



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO – VERIFICAÇÃO DA REATIVIDADE  
DO SEIXO, FRENTE AO ÁLCALIS DO CIMENTO, DAS PRINCIPAIS  
JAZIDAS FORNECEDORAS DE AGREGADO GRAÚDO PARA A  
REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.**

*Anderson Francisco Alencar Cardoso*

**Belém/Pará**

**2008**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO – VERIFICAÇÃO DA REATIVIDADE  
DO SEIXO, FRENTE AO ÁLCALIS DO CIMENTO, DAS PRINCIPAIS  
JAZIDAS FORNECEDORAS DE AGREGADO GRAÚDO PARA A  
REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.**

*Anderson Francisco Alencar Cardoso*  
*Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza*

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de pós-graduação da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Construção Civil e estruturas.

**Belém/Pará**

**2008**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO – VERIFICAÇÃO DA REATIVIDADE  
DO SEIXO, FRENTE AO ÁLCALIS DO CIMENTO, DAS PRINCIPAIS  
JAZIDAS FORNECEDORAS DE AGREGADO GRAÚDO PARA A  
REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.**

*Anderson Francisco Alencar Cardoso*

Dissertação de mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

*Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza*

*Orientador / UFPA*

*Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Isaura Nazaré Lobato Paes*

*UNB – Universidade de Brasília/UFPA*

*Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Ângela Borges Masuero*

*UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

*Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Luciana Ericeira Lopes*

*COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro*

**Dezembro/ 2008**

## DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar dedico este trabalho à minha família, meus pais e meu irmão, por serem as pessoas que mais amo e admiro, e por achar que toda a força de vontade, dedicação e garra para superar as dificuldades, tanto na vida profissional quanto pessoal, se deve a pessoas assim como eles, que apesar de todos os problemas estão sempre ao nosso lado nos apoiando e dando incentivo para alcançar-mos sempre nossos objetivos.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza, do Centro Tecnológico de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, por ter aceito o meu projeto tão prontamente e por tê-lo lapidado, polido e o adequado até chegarmos nesta pesquisa. Sua competência e vasta experiência foram fundamentais para o desenvolvimento de todo o projeto.

Agradeço também à Universidade Federal do Pará e ao corpo de professores do curso de Mestrado, pelo conhecimento a mim transmitido. Não posso esquecer de agradecer também ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do museu EMILIO GOELDI, ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, as estâncias e as jazidas que forneceram os materiais para o ensaio e a toda a equipe do laboratório de materiais, que sempre foram atenciosos e prestativos em todos os momentos da pesquisa, desde o armazenamento do material até a conclusão dos ensaios.

A todos os membros da minha família, em especial aos meus pais Ângelo e Maria do Socorro, que me deram apoio e incentivo não só durante este trabalho, mas ao longo de toda a minha vida.

Impossível não dá destaque ao meu irmão e amigo Ângelo Júnior, o qual tenho como exemplo de vida e que sempre torceu muito por mim, não só nos estudos mais em todo minha vida pessoal e profissional.

E não poderia esquecer a pessoa mais importante, o qual sem ele não seria capaz de chegar a onde cheguei, **OBRIGADO MEU DEUS!**

*“O conhecimento que se baseia em um único efeito como se ele fosse um todo, sem razão sem fundamento, na verdade é limitado e portanto trivial. “*

P. Kumar Mehta, 1985. **CONCRETO** – Estruturas, Propriedades e Materiais.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>1.1. Importância da Pesquisa.....</b>	<b>04</b>
<b>1.2. Objetivo da Pesquisa.....</b>	<b>07</b>
<b>1.3. Limitação da Pesquisa.....</b>	<b>07</b>
<b>1.4. Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>08</b>
<b>2. A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....</b>	<b>09</b>
<b>2.1. Histórico de casos da reação álcali-agregado.....</b>	<b>09</b>
<b>2.2. Definição da reação álcali-agregado.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1. Tipos de reação álcali-agregado.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1.1. Reação álcali-sílica.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1.2. Reação álcali-silicato.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.1.3. Reação álcali-carbonato.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3. Mecanismo da reação.....</b>	<b>28</b>

<b>2.4. Fatores que influenciam a RAA.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.1. Teor de álcalis do cimento.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.2. Agregados.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4.3. Umidade e temperatura.....</b>	<b>42</b>
<b>2.4.4. Teor de ar incorporado.....</b>	<b>43</b>
<b>2.4.5. Aditivos químicos.....</b>	<b>44</b>
<b>2.4.6. Adições minerais.....</b>	<b>45</b>
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1. Captação do material utilizado no trabalho.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2. Caracterização das amostras coletadas.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3. Cimento utilizado para os ensaios de reatividade.....</b>	<b>50</b>
<b>3.4. Determinação da reatividade potencial.....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.1. Preparo das amostras.....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.2. Método acelerado.....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.3. Método Químico.....</b>	<b>58</b>
<b>3.5. Análise da microestrutura.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5.1. Análise petrográfica.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</b>	<b>62</b>
<b>3.5.2.1. Procedimento de ensaio do MEV.....</b>	<b>63</b>
<b>4. RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1. Caracterização das amostras.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.1. Composição granulométrica.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.2. Determinação da massa unitária.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.3. Determinação da massa específica.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.4. Ensaio de abrasão “Los Angeles”.....</b>	<b>68</b>

<b>4.2. Reatividade potencial.....</b>	<b>69</b>
<b>4.2.1. Método acelerado.....</b>	<b>69</b>
<b>4.2.2. Método Químico.....</b>	<b>75</b>
<b>4.3. Análise da microestrutura.....</b>	<b>79</b>
<b>4.3.1. Análise petrográfica.....</b>	<b>79</b>
<b>4.3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</b>	<b>81</b>
<b>4.4. Síntese dos resultados e mapeamento das jazidas.....</b>	<b>91</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>5.1. Sugestões de novas pesquisas.....</b>	<b>95</b>
<b>6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>96</b>

## **ANEXOS**

<b>ANEXO A – Modelo da planilha de composição granulométrica.....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO B – Modelo das planilhas de ensaio de reatividade potencial pelo método acelerado.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO C – Modelo do gráfico de verificação da reatividade potencial pelo método químico.....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01</b>	Pilar do vertedouro da Barragem UHE Porto Colômbia (PERSONAL, 2005).....	11
<b>Figura 02</b>	a) Bloco de Fundação da Ponte Paulo Guerra – Recife; b) Gel exsudado a partir de uma fissura na superfície do concreto da galeria de drenagem da UHE Furnas (PERSONAL, 2005).....	15
<b>Figura 03</b>	Estrutura tetraédrica da sílica (HASPARYK, 1999).....	20
<b>Figura 04</b>	Estrutura da sílica no plano, mostra da superfície não hidratada (PAULON, 1981).....	21
<b>Figura 05</b>	Superfície hidratada da sílica (PAULON, 1981).....	21
<b>Figura 06</b>	Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento (PAULON, 1981).....	22
<b>Figura 07</b>	Diagramas esquemáticos das etapas da reação álcali-sílica (WANG; GILLOTT, 1991).....	24
<b>Figura 08</b>	Reação de desdolitização (PAULON, 1981).....	27
<b>Figura 09</b>	Reação do carbonato de sódio com o cimento (PAULON, 1981).....	27
<b>Figura 10</b>	Representação esquemática do ataque de soluções alcalinas na sílica bem cristalizada (a) e fracamente cristalizada (b) (FERRARIS, 2000).....	30

<b>Figura 11</b>	Composição da solução porosa x tempo (DIAMOND, 1983).....	30
<b>Figura 12</b>	Mecanismo de formação do gel proveniente de RAA: a) formação do gel próximo ao agregado; b) movimentação do gel ao longo da pasta de cimento com absorção de íons cálcio; c) gel no estado sólido, apresentando algumas fissuras devido à retração (VEIGA et al., 1997a).....	32
<b>Figura 13</b>	Esquema de progressão e consequência da expansão da RAA (HOBBS, 1988).....	33
<b>Figura 14</b>	Textura, morfologia e composição de algumas rochas susceptíveis a RAA e características modelo de desenvolvimento da reação (IDORN et al., 1992).....	34
<b>Figura 15</b>	Resumo do processo da reação álcali-agregado (FERRARIS, 2000)....	35
<b>Figura 16</b>	Classificação do potencial da reação com relação entre a quantidade de álcalis e o consumo de cimento no concreto (OBERHOLSTER, et al., 1983).....	37
<b>Figura 17</b>	Expansão versus dimensões do agregado (BARONIO et al. – Citado em FERRARIS 2000).....	40
<b>Figura 18</b>	Expansão versus dimensões do agregado (HOBBS, 1988).....	41
<b>Figura 19</b>	Redução da expansão causada por RAA devido à substituição parcial de areia artificial de basalto por basalto pulverizado (CASTRO et al., 1997).....	41
<b>Figura 20</b>	Influência do teor de ar incorporado na relação expansão versus idade do concreto (HOBBS, 1988).....	43

<b>Figura 21</b>	Redução na expansão devido à reação álcali-sílica por utilização de pozolana (PAULON et al., 1982).....	45
<b>Figura 22</b>	Localização dos municípios fornecedores de agregado graúdo para região metropolitana de Belém (NOGUEIRA E CHAGAS, 2007).....	48
<b>Figura 23</b>	(a) Jazida Ramal do 15 localizada no município de Ourém; (b) Jazida São José localizada no município de Ourém; (c) Jazida Ameta localizada no município de Ourém; (d) Jazida Batuíra localizada no município de Ourém; (e) Jazida Mineração Z – Dantas localizada no município de Ourém; (f) Jazida Kataman localizada no município de Ourém; (g) Jazida WH Mineradora localizada no município de Ourém; (h) Jazida Mineradora MGM localizada no município de Capitão Poço.....	49
<b>Figura 24</b>	(a) Armazenamento do material após a etapa de britagem; (b) Processo de peneiramento do material em peneirador mecânico; (c) Peneiras estabelecidas na norma ASTM C – 1260 (1994); (d) Lavagem do material em água corrente; (e) Estufa utilizada para secagem do material; (f) Material armazenado em recipientes plásticos.....	53
<b>Figura 25</b>	(a) Argamassadeira utilizada no processo de confecção da argamassa; (b) Moldes metálicos utilizados para confecção dos corpos-de-prova...	55
<b>Figura 26</b>	(a) Aplicação do óleo mineral para facilitar no processo de desforma; (b) Compactação uniforme; (c) Rasadura e alisamento do corpo-de-prova; (d) Medição dos corpos-de-prova em relógio comparador.....	56
<b>Figura 27</b>	Reatores utilizados nos ensaios de reatividade pelo método químico, sendo um deles destinado ao ensaio em branco (referência).....	58
<b>Figura 28</b>	a) Reatores na estufa, os quais ficaram pelo período de 24 horas; b) Cadinho de Gooch de porcelana; c) Tubo de ensaio de 50 ml de capacidade e kitassato; d) Aparelho de vácuo utilizado na decantação da solução de NaOH.....	59

<b>Figura 29</b>	Lâminas delgadas utilizadas na análise petrográfica.....	61
<b>Figura 30</b>	Microscópio eletrônico de varredura utilizado na análise microscópica.....	63
<b>Figura 31</b>	Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Batuíra.....	70
<b>Figura 32</b>	Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Z–Dantas.....	70
<b>Figura 33</b>	Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Ameta.....	71
<b>Figura 34</b>	Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra MGM.....	71
<b>Figura 35</b>	Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra São José.....	72
<b>Figura 36</b>	Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Kataman.....	72
<b>Figura 37</b>	Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Ramal do 15.....	73
<b>Figura 38</b>	Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra WH.....	73
<b>Figura 39</b>	Gráfico de redução da alcalinidade (mmol/l) x sílica dissolvida (mmol/l) da amostra Batuíra (a) e da amostra Z – Dantas (b).....	76
<b>Figura 40</b>	Gráfico de redução da alcalinidade (mmol/l) x sílica dissolvida (mmol/l) da amostra Ameta (a) e da amostra MGM (b).....	76
<b>Figura 41</b>	Gráfico de redução da alcalinidade (mmol/l) x sílica dissolvida (mmol/l) da amostra São José (a) e da amostra Kataman (b).....	77
<b>Figura 42</b>	Gráfico de redução da alcalinidade (mmol/l) x sílica dissolvida (mmol/l) da amostra Ramal do 15 (a) e da amostra WH (b).....	77
<b>Figura 43</b>	Fissuras orientadas presentes na superfície do seixo da jazida MGM...	79

<b>Figura 44</b>	Análise petrográfica realizada no corpo-de-prova prismático da amostra M.G.M, utilizada no ensaio de potencialidade reativa pelo método acelerado.....	80
<b>Figura 45</b>	(I) Vista geral da amostra <b>Ameta</b> submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra <b>Ameta</b> ; (III) Ponto escolhido para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (IV) Espectro do <b>ponto 01</b> da amostra <b>Ameta</b> .....	81
<b>Figura 46</b>	(I) Vista geral da amostra <b>Batuíra</b> submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra <b>Batuíra</b> ; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra <b>Batuíra</b> ; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do <b>ponto 01</b> da amostra <b>Batuíra</b> ; (VI) Espectro do <b>ponto 02</b> da amostra <b>Batuíra</b> .....	82
<b>Figura 47</b>	(I) Vista geral da amostra <b>Kataman</b> submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra <b>Kataman</b> ; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra <b>Kataman</b> ; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do <b>ponto 01</b> da amostra <b>Kataman</b> ; (VI) Espectro do <b>ponto 02</b> da amostra <b>Kataman</b> .....	83
<b>Figura 48</b>	(I) Vista geral da amostra <b>MGM</b> submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra <b>MGM</b> ; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra <b>MGM</b> ; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do <b>ponto 01</b> da amostra <b>MGM</b> ; (VI) Espectro do <b>ponto 02</b> da amostra <b>MGM</b> .....	84

- Figura 49** (I) Vista geral da amostra **Ramal do 15** submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **Ramal do 15**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **Ramal do 15**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **Ramal do 15**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **Ramal do 15**.....85
- Figura 50** (I) Vista geral da amostra **São José** submetido ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **São José**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **São José**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **São José**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **São José**.....86
- Figura 51** (I) Vista geral da amostra **WH** submetido ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **WH**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **WH**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **WH**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **WH**.....87
- Figura 52** (I) Vista geral da amostra **Z-Dantas** submetido ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **Z-Dantas**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **Z-Dantas**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **Z-Dantas**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **Z-Dantas**.....88
- Figura 53** Mapeamento das principais jazidas fornecedoras de seixo de Belém...92

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b>	Ocorrências de reação álcali-agregado no mundo (KIHARA, SBRIGHI NETO & KUPERMAN, 1998).....	10
<b>Tabela 02</b>	Ocorrências de RAA em estruturas hidráulicas no Brasil (KIHARA, SBRIGHI NETO & KUPERMAN, 1998).....	12
<b>Tabela 03</b>	Componentes reativos dos agregados (Concreto – Ensaio e Propriedades. Equipe de Furnas, 1997).....	39
<b>Tabela 04</b>	Jazidas fornecedoras de amostras (agregado graúdo).....	47
<b>Tabela 05</b>	Ensaio de caracterização dos agregados graúdos.....	50
<b>Tabela 06</b>	Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CPV-ARI.....	51
<b>Tabela 07</b>	Frações especificadas para preparo do material (Norma ASTM C-1260, 1994).....	52
<b>Tabela 08</b>	Porcentagens de cada fração utilizadas na confecção das argamassas (Norma ASTM C – 1260, 1994).....	54
<b>Tabela 09</b>	Traço das argamassas em massa, segundo a ASTM C – 1260 (1994).....	55
<b>Tabela 10</b>	Resumo dos resultados de diâmetro máximo e módulo de finura do ensaio de composição granulométrica.....	64
<b>Tabela 11</b>	Resultados obtidos do ensaio de determinação de massa unitária.....	66

<b>Tabela 12</b>	Resultados obtidos do ensaio de determinação da massa específica...	67
<b>Tabela 13</b>	Resultado dos ensaios de resistência à abrasão “Los Angeles”.....	68
<b>Tabela 14</b>	Expansões aos 16 e 28 dias (em %) para cada amostra.....	69
<b>Tabela 15</b>	Valores de sílica dissolvida (em mmol/l) e redução da alcalinidade (em mmol/l) para cada amostra.....	75
<b>Tabela 16</b>	Análise das amostras ensaiadas - EDS.....	90
<b>Tabela 17</b>	Resumo dos resultados dos ensaios de determinação da potencialidade reativa.....	91

## RESUMO

A reação álcali-agregado é um fenômeno que tem como causa uma reação química que ocorre entre os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado, podendo torna-se expansiva na presença de umidade. Tendo em vista a prevenção deste tipo de reação, esta pesquisa teve por objetivo principal fazer uma avaliação dos agregados graúdos das principais jazidas fornecedoras da região metropolitana de Belém. E como objetivo específico, caracterizar, classificar e delimitar as jazidas, através de seu mapeamento, em que podem ser encontrados agregados reativos e inócuos. Para isso, foram empregados os ensaios de determinação da reatividade potencial pelos métodos acelerado e químico, análise petrográfica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O método acelerado consistiu em realizar medições de expansões diárias em corpos-de-prova prismáticos. Já o método químico, teve por finalidade avaliar a reatividade potencial das amostras através da relação entre a concentração de sílica dissolvida e a redução da alcalinidade. Na análise petrográfica, o seixo foi reduzido a um tamanho representativo para que pudesse ser analisado no microscópio óptico de luz transmitida. Enquanto que no MEV, foi necessário a retirada de um pequeno pedaço do corpo-de-prova prismático de cada amostra usada no ensaio acelerado.

Com a realização destes ensaios foi possível concluir que todas as amostras analisadas apresentaram-se inócuas. Fato este verificado através dos índices de expansão apresentados no ensaio acelerado, onde os mesmos conservaram-se abaixo de 0,10% aos 16 dias de idade. E dos resultados apresentados no ensaio químico, os quais manifestaram percentuais de sílica dissolvida e de redução da alcalinidade, satisfatórios ao não surgimento da reação álcali-agregado. Em paralelo a estes ensaios, foi realizada uma análise de microestrutura, onde constatou-se, através da petrografia e do MEV, que o seixo coletado das jazidas de Ourém e Capitão Poço, apresentava-se como um mineral de quartzo de estrutura bem definida, sem extinção ondulante e sem manifestação do gel expansivo nas amostras. Fato este que pôde ser comprovado através das imagens fornecidas. Com isso, é possível afirmar que o seixo que fornece a nossa região, está apto ao uso. Pois, não apresenta problemas quanto à reatividade.

Palavra chave: Concreto, durabilidade, reação álcali-agregado.

## ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction is a phenomenon that has caused a chemical reaction that occurs between the alkali hydroxides from cement and some reactive minerals present in the aggregate and may become extensive in the presence of moisture. In order to prevent this type of reaction, this research aimed to make an assessment of the main aggregates of the big main sources supplying the metropolitan region of Belém. And how specific objective, characterize, classify and define the fields, through its mapping, which can be found in reactive and innocuous aggregates. For this, the tests were used to determine the potential reactivity by accelerated methods and chemical, petrographic analysis and scanning electron microscopy (SEM).

The accelerated method was to perform rapid measurements of expansions in daily body-of-proof prismatic. But the chemical method, was to evaluate the potential reactivity of the samples through the relationship between the concentration of dissolved silica and the reduction of alkalinity. In the petrographic analysis, the pebble was reduced to a size that could be representative for the analysis of transmitted light optical microscope. While the SEM, it was necessary to remove a small piece of the body-of-prismatic test of each sample used in the accelerated test.

With the completion of these tests was possible to conclude that all samples showed up safe. Which is verified through the expansion rates presented in the accelerated test, where they are kept below 0.10% at 16 days of age. And the results presented in the test chemical, which indicated the percentage of dissolved silica and alkalinity reduction, satisfactory to the non appearance of alkali-aggregate reaction. In parallel to these tests, was performed an analysis of microstructure, where found by petrography and SEM, the pebble collected from deposits of Ourém and Capitão Poço, is a mineral of the quartz structure well defined, without extinction undulating and without manifestation of expansive gel in the samples. A fact that could be proven through the images provided. Therefore, we can say that the pebble that provides our region, is fit for use. Therefore, presents no problems regarding the reactivity.

Keyword: concrete, durability, alkali-aggregate reaction.

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é considerado um dos materiais mais utilizados no mundo, devido a sua vasta aplicação e facilidade com que elementos estruturais podem ser executados numa variedade de formas e tamanhos, assim como o baixo custo e a maior disponibilidade, quando comparado a outros materiais. Além dessas vantagens, têm-se o fato desse material apresentar normalmente boas características de resistência e durabilidade, que o credencia as mais diversas aplicações (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Porém, esse material aparentemente tão durável também sofre interações ambientais e, conseqüentemente, surgem mudanças em sua microestrutura e em suas propriedades com o passar do tempo. Em função disso a durabilidade do concreto passou então a ser questionada nestas ultimas décadas, com a constatação de que mesmo adequadamente projetado e executado, o concreto começava a dar sinais de deterioração após um determinado período.

Com base nessa constatação, verificou-se que são vários os processos de deterioração que interferem na qualidade e durabilidade do concreto, podendo ser divididos em processos físicos e químicos. Dentre os principais processos físicos de deterioração do concreto pode-se destacar a fissuração devido à corrosão das armaduras e a desagregação devido à corrosão do concreto (por lixiviação ou por reação iônica). Em quanto que nos processos químicos, podemos citar a reação álcali-agregado (RAA) e ataques por sulfatos. No caso da RAA, tem-se que a mesma foi reconhecida por STANTON (1940), que verificou que alguns constituintes mineralógicos de agregados são reativos e responsáveis pelo crescente número de ocorrências de deterioração de pavimentos de concreto, obras de arte (pontes e viadutos) e estruturas hidráulicas. STANTON (1940) constatou também que a RAA é um fenômeno que tem como causa a reação química que ocorre entre os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado.

Como conseqüência da RAA, temos a deterioração do concreto, pois os produtos formados tornam-se expansivos na presença de umidade, originando fissuração, diminuição da resistência, aumento da permeabilidade e, conseqüentemente, a diminuição da durabilidade, podendo em último estágio levar a

ruptura da estrutura. Segundo TAYLOR (1990), a RAA pode ocorrer em questão de dias ou apenas após vários anos. Este fato tem estimulado o desempenho de pesquisadores no sentido de entender o mecanismo desta reação e seus fatores influentes. Com isso, tem-se buscado pesquisas cada vez mais avançadas com o objetivo de se obter o melhor desempenho e durabilidade das estruturas de concreto perante este fenômeno.

Segundo HASPARYK (1998), a maioria dos casos relatados, em que a ocorrência da reação foi constatada, envolveu obras hidráulicas. A constância do aparecimento da RAA nesse tipo de estrutura pode ser justificado, segundo a autora, pelo maior número de variações de temperatura e umidade em que as mesmas são expostas. Estes conjuntos de fatores tornam estas estruturas mais suscetíveis de apresentarem esse tipo de reação.

Contudo, não só obras hidráulicas podem sofrer este tipo de deterioração, visto que, partindo-se da própria definição de reação álcali-agregado, qualquer estrutura de concreto, que tenha agregado reativo e esteja localizada em ambiente úmido pode ser deteriorado por este tipo de reação, como consta em alguns relatos encontrados na literatura (HOBBS, 1988; HEIJNEN, 1992; THAULOW et. al., 1996; entre outros).

Segundo PACELLI & FONTOURA (1996), ainda não se dispõe de uma maneira efetiva de interromper a evolução da RAA, uma vez iniciada em qualquer tipo de estrutura de concreto. Contudo, o uso de adições minerais em concretos suscetíveis à reação álcali-agregado, tem sido apontado como uma alternativa eficiente para se prevenir à reação expansiva, juntamente com o uso de agregados não reativos e a limitação dos teores de álcalis no cimento.

Como exemplo, tem-se os vários ensaios realizados por STANTON (1940), onde ele concluiu que ao limitar-se o equivalente alcalino do cimento em 0,60 %, a reação não ocorreria. Com isso, em 1941, o US Bureau of Reclamation, fixou o limite de álcalis do cimento em 0,60%, em massa, com o objetivo de minimizar o risco de fissurações devido a reação álcali-agregado, quando estiver sendo utilizado um agregado reativo (HOBBS, 1988).

O primeiro estudo publicado no Brasil sobre reação álcali-agregado foi desenvolvido por Gitahy (1963), e as constatações mais recentes, referentes a estruturas de edifícios, ocorreram em 2004 no estado de Pernambuco, nas estruturas do edifício Areia Branca. Além desse prédio, outros dois também

comprovadamente apresentaram problemas, sendo que há a suspeita, sem comprovação, em diversos outros (VILLAÇA, 2005). De acordo com Villaça (2005), em função da reação sempre ter sido detectada em grandes barragens, pensava-se que ela acometia somente grandes maciços de concreto, ocasionando assim, falta de avaliação adequada dos agregados a serem utilizados em blocos menores, como nas fundações de edifícios - caso ocorrido no edifício Areia Branca.

Essa constatação é alarmante, já que os agregados e o cimento utilizados nas edificações que apresentaram reação álcali-agregado em Pernambuco são os mesmos de muitas outras. Isso significa que problemas sem precedentes podem começar a surgir num futuro muito próximo, não só em Pernambuco como também em outras regiões do Brasil.

Dentro deste contexto que envolve estruturas comprometidas pela RAA, pode-se incluir também as pontes de concreto sobre os rios Itacutu e Arraia (na localidade de Bonfim – Roraima); tomada d'água do Túnel 6 do Sistema Cantareira (pertencente à SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A.); barragem Jaguari – Sistema Cantareira (SABESP/SP); barragem Atibainha – Sistema Cantareira (SABESP/SP); barragem Cascata – Sistema Cantareira (SABESP/SP); barragem Paiva Castro – Sistema Cantareira (SABESP/SP); barragem Pedro Beicht – Sistema Alto Cotia (SABESP/SP); barragem Ribeirão do Campo – Sistema Rio Claro (SABESP/SP); Túnel 2 – Sistema Cantareira (SABESP/SP); Túnel 7 - Sistema Cantareira (SABESP/SP); Usina Elevatória de Traição (localizada sobre o rio Pinheiros – São Paulo); blocos de fundação da Ponte Paulo Guerra (que liga os bairros do centro da cidade de Recife ao bairro de Boa Viagem) e diversos casos de fissuração em blocos e sapatas de fundação de edifícios residenciais e comerciais na Região Metropolitana do Recife.

Em função deste quadro, constata-se que no Brasil os diagnósticos da reação álcali-agregado são relativamente recentes e apresentam-se cada vez com mais freqüência. Portanto, torna-se necessário um maior número de pesquisas sobre o assunto, visando o desenvolvimento de metodologias preventivas bem como um melhor entendimento do produto da reação formada, visto que, a reação álcali-agregado tem sido um fator preocupante no meio técnico por afetar a durabilidade das estruturas de concreto.

## 1.1. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A RAA é um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo sílica, agregados reativos e água. Este é um fenômeno complexo que envolve aspectos físicos, químicos e mecânicos do comportamento de longa duração de materiais à base de cimento.

Como a água é um dos fatores determinantes da existência da RAA, as obras hidráulicas são as mais suscetíveis de apresentarem esse tipo de problema. Nos últimos anos, exemplos de degradação prematura de algumas estruturas de concreto, principalmente de usinas hidrelétricas, tornaram-se cada vez mais freqüentes. O elevado nível dos prejuízos causados por estas deteriorações, tem motivado a realização de inúmeras pesquisas sobre estes problemas na busca de soluções apropriadas. Em barragens, os problemas mais comumente observados são: abertura de juntas, movimentações diferenciais, perda de estanqueidade e problemas operacionais (VIEIRA et al.,1996).

Pesquisas desenvolvidas por PAULON (1981) apontam o Brasil como o quarto país no mundo em ocorrência de reação álcali-agregado, um número calculado apenas a partir dos casos relatados. Embora não haja números precisos, vários relatos indicam evidências de reação em barragens brasileiras em que aparecem movimentações e fissurações, situação esta que desencadeou o surgimento das primeiras pesquisas sobre o assunto na década de 80 (PAULON, 1981).

ANDRIOLO (2000) relata os casos de barragens afetadas por reação álcali-agregado no Brasil. As 830 barragens brasileiras perfazem um total de aproximadamente 62.700.000 m<sup>3</sup> de concreto, sendo que o primeiro caso de RAA observado no Brasil foi verificado nos estudos dos agregados utilizados na construção da barragem de Jupia. O autor cita ao menos 19 casos de barragens afetadas por reação álcali-agregado, onde as estruturas atingidas não se limitam apenas às barragens em sí, mas também em tomadas d'água, casas de força e vertedouros. Em estruturas onde são instalados equipamentos hidrodinâmicos e elétricos, como geradores e turbinas, as conseqüências são ainda maiores, no caso de eventuais danos.

Embora a maior atenção seja dada a barragens afetadas pela reação, salienta-se que diversas outras estruturas também sofrem tal deterioração, tais como obras portuárias, blocos de fundação, pontes, viadutos, dormentes de concreto, pistas de aeroportos, túneis e estruturas rodoviárias.

Contudo, só a partir de 2004, com o desabamento do Edf. Areia Branca localizado na região metropolitana de Recife, que começaram as investigações visando verificar a presença deste tipo de reação em fundações de edifícios residenciais e comerciais, procedimento este quase inexistente antes do acontecido. Após uma série de investigações, observou-se a incidência extremamente elevada de fissuração em blocos e sapatas de fundação, proveniente da expansão, devido ao fenômeno de reação álcali-agregado (FERRARIS, 2006).

Com a constatação de fissuras decorrentes deste fenômeno em sapatas de edifícios, iniciou-se um levantamento visando identificar as manifestações patológicas, as quais, foram encontradas em intensidades variadas nos edifícios com idades entre 3 e 25 anos, esta constatação preocupou o meio técnico e a sociedade, tanto pela dificuldade de se avaliar a gravidade do problema, como pela inexistência de alternativas imediatas para recuperação dos elementos atingidos. Aliado a isto, estes elementos encontram-se enterrados, com difícil acesso para a realização de inspeções periódicas e monitoração das soluções. Este fenômeno é agravado ainda mais pela possibilidade de facilitar a entrada de agentes agressivos, tanto nas armaduras quanto no próprio concreto, através de um processo iterativo. Trata-se, portanto de um novo desafio ao conhecimento e à engenharia nacional (SCANDIUZZI, 2001).

Em função desses problemas, é consenso entre pesquisadores que a melhor maneira de evitar ou, no mínimo, reduzir a possibilidade de ocorrência da RAA é conhecer as características dos materiais componentes do concreto, através de estudos prévios, e adotar medidas que atenuem as condições favoráveis à sua ocorrência. A prevenção é segundo alguns autores (VIEIRA, et al., 1996), a única maneira atualmente conhecida de se evitar danos relacionados a estas reações expansivas. Pois, uma vez iniciadas em uma estrutura, não são possíveis de serem detidas, tornando os procedimentos de reparo até hoje empregados de efeito apenas paliativo.

Com relação ao estado do Pará, têm-se atualmente apenas algumas análises pontuais realizadas pela UFPA e por alguns profissionais da área, onde observa-se a presença de reatividade em alguns tipos de agregados. A escassez de análises mais abrangentes deve-se ao fato do território paraense ser dono de grandes dimensões territoriais e uma imensa quantidade de jazidas, o que acaba acarretando uma série de dificuldades para captação de amostras, caracterização e realização dos ensaios de RAA.

Esta constatação, juntamente com o fato de que o estado do Pará possui um clima equatorial, ou seja, não existe uma estação seca definida e a temperatura do ar é elevada durante o ano inteiro. Proporciona condições favoráveis ao surgimento do fenômeno da RAA, fazendo com que haja a necessidade de um estudo mais abrangente e sistemático visando identificar a presença de agregados reativos.

Esta necessidade de identificação torna-se mais evidente na região metropolitana de Belém, onde tem-se uma maior demanda na produção de concreto. Neste contexto, demonstra-se uma grande preocupação em garantir a durabilidade deste material. Uma vez que, com o aparecimento da RAA, esta propriedade seria bastante afetada. Mediante esta situação, se faz necessário estudos mais aprofundados e pontuais de caracterização dos agregados utilizados em nossa região, com objetivo de conhecer melhor suas propriedades e assim produzir concretos de qualidade satisfatória, os quais não apresentem problemas relacionados à reação álcali-agregado.

Outro aspecto importante a ser levado em consideração no combate à reação álcali-agregado é a localização das jazidas fornecedoras de seixo para nossa região. Pois conhecendo suas respectivas localizações é possível realizar mapeamentos das áreas onde serão extraídos tais agregados, possibilitando com isso diminuição da ocorrência da reação, e assim, garantir a utilização desses materiais sem problemas referentes à diminuição da vida útil das estruturas de concreto armado.

## 1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

O presente trabalho tem por objetivo principal avaliar o seixo provindo das principais jazidas fornecedoras da região metropolitana de Belém, em relação à sua reatividade frente à alcalinidade do concreto. E terá como objetivos específicos:

- Classificar o seixo, segundo o critério de potencialidade reativa frente ao álcalis do cimento;
- comparar os resultados entre os diversos tipos de ensaios usados para identificar a potencialidade reativa das amostras de agregados graúdos;
- analisar as amostras coletadas através de técnicas petrográficas;
- analisar o emprego do MEV como método auxiliar na verificação da reatividade potencial dos agregados graúdos;
- delimitar jazidas, através do seu mapeamento, em que podem ser encontrados agregados reativos e agregados inócuos;
- servir de referência para os profissionais da região quanto ao uso destes materiais para a produção de concreto.

## 1.3. LIMITAÇÃO DA PESQUISA

Dentre os fatores limitantes da pesquisa, pode-se citar a captação apenas do seixo como amostra de agregado graúdo para análise da potencialidade reativa. Isso ocorre devido a sua grande predominância em relação à brita, para confecção de concreto. Outro fator que merece destaque é o fato desta pesquisa focar seus estudos apenas nas jazidas que fornecem agregado graúdo para região metropolitana de Belém, ou seja, não englobando todas as jazidas existentes no estado do Pará. Isso deve-se ao fato do nosso estado ser dono de dimensões continentais, tornando-se assim, inviável a abrangência de todas as suas jazidas.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será dividido em cinco capítulos, conforme segue:

O primeiro capítulo apresentará a introdução, onde constará a justificativa e importância deste trabalho. Também serão apresentados neste capítulo os objetivos, as limitações da pesquisa e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo apresentará uma revisão bibliográfica sobre a RAA, mostrando seu histórico, sua definição, seu mecanismo de reação e os fatores que influenciam a reação álcali-agregado.

O terceiro capítulo terá como enfoque o programa experimental, mostrando deste modo, a captação do material utilizado no trabalho; a caracterização das amostras; o cimento usado para os ensaios de reatividade; a determinação da reatividade potencial através dos métodos acelerado e químico; e a análise da microestrutura das amostras, através da petrografia e da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), usada como método auxiliar para a determinação da RAA.

No quarto capítulo será apresentada a análise dos resultados, assim como, uma tabela com resumo de todos os ensaios realizados. Em seguida será exposto um mapeamento, localizando e identificando todas as jazidas que fizeram parte de nossos estudos.

No quinto capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como sugestões para futuras pesquisas nesta área.

## 2. A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

### 2.1. HISTÓRICO DE CASOS DA REAÇÃO ALCALI-AGREGADO

Os estudos focalizando a RAA são relativamente recentes, visto que o primeiro caso de deterioração decorrente do fenômeno foi observado por Blanks & Kennedy (1955) apud MEHTA & MONTEIRO (1994), em 1922 na Usina Hidroelétrica de Buck no New River (Virgínia), apenas dez anos após sua construção. Tendo ao longo das décadas de 1920 e 1930, o aparecimento de um grande número de fissuras observado em pontes, barragens e pavimentos ao longo da costa da Califórnia.

Porém, o seu reconhecimento como um problema ocorreu por volta de 1940, com a constatação feita por STANTON, que verificou que alguns constituintes mineralógicos de agregados são reativos, ocasionando com isso, um crescente número de ocorrências de deterioração em pavimentos de concreto, obras de arte (pontes e viadutos) e estruturas hidráulicas. A partir de então, evidências de deteriorações similares foram descobertas em diversas regiões do mundo, como por exemplo, na Dinamarca nos anos 50, na Alemanha Ocidental nos anos 60, no Reino Unido em meados dos anos 70 e no Japão nos anos 80, estimulando assim, o desempenho de pesquisadores no sentido de entender o mecanismo de reação e seus fatores influentes. Desta forma já são mais de 60 anos de pesquisa a respeito, registrando-se casos históricos, avaliação do mecanismo do fenômeno e maneiras de minimizar seus efeitos. Ao longo destes anos, a reação tem provocado a desagregação ou desativação de estruturas de concreto em muitos países.

Como exemplo do efeito da reação álcali-agregado em estruturas pode-se citar o parapeito da barragem de Val-de-la-Mare (U.K), onde é notável o deslizamento causado pelo movimento diferencial de blocos adjacentes resultante da expansão proveniente da reação álcali-agregado. Outro exemplo de deterioração é a estrutura viária de concreto armado na África do Sul, com um quadro avançado de fissuração, que após 28 anos de sua construção, a mesma foi demolida e reconstruída posteriormente. Com base nessas patologias, iniciou-se a busca do conhecimento sobre a reatividade dos agregados onde se verificou que vastos depósitos de agregados reativos estão localizados nos Estados Unidos, leste do

Canadá, Austrália, Nova Zelândia, África do Sul, Alemanha, Inglaterra e Islândia. No Canadá, aproximadamente 30% dos problemas relacionados à durabilidade de barragens estão associados à reação álcali-agregado (VIEIRA et al., 1996). Países como a África do Sul, gastaram entre 1970 e 1996 cerca de trezentos milhões de dólares em reparos e manutenção de estruturas afetadas por reação álcali-agregado (ANDRIOLO, 1999). De acordo com KIHARA et al. (1998), as ocorrências de RAA em estruturas hidráulicas em todo o mundo, chegavam, até 1998, a 142 casos conforme tabela 01:

Tabela 01 – Ocorrências de reação álcali-agregado no mundo (KIHARA, SBRIGHI NETO & KUPERMAN, 1998).

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

A partir da década de 60, o Brasil teve um grande avanço na construção de hidroelétricas, desenvolvendo técnicas de construção, prazos de execução acelerados e tecnologias para o concreto utilizado. Com o crescimento dessas construções, surgiram problemas que chamaram a atenção dos técnicos envolvidos, destacando-se, dentre eles, o fenômeno da reação álcali-agregado.

Com isso, surgiu o primeiro estudo publicado no Brasil, o qual foi desenvolvido por Gitahy em 1963, quando investigava os agregados disponíveis para a construção da barragem de Jupia. Após ensaios laboratoriais, verificou-se a presença de materiais reativos, e tendo em vista a impossibilidade de utilização de outros tipos de agregados, foram necessárias medidas preventivas para o seu uso, tais como, limitações do teor de álcalis do cimento e o uso de até 35% de pozolana em substituição parcial ao cimento (PAULON, 1981).

Em 1993, KIHARA verificou um aumento progressivo dos casos brasileiros relatados em relação à RAA. Entre eles pode-se destacar a Barragem Apolônio Sales (Moxotó), Barragem de Joanes, Barragem de Paulo Afonso, Barragem de Pedras, Barragem Ilha dos Pombos, Barragem Pedro Beicht, Barragem UHE Furnas, Barragem UHE Mascarenhas de Moraes, Barragem UHE Porto Colômbia, Barragem de Billings / Pedras e bases de concreto do Nordeste / PE. A figura 01 a seguir mostra exemplo de fissuração em mapa causada pela reação álcali-agregado na Barragem UHE Porto Colômbia.



Figura 01 – Pilar do vertedouro da Barragem UHE Porto Colômbia (PERSONAL, 2005).

Com base nestas ocorrências, KIHARA, SBRIGHI NETO & KUPERMAN (1998) reuniram vários casos históricos de estruturas hidráulicas com reação álcali-agregado no Brasil. A tabela 02, a seguir, apresenta um resumo destas ocorrências.

Tabela 02 – Ocorrências de RAA em estruturas hidráulicas no Brasil. (KIHARA, SBRIGHI NETO &amp; KUPERMAN, 1998).

Fim da construção / observação da reação	Dados referentes às estruturas afetadas	
1924 / 1991	Nome / Tipo da estrutura	Ilha dos Pombos / Barragem
	Ocorrências	Fissuração nos pilares do vertedouro e paredão do canal adutor. Considerou-se que a RAA ocorreu brandamente e, aparentemente cessou.
	Reparos / Recuperação	Injeção de cimento, recomposição do concreto segregado, impermeabilização de superfícies em contato com água.
1932 / 1991	Nome / Tipo da estrutura	Pedro - Beicht / Barragem
	Ocorrências	Fissuração, infiltrações e lixiviação.
	Reparos / Recuperação	-
1936 / 1992	Nome / Tipo da estrutura	Billings – Pedras / Barragem
	Ocorrências	Fissuração e expansão dos pilares do vertedouro.
	Reparos / Recuperação	Ajuste das guias das comportas (em estudo).
1937 / -	Nome / Tipo da estrutura	Jurupará / Barragem
	Ocorrências	Fissuração e vazamentos.
	Reparos / Recuperação	Atirantamento, injeção de fissuras, impermeabilização com concreto projetado a montante.
1940 / 1980	Nome / Tipo da estrutura	Traição / Usina Elevatória
	Ocorrências	Fissuração, infiltrações, desalinhamento do eixo de bombas, ovalização de poço, aquecimento e desgaste de mancais – guia, travamento de comporta.
	Reparos / Recuperação	-

1945 / 1964	Nome / Tipo da estrutura	Peti / Barragem
	Ocorrências	Fissuração e alteamento da crista.
	Reparos / Recuperação	Injeção de cimento, substituição do concreto superficial danificado, tratamento das fissuras, impermeabilização da face montante em 1975; nova impermeabilização em 1984; vazamentos continuam (1997).
1951 / -	Nome / Tipo da estrutura	Sá Carvalho / Barragem
	Ocorrências	Nenhuma.
	Reparos / Recuperação	-
1955 / 1978	Nome / Tipo da estrutura	Paulo Afonso I / Barragem
	Ocorrências	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos, inclinação das pás.
	Reparos / Recuperação	-
1957 / -	Nome / Tipo da estrutura	Mascarenhas de Moraes / Barragem, Vertedouro, Tomada d' Água e Casa de Força.
	Ocorrências	Fissuração e diminuição de folgas de máquinas.
	Reparos / Recuperação	Recentragem de máquinas e ajustes do mancal.
1962 / 1978	Nome / Tipo da estrutura	Paulo Afonso II / Barragem
	Ocorrências	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos, inclinação das pás.
	Reparos / Recuperação	-
1963 / 1976	Nome / Tipo da estrutura	Furnas / Barragem
	Ocorrências	Fissuração nos topos dos pilares do vertedouro.
	Reparos / Recuperação	Monitoramento.

1971 / 1988	Nome / Tipo da estrutura	Joanes II / Barragem
	Ocorrências	Fissuração.
	Reparos / Recuperação	-
1971 / 1996	Nome / Tipo da estrutura	Jaguara / Barragem
	Ocorrências	Fissuração.
	Reparos / Recuperação	-
1973 / 1978	Nome / Tipo da estrutura	Paulo Afonso III / Barragem
	Ocorrências	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos, inclinação das pás.
	Reparos / Recuperação	-
1973 / 1985	Nome / Tipo da estrutura	Porto Colômbia / Vertedouro e Casa de Força
	Ocorrências	Ovalização do poço da turbina.
	Reparos / Recuperação	Esmerilhamento dos anéis.
1974 / 1989	Nome / Tipo da estrutura	Túnel 6 – TA
	Ocorrências	Fissuração generalizada.
	Reparos / Recuperação	Ajustes e recuperação das guias das grades, modificações nas comportas – ensecadeira.
1975 / 1990	Nome / Tipo da estrutura	Tapacurá / Barragem
	Ocorrências	Fissuração e vazamentos.
	Reparos / Recuperação	-
1977 / 1980*	Nome / Tipo da estrutura	Moxotó / Casa de Força
	Ocorrências	Fissuração, ovalização da casa de força, roçamento de pás de turbina.
	Reparos / Recuperação	Corte de juntas.
1979 / 1985	Nome / Tipo da estrutura	Paulo Afonso IV / Barragem
	Ocorrências	Fissuração, inclinação dos eixos das turbinas, ovalização do poço da turbina, redução de folgas nos mancais, desnivelamento da tampa da turbina.
	Reparos / Recuperação	Em estudo.

Com base nas informações colocadas na tabela 02, pode-se observar que grande parte das evidências da reação álcali-agregado relatadas envolvem obras hidráulicas, principalmente barragens, uma vez que para o surgimento da reação é necessário que a solução alcalina nos poros do concreto consiga fazer a dissolução de alguns minerais presentes nos agregados. Porém, qualquer estrutura de concreto que contenha agregado reativo e que esteja exposta à umidade pode sofrer essa reação e manifestar os problemas dela decorrentes. A seguir na figura 02, exemplos de estruturas que não são barragens, porém apresentam o fenômeno da reação álcali-agregado.

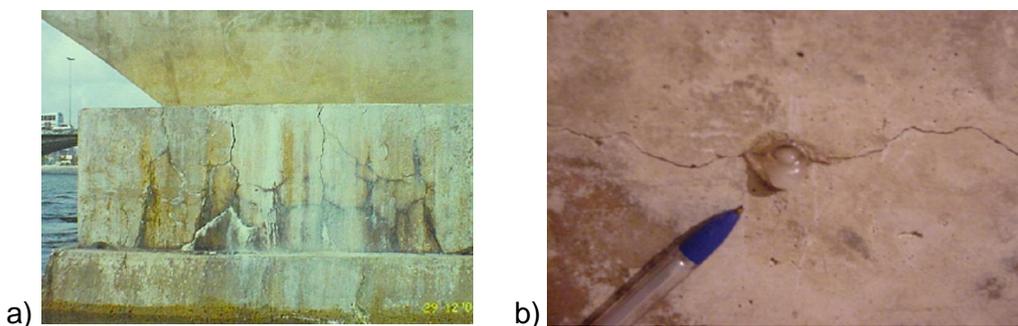


Figura 02 – a) Bloco de Fundação da Ponte Paulo Guerra – Recife; b) Gel exsudado a partir de uma fissura na superfície do concreto da galeria de drenagem da UHE Furnas (PERSONAL, 2005).

## 2.2. DEFINIÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) é um fenômeno patológico que vem sendo discutido por vários pesquisadores e tecnologistas de concreto (BICZOK, 1972; DIAMOND, 1975; HOBBS, 1988; TAYLOR, 1990; MEHTA & MONTEIRO, 1994 entre outros). KIHARA (1986) descreve a reação álcali-agregado como sendo “uma reação lenta e complexa que ocorre entre os álcalis ativos, ou disponíveis do cimento e algumas espécies de minerais presentes em alguns tipos de agregados, que em condições especiais provocam a deterioração do concreto. A reação manifesta-se no concreto por um padrão de fissurações, deslocamentos e uma exsudação de gel (nem sempre presente)”.

Segundo BICZOK (1972), a reação álcali-agregado ocorre entre os álcalis  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  proveniente do cimento, a cal liberada pelo cimento e os agregados reativos, que contenham ácido silícico amorfo ou que sejam fracamente cristalinos. De acordo com o autor, nesta reação ocorre a formação de um gel sílico-alcálico que ao adsorver água, incha exercendo pressões expansivas e causando fissurações. Conseqüentemente, o concreto sofre dilatações gerando uma rede de fissuras em sua superfície.

KIHARA (1993) defende a teoria que a intensidade da expansão devida à reação álcali-agregado, depende de alguns fatores, como por exemplo, da interação entre a quantidade de álcalis disponíveis ou solúveis, da natureza, da dimensão e teor de agregados reativos e das condições ambientais do meio em que se encontra a estrutura.

KIHARA (1993) relata também que, a intensidade e o efeito da reação variam significativamente dentro de uma mesma estrutura, dependendo da dosagem utilizada e das condições de exposição em que se encontra a mesma. A ocorrência de agregados com bordas de reação ao lado de outros sem borda, indica que a cinética de reação não é homogênea no concreto e depende fundamentalmente da solução da água de poros e da reatividade de cada fragmento. Forma diferenciada da RAA foi verificada em algumas obras por KIHARA (1993), que observou que apesar de ter sido utilizado o mesmo agregado, o comportamento foi completamente oposto. Inócuo em alguns casos e reativo em outros.

SWAMY (1997), em uma publicação especial sobre o assunto, comenta que a experiência de vários países leva a crer que a RAA é um fenômeno imprevisível. Como outros processos de degradação, a RAA é um fenômeno que invariavelmente ocorre durante a vida útil da estrutura, após alguns anos ou mesmo décadas de boa performance.

Com isso, pode-se concluir que a reação álcali-agregado (RAA) é a reação química que ocorre entre os hidróxidos alcalinos provenientes da mistura do cimento com alguns minerais presentes nos agregados, sendo que, de acordo com os minerais envolvidos, a RAA subdivide-se em reação álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato.

### 2.2.1. TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

São conhecidos três tipos de reação álcali-agregado, as quais são divididas de acordo com sua composição mineralógica reativa. Essas divisões buscam agrupar os minerais reativos de acordo com o mecanismo de expansão deles resultante, o que acaba por facilitar a adoção de medidas preventivas para evitar o desencadeamento da RAA. Estas reações podem ser classificadas como:

- Reação Álcali-Sílica;
- reação Álcali-Silicato;
- reação Álcali-Carbonato.

A reação álcali-sílica e álcali-silicato não possuem diferenças evidentes entre si com relação ao mecanismo de expansão, o que as difere basicamente é a complexidade e a velocidade com que ocorrem. No entanto, os ensaios para identificação da potencialidade reativa dos agregados e as medidas preventivas adotadas no concreto para minimizar os efeitos deletérios da RAA, tais como o uso de adições minerais, são idênticos para os dois tipos de reação. O produto da reação álcali-sílica e álcali-silicato constitui-se num gel sílico-alcalino capaz de expandir em contato com a água. Essa expansão leva ao aparecimento de fissuração mapeada e, algumas vezes, ao deslocamento de peças estruturais. Outra manifestação comum a esse tipo de reação é a exsudação do gel na superfície do concreto.

A reação álcali-carbonato é um pouco mais complexa, já que ainda não existem formas bem claras de preveni-la, a não ser descartar o uso de agregados dolomíticos reativos em concretos sujeitos à RAA (DENG; TANG, 1993). Na reação álcali-carbonato não há formação do gel alcalino, entretanto, a fissuração mapeada e o deslocamento de elementos da estrutura também são as principais evidências da reação.

### 2.2.1.1. REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Reações do tipo álcali-sílica são reações expansivas mais conhecidas e registradas no mundo (KIHARA, 1993; HASPARYK, 1999). Essas reações são mais comuns do que a reação álcali-silicato e álcali-carbonato, sendo universalmente considerada como a reação entre os íons alcalinos presentes na solução dos poros do concreto e a sílica amorfa presente nos agregados (DIAMOND, 1997).

DIAMOND (1975) define a reação álcali-sílica (RAS) clássica como sendo uma reação química que envolve os cátions alcalinos e os íons hidroxilas presentes nas soluções dos poros de concreto com algumas formas de sílica, metaestáveis ou tensionadas presentes ocasionalmente nos agregados. Nesse mesmo sentido HOBBS (1988), TAYLOR (1990) e MEHTA & MONTEIRO (1994) também definem a reação álcali-sílica. Esta reação pode causar expansões volumétricas, fissurações, perda de resistência e em casos extremos, a completa deterioração do concreto.

TAYLOR (1990) acrescenta que as microfissurações podem surgir na superfície de um concreto formando uma rede, fissuração em “mapa”, contendo também algumas fissuras maiores. No caso do concreto armado, as fissuras tendem a surgir alinhadas paralelamente à armadura; o agregado também pode se apresentar fissurado. O pesquisador registra diversas evidências da reação tais como presença de gel nas fissuras, na pasta de cimento e nas bordas em torno dos agregados. O gel também pode exsudar do interior do concreto para a sua superfície. O gel é do tipo “expansão ilimitada”: ele absorve água com uma conseqüente tendência a aumento de volume. Como o gel é confinado pela pasta de cimento hidratada, resulta uma pressão interna que pode eventualmente causar expansão, fissuração e desagregação da pasta de cimento hidratada. Assim, a expansão pode ser devida a pressão hidráulica gerada por osmose, mas também pode ser causada pela pressão de inchamento dos produtos sólidos da reação

álcali-sílica. Em função deste comportamento, supõe-se que o inchamento das partículas duras do agregado é que seja o mais prejudicial ao concreto. Parte do gel, relativamente mole, é depois lixiviado pela água e depositado nas fissuras já formadas pelo inchamento do agregado. O tamanho das partículas silicosas tem influência sobre a velocidade da reação, sendo que partículas mais finas, com 20µm a 30µm, resultam expansão após um ou dois meses, e as maiores, somente após muitos anos.

TAYLOR (1990), também afirma que as condições necessárias para que ocorra a RAS é um elevado teor de óxidos alcalinos no cimento, um constituinte reativo no agregado e uma fonte de água. Os íons alcalinos ( $K^+$  e  $Na^+$ ) estão presentes no cimento na forma de sulfatos e nas fases silicatos e aluminatos. Entretanto, os cátions alcalinos também podem ser fornecidos através de fontes externas tais como soluções de  $Na_2SO_4$  ou  $NaCl$ , adições minerais ou os próprios agregados.

A reação álcali-sílica também pode ser definida como uma reação química do tipo ácido-base. O reagente ácido é a sílica no estado sólido e os reagentes básicos são os hidróxidos de potássio ou sódio presentes na solução dos poros de concreto, sendo que o meio no qual ocorre a reação é a água. Como produto desta reação, encontra-se um hidrato sílico-cálcico-potássico (C-K-S-H) ou sílico-cálcico-sódico (C-Na-S-H). (DRON & BRIVOT, 1992).

De acordo com PAULON (1981), as rochas que desencadeiam a reação álcali-sílica podem possuir formas bem definidas de sílica metaestável (tridimita e cristobalita), sílica microcristalina amorfa (opala) e sílica sob a forma de quartzo criptocristalino, que é a forma mais desordenada e reativa (chert, flint e calcedônia). O autor cita ainda os vidros naturais (vulcânicos) como minerais altamente reativos devido à presença de grande quantidade de quartzo na rocha (acidez da rocha).

Segundo DIAMOND (1989), a RAS que pode ocorrer em campo é facilmente reproduzida em laboratório; o autor comenta que as evidências surgem como resultado de reações físico-químicas subseqüentes à RAS, e não como resultado da reação propriamente dita. Na opinião de DIAMOND, o termo “reação deletéria” tem causado bastante confusão, uma vez que a RAS pode se instalar sem causar nenhum dano ao concreto. STARK (1991) diz que para que uma reação deletéria ocorra são necessários vários fatores conjugados tais como a sílica reativa, um teor de álcalis suficiente para que ocorra a reação e umidade suficiente para absorção e

inchamento do gel (produto da reação). Se um destes requisitos não estiver presente, a expansão não ocorrerá.

DIAMOND (1989), ao classificar a reação química como heterogênea leva em consideração o desenvolvimento de duas fases: a fase sólida, representada pelo agregado reativo, e a fase líquida, pela solução dos poros. O pesquisador apresenta os estágios, de maneira genérica, nos quais a RAS se propaga: a) desenvolvimento das elevadas concentrações dos hidróxidos alcalinos nas soluções dos poros do concreto; b) instalação da reação com o agregado gerando o gel; c) surgimento das expansões; d) fissurações e subsequente deterioração. Porém, relata que diversas estruturas afetadas pela RAA reagem de forma totalmente diferente, devido a vários fatores: as diferenças entre os agregados, o teor de álcalis, incorporação de materiais cimentícios, condições de exposição tais como temperatura e umidade, limitações mecânicas e etc.

Segundo PAULON (1981), a sílica em formato tetraédrico, tem como unidade básica estrutural o íon silício  $\text{Si}^{4+}$ , circundando por quatro íons de oxigênio  $\text{O}^{2-}$ , como ilustrado na figura 03. E esta estrutura pode ser representada no plano, conforme figura 04:

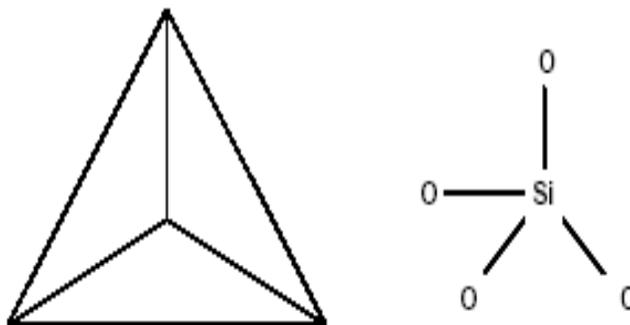


Figura 03 – Estrutura tetraédrica da sílica (HASPARYK, 1999).

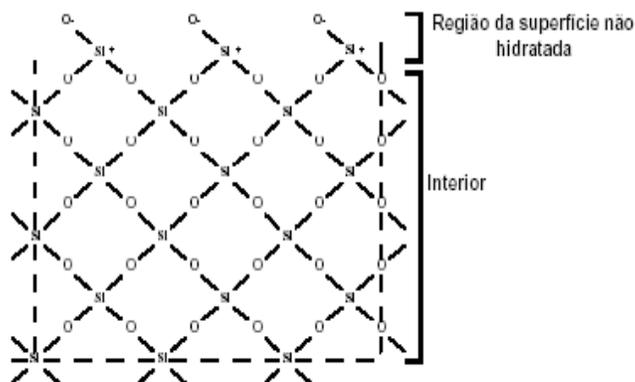


Figura 04 - Estrutura da sílica no plano, mostra da superfície não hidratada (PAULON, 1981).

No interior da estrutura, as valências de silício ( $\text{Si}^{4+}$ ) e oxigênio ( $\text{O}^{2-}$ ) estão equilibradas, ou seja, as cargas estão neutralizadas. Porém, na região da superfície, o íon oxigênio está ligado somente a um íon de silício, ficando com uma carga negativa desequilibrada. Quando da hidratação desta partícula, o íon hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) proveniente da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), entra em contato com o íon positivo do silício. Em paralelo, o íon positivo hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) entra em contato com o íon negativo do oxigênio, complementando o tetraedro silício-oxigênio, conforme figura 05 (PAULON, 1981).

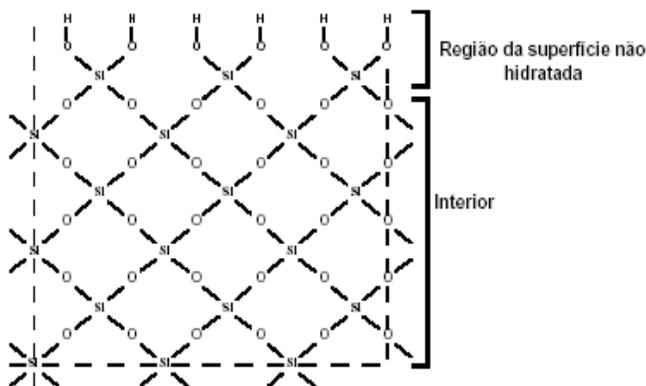


Figura 05 - Superfície hidratada da sílica (PAULON, 1981).

PAULON (1981), afirma que a quantidade de moléculas de água que se mantém na ligação é proporcional à área de superfície e não à quantidade total de sílica. Outro fator importante é de que os íons hidroxilas estão mais fortemente ligados do que os íons de hidrogênio, os quais podem ser liberados em meio aquoso, produzindo íons de hidrogênio livres, tornando as partículas da superfície de sílica ácidas. Portanto, a reatividade dependerá da superfície específica da sílica: quanto maior for a subdivisão da partícula macroscópica, maior será o número de moléculas de água de absorção, aumentando o número de íons de hidrogênio livres e ocasionando um aumento de reatividade.

Como exemplo de minerais com forma desordenada que dão um caráter reativo à sílica, pode-se citar: opala ou sílica amorfa, calcedônia (variedade de quartzo fibroso ou criptocristalino), cristobalita e tridimita (formas cristalizadas metaestáveis de sílica), vidros naturais ou vulcânicos (depósitos piroclásticos ou rochas vulcânicas) e os vidros artificiais (pyrex) (HOOBS, 1998; KIHARA, 1986; RODRIGUES, 1994; HASPARYK, 1999). De acordo com PLUM, PAULSEN e IDORN (apud PAULON, 1981), a figura 06 mostra o mecanismo de reação álcali-sílica.

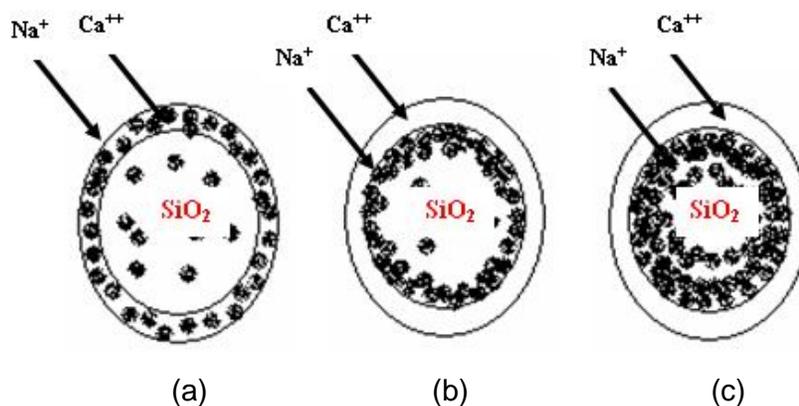
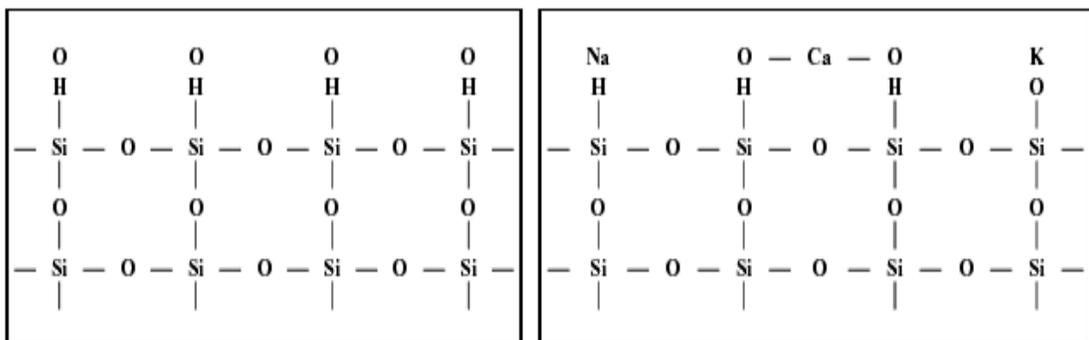


Figura 06 - Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento (PAULON, 1981).

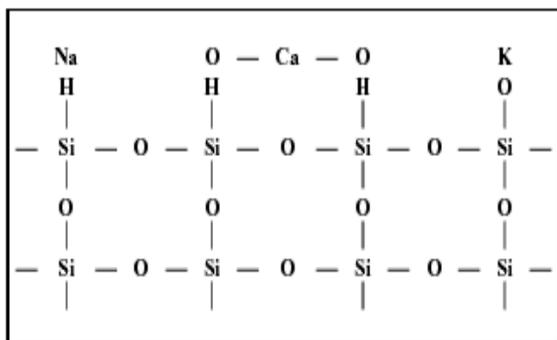
Inicialmente, na figura 06(a) nota-se a partícula de sílica reativa circundada por íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  contidos na pasta de cimento em solução básica. Devido à alta concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na pasta, forma-se, segundo a figura 06(b), uma fina camada de um gel de cal-álcali-sílica de caráter não expansivo ao redor da sílica. Essa fase é inócua.

Na fase seguinte, figura 06(c), os íons de cálcio e sódio penetram na membrana semipermeável, onde reagirão com a sílica. Esta reação será inócua se a concentração de cálcio for alta o suficiente para assegurar a contínua formação do gel não-expansivo, uma vez que há o consumo de álcalis durante a reação, havendo uma redução na concentração alcalina. Porém, se a concentração de cálcio não for suficiente, os álcalis reagirão formando um gel de álcali-sílica, que em presença de água, se expandirá e ocasionará fissuras quando as forças de expansão do gel forem superiores à resistência à tração da pasta de cimento. Estas expansões cessarão somente quando os álcalis ou a sílica reativa forem consumidos.

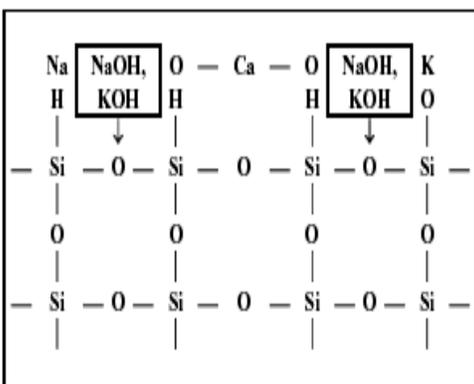
Outro mecanismo que explica este tipo de reação é o apresentado por WANG e GILLOTT (1991), onde eles ilustram as etapas da reação álcali-sílica até a formação do gel expansivo, conforme a Figura 07. Os autores descrevem essas etapas afirmando que o grupo silanol ( $\text{SiOH}$ ), presente na superfície da sílica (Figura 07 (a)), é atacado pelos álcalis  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e/ou  $\text{Ca}^{++}$  (Figura 07 (b)), havendo a troca do  $\text{Ca}^{++}$  por prótons desse grupo e uma associação do  $\text{Na}^+$  e do  $\text{K}^+$  aos íons  $\text{H}^-$ . A etapa seguinte do processo de expansão do gel da reação álcali-sílica é a quebra das ligações do grupo siloxano ( $\text{Si-O-Si}$ ) pela ação dos íons hidróxidos ( $\text{NaOH}$  e  $\text{KOH}$ ), surgindo um grupo silanol na estrutura interna da sílica (Figura 07 (c)), o que acarreta na formação de um gel sílico-alcalino através da difusão de íons alcalinos internamente (Figura 07 (d)).



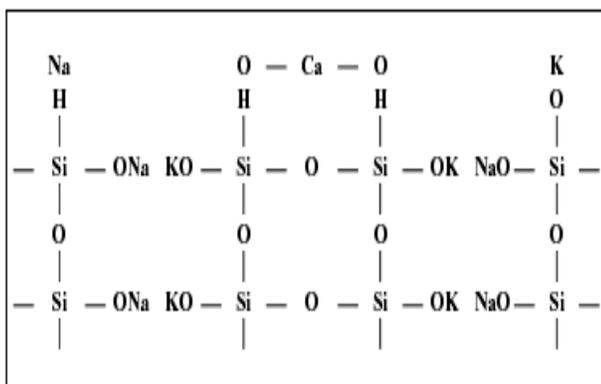
a) Sílica original



b) Troca dos íons alcalinos por prótons do grupo silanol



c) Ataque às ligações do grupo siloxano



d) Difusão de íons alcalinos na estrutura interna da sílica (gel sílico-alcalino)

Figura 07 - Diagramas esquemáticos das etapas da reação álcali-sílica (WANG; GILLOTT, 1991).

Na reação álcali-sílica normalmente há exsudação do gel na superfície do concreto, o qual é composto basicamente de sílica e álcalis. A análise microscópica do gel mostra que ele possui estrutura interna isotrópica, podendo se tornar algumas vezes anisotrópica, devido à cristalização parcial ou à presença de pequenas inclusões (PAULON, 1981).

Por ser a reação mais comum, em função de que grande parte das rochas utilizadas como agregados no concreto possuem sílica, a mesma engloba a maioria dos estudos publicados sobre RAA (HOBBS, 1988; SWAMY, 1992, DIAMOND, 1997; HASPARYK, 1999, MONTEIRO et al., 2001, entre outros).

### 2.2.1.2. REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO

TANG et al. (2000), define a reação álcali-silicato como sendo uma reação que ocorre entre os álcalis do cimento e os silicatos existentes nos feldspatos, folhelhos argilosos e certas rochas sedimentares, metamórficas e magmáticas. Segundo o autor, este tipo de reação é semelhante à reação álcali-sílica, porém mais lenta (ocorrência em 25 a 30 anos de idade da estrutura na média), pois os minerais reativos estão mais disseminados no retículo cristalino. Há indicação de que a reação com os silicatos 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 formada por um gel expansivo de silicato que, dependendo do excesso de álcalis ou hidróxido de cálcio, poderá ser mais ou menos expansivo.

Nas primeiras idades do concreto desenvolve-se uma camada de aderência em torno do agregado. Com o tempo, em condições de umidade, o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  proveniente de hidratação do cimento reagirá com o feldspato. Além disso, a cal que poderá penetrar no agregado também reagirá, o que provocará uma liberação de álcalis sob a forma de KOH, NaOH e/ou silicato de potássio e sódio, sendo este último sob a forma de gel parcialmente solúvel em água. Quando os álcalis atingirem certa concentração, os silicatos de cálcio (aderência) tenderão a se dissolver em silicatos de potássio e sódio, formando um vidro ou gel que terá cálcio, potássio, sódio e sílica ao redor, às vezes estendendo-se até o interior do agregado. Este vidro ou gel é parcialmente solúvel em água e constitui um péssimo elemento de ligação, considerando-se que está sujeito a contrações e dilatações, conforme receba ou perca água. Assim, a partícula de agregado envolvida pelo vidro ou gel, semi-líquido, tem baixa resistência (HOOBS, 1988).

GILLOTT (1986) salienta também que em todos os casos de reação álcali-silicato, a entrada e saída de água são essenciais para o mecanismo de expansão, sendo que a estrutura da rocha tem uma influência considerável no mecanismo, na proporção e no grau de expansão, pois muitas vezes os minerais isolados são componentes expansivos. Buscando entender a reação álcali-silicato, FRENCH (1976) pesquisou o transporte de materiais em direção aos fragmentos de silicato reativo e verificou que se esse “transporte” fosse dificultado, a reação seria inibida.

Segundo KIHARA (1986), a reação álcali-silicato é responsável pela maioria dos casos de deterioração de estruturas de concreto no Brasil. A maior parte das barragens que apresentam este tipo de deterioração foram construídas com rochas do tipo quartzo-feldspáticas tais como quartzito, granito e gnaisses. Como exemplo de algumas barragens afetadas pela reação álcali-silicato podemos citar a Barragem Apolônio Sales (Moxotó), Joanes, Paulo Afonso, Barragem de Pedras e Barragem de Billings.

### 2.2.1.3. REAÇÃO ÁLCALI-CARBONATO

A reação álcali-carbonato ocorre de forma totalmente diferente das reações álcali-sílica e álcali-silicato. Este tipo de reação ocorre quando agregados carbonáticos contendo calcário dolomítico e impurezas argilosas reagem com as hidroxilas dos álcalis. É o tipo de reação que mais vem sendo estudada nestes últimos anos, devido ao pouco conhecimento existente a seu respeito, à dificuldade em identificar agregados carbonáticos reativos e ao fato de que essa reação não pode ser tão facilmente inibida como a reação álcali-sílica (XU, 2000).

No Brasil, não existem casos registrados de ocorrência da reação álcali-carbonato, mas em países como Canadá, Estados Unidos e China foram detectadas inúmeras ocorrências desta reação, principalmente na China, aonde vêm surgindo muitas construções nestes últimos 20 anos e as jazidas são quase na totalidade de agregados dolomíticos e calcários. Estacas, trilhos ferroviários, aeroportos e pontes são as estruturas mais atingidas. Nos Estados Unidos, no Estado de Ontário, expansões da ordem de 1,0% foram registradas em pavimentos de concreto (HOBBS, 1988).

A expansibilidade deste tipo de processo, embora a cristalinidade e a taxa Ca/Mg da dolomita influenciem bastante na taxa de reação, tem como fatores decisivos o tamanho dos cristais dolomíticos, sua distribuição na matriz e o grau de compactação da matriz envolvente (TANG, 2000).

Essa reação química não apresenta formação de gel expansivo, mas a expansão é devido ao processo de desdolomitização, o que modifica o arranjo da textura do calcário e causa o aumento do volume. A expansão das rochas carbonáticas, calcários dolomíticos argilosos, ocorre pela reação do ataque dos álcalis do cimento ao calcário dolomítico formando brucita, carbonato alcalino e

carbonato cálcico. Esse tipo de reação é chamado de desdolomitização e é colocada abaixo na figura 08.

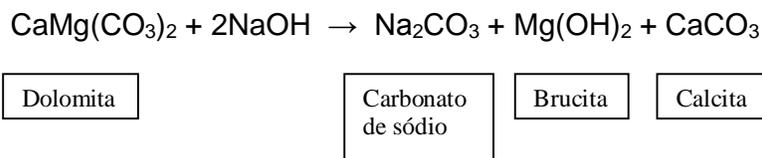


Figura 08 – Reação de desdolomitização (PAULON, 1981).

Após a ocorrência da desdolomitização, o carbonato de sódio (carbonato alcalino) reage com os produtos de hidratação do cimento, dentro da pasta de cimento, como mostra a reação da figura 09.

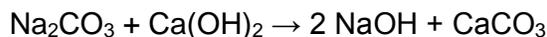


Figura 09 – Reação do carbonato de sódio com o cimento (PAULON, 1981).

Nessa reação ocorre novamente a formação dos álcalis, possibilitando a continuidade da reação de desdolomitização. Este ciclo ocorrerá até o consumo total da dolomita ou até que a concentração de álcalis tenha sido reduzida por reações secundárias (PAULON, 1981). Estudos foram conduzidos por TANG e DENG (1993), provando que a reação de desdolomitização por si só já causa expansões. Ou seja, rochas carbonáticas sem sílica reativa podem causar expansão quando reagem com álcalis.

Apesar do processo de desdolomitização ser tão questionado, já existem dados mostrando a influência da reação na interface agregado/pasta (BATIC & MILANESI, 2000). Tais estudos mostram que, apesