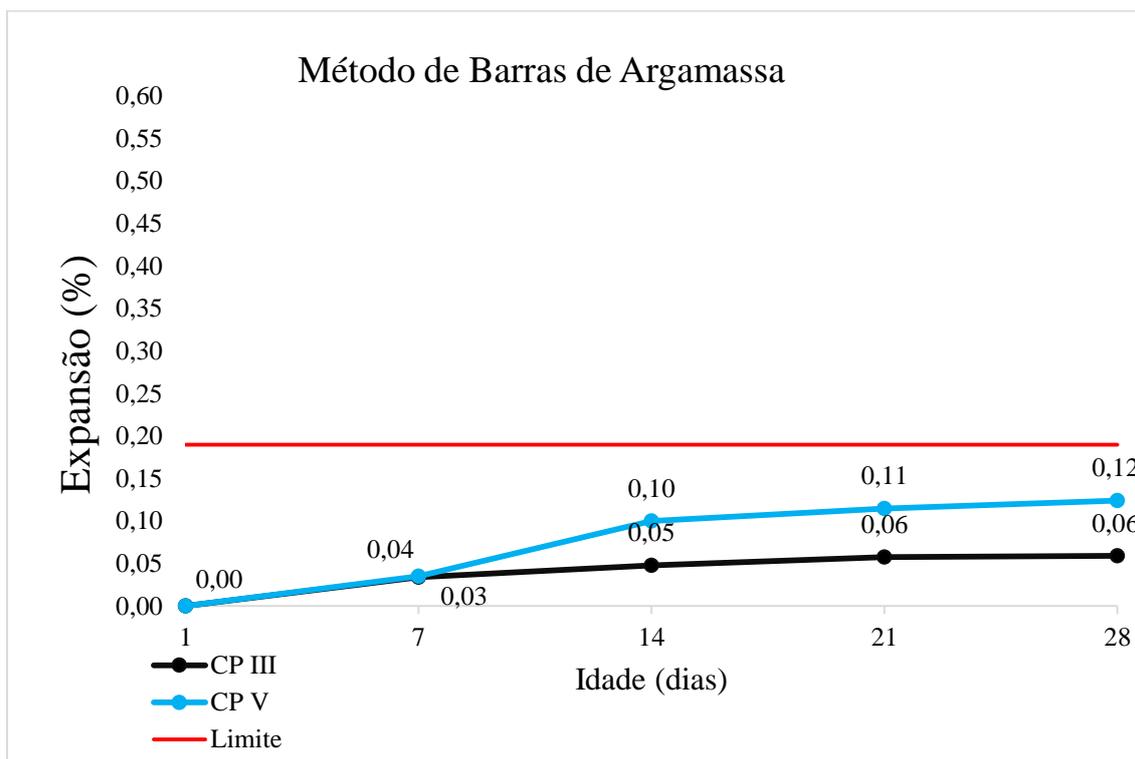
Fonte: O Autor(2019)

Como foram apresentados os dados das barras de CPV-ARI modificado, é observado que o pico de reativo de expansão nos primeiros 7 dias é realmente alto comparado as outras barras, e continua ao longo das próximas medições coisas que não houveram nas outras amostragens.

Os motivos relacionados ao maior grau de expansão pode estar ligado a diminuição granulométrica do agregado, o que deixa a os minerais reativos mais expostos a possível reação álcali-agregado, juntamente com adição do aditivo que já é um elemento a mais na formação da argamassa e que está presente nos locais onde tiveram reação RAA nas estruturas.

O Gráfico 01 mostra as expansões medias nas barras de CPIII e CPV-ARI ao decorrer dos 28 dias.

Gráfico 01 -Leituras de expansibilidade das barras com CPIII e CPV-ARI



Fonte: O Autor (2019)

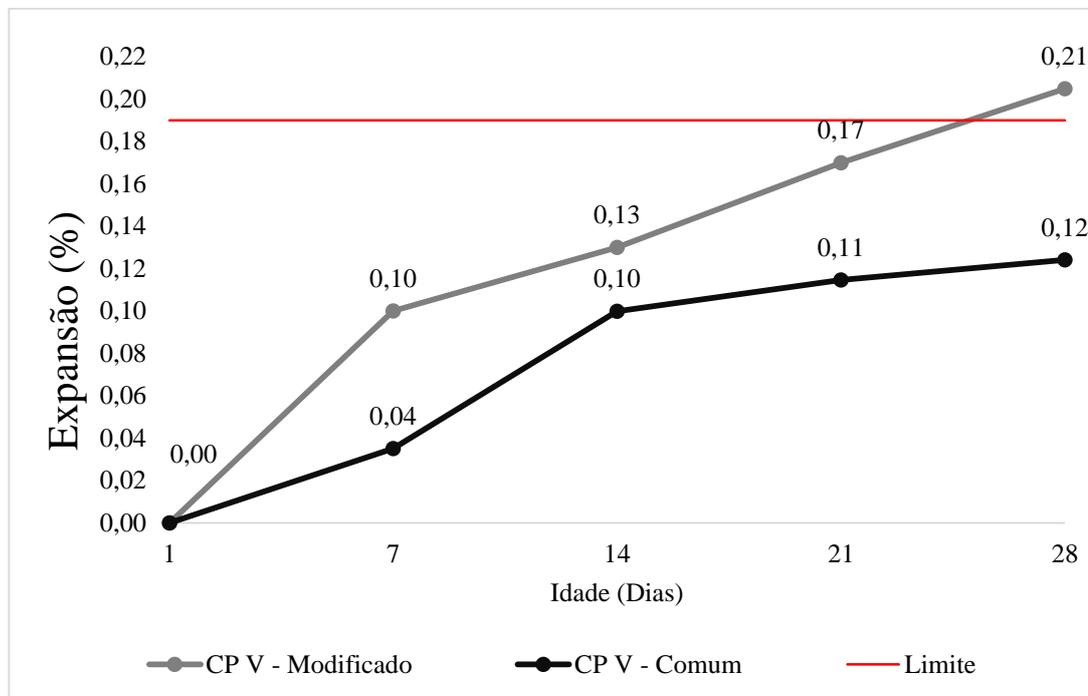
Entretanto por mais que as barras tenham sofrido variações nos seus comprimentos, não foram significativas para torná-las reativas, tanto nas barras de CPIII que chegaram a atingir a expansão de 0,169 mm, quanto nas barras de CPV-ARI, que mesmo obtendo expansão sendo superior as barras de CPIII, chegando 0,354 mm, totalizando 0,12% de porcentagem de expansão. Pois para ter o grau de reatividade R1 a variação deveria ser maior que 0,19%. Então, os dois tipos de barras são menores, são caracterizados como reativamente inócuas.

Um ponto observado que as barras de CPV-ARI ainda possuem a tendência de expandir mais, mesmo que diminuindo intensidade podem chegar à expansão superior a 0,19% que é o primeiro grau de reatividade. Mas que por esse método escolhido é considerado inócuo.

Analisando outro estudo feito por Sanches (2011), que foi realizado com o mesmo agregado Gnaisse, extraído de uma mineradora de Recife (PE), estudado por outro método de verificação de expansão, o Método Acelerado em Prismas de Concreto referente a norma ABNT NBR 15577:2018, onde o agregado estudado recebeu a característica de potencial reativo.

O Gráfico 02 mostra as expansões medias nas barras de CPV-ARI e CPV-ARI modificado ao decorrer dos 28 dias.

Gráfico 02 - Leituras de expansibilidade das barras com CPIII e CPV-ARI



Fonte: O Autor (2019)

Como analisado no gráfico 02 houve um grau de reatividade R1, que é quando a expansão passa 0,19% nas barras de argamassa, nas barras de CPV- Modificado tendo a expandido 0,615 mm totalizando 0,21%. Comparando a as barras de CPV- Comum houve um aumento significativo, pois ela tendia a crescer e expandir a mais com tempo e com pouca alteração na sua composição diminuindo a granulometria, com adição do aditivo para não alterar o fator água e cimento, acabou tornando-se reativa.

## 6. CONCLUSÃO

A partir dos ensaios, e os dados coletados, conclui-se que a realização do objetivo principal do presente trabalho foi executada com sucesso, uma vez que a verificação do nível reativo das barras de argamassa pelo método acelerado foi constatada ao longo da pesquisa.

Em relação à escolha dos agregados, destaca-se que o elegido foi o gnaisse devido à grande quantidade existente na região do município de Varginha, Minas Gerais. Ainda, visando a melhor classificação do agregado, optou-se pela realização de ensaio de massa específica, análise petrográfica ensaio fornecido pela Pedreira Santo Antônio que foi realizada pela empresa SGS Geosol Laboratórios LTDA, bem como de lavagem do material e separação granulométrica, para composição do ensaio principal.

O cimento utilizado na pesquisa, a escolha recaiu sobre o CPIII (Cimento Portland III), o qual tende a ter taxa de alcalinidade menor e o CPV-ARI (Cimento Portland V), sendo ambos da marca *Holcim*, à fim de experimentar menor variação na qualidade da produção do cimento. Entretanto, como as barras de CPV-ARI tenderam a tornar reativas. Então, o procedimento foi realizado novamente com o mesmo cimento, portanto, alterou-se sua granulometria para tamanhos menores, o que possivelmente deixou os minerais reativos do agregado mais expostos, e, também, adicionou-se o aditivo hiperplastificante Glenium 54.

Na determinação alcalina dos cimentos CPIII e CPV-ARI, realizou-se uma análise química no laboratório do IPT, pela Professora Doutora Alessandra Lorenzetti de Castro, visando a porcentagem de Óxido de Sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), junto com Óxido de Potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), para realizar a determinação alcalina. Porém, os resultados das duas amostras de cimento deram muito próximas, mas tendo como CPV mais alcalino, o que possivelmente não gera tanta interferência no RAA.

Com referência à produção das barras de argamassa, destaca-se que toda confecção foi realizada seguindo os critérios normativos regulamentados, à fim de tentar diminuir a imprecisão dos ensaios antecessores. Isso posto, relata-se a maior dificuldade no tempo da mistura, a qual foi refeita algumas vezes para se chegar ao tempo correto.

No processo de término da fabricação, iniciou-se a etapa de medição, cuja verificação de medidas foi realizada e percebeu-se que as barras com cimento CPIII não tiveram expansão significativas. Por outro lado, as barras de cimento CPV-ARI a expansão foi significativa, mas o grau de reatividade permaneceu inócuo. Entretanto, nas

barras de cimento CPV-ARI modificado houve maior grau reativo em relação as anteriores, atingindo o grau reativo R1.

Diante do exposto, a partir da análise dos dados apresentados pelos ensaios produzidos, conclui-se que o agregado gnaisse, juntamente com os dois tipos de cimento utilizados na pesquisa, em separado, apresentou o nível reativo significativo só nas barras de CPV-ARI modificado, o que justifica a adoção de medidas preventivas com o intuito de evitar a reação álcali-agregado.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1**: Agregados — Reatividade álcali-agregado .Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018, julho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4**: Agregados — Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro: ABNT, 2018, julho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005, agosto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-1**: -1 Agregados — Análise petrográfica de agregado para concreto .Parte 1 : Agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 2009, setembro.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 53**: Agregado graúdo — Determinação de massa específica ,massa específica aparente e absorção de água. Mercosul.2009,janeiro.

COUTO, T. **Reação álcali-agregado - estudo do fenômeno em rochas silicosas**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Goiás. 2008.

TOUMA, W.E, FOWLER, D. e CARRASQUILLO, R.L.“**Alkali-silica reaction in Portland cement concret: testing methods and mitigation alternatives**”, ICAR, Research Report ICAR 301-1F, USA,2001.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos Mecanismos da Reação Álcali- Agregado – Efeito da Cinza de Casca de Arroz e da Sílica Ativa**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. 1999.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela Reação álcali- agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Dissertação (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia Civil 2005.

SILVEIRA, A. L.; GUIMARÃES, E. M.; LENHARO, S. L. R.; HASPARYK, N. P.; CHIOSSI, W. C.; BITTENCOURT, R. M. **Investigação da reação álcali-agregado em rochas 80 carbonáticas**. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 2006, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

FRÝBORT, A. et al. **Variations in the composition and relations between alkali-silica gels and calcium silicate hydrates in highway concrete**. Materials Characterization, [s.l.], v. 137, p.91-108, mar. 2018.

KWAN, Albert K. H.; MORA, Carlos. F.; CHAN, H. C. **Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing**. Cement and Concrete Research, v. 29, N° 9, p. 1403-1410, 1999.

KWAN, Albert K. H.; FUNG, Wilson W. S.; WONG, Henry H. C. **Water film thickness, flowability and rheology of cement–sand mortar**. Advances in Cement Research 22, N° 1, p. 3–14. 2010.

FERGUSON, Samuel P. Sphere packings V. 1997. 54 f. Tese (Doutorado) - University of Michigan, 1997. Disponível em: Acesso em: 07 abr. 2016.

GOLTERMANN, Pear; JOHANSEN, Vagn; PALBØL, Lars. **Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix**. ACI Materials Journal 94-M51, p. 434-442, 1997.

CASTRO, Alessandra L. de; PANDOLFELLI, Victor C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica. 55 (2009) 18-32.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Pini, 2000.

SANCHES, Leandro; KUPERMAN, Selmo; HELENE, Paulo. **Using the accelerated Brazilian concrete prism test (ABCPT) to evaluate alkali aggregate reaction (AAR).** Ibracon. 2011.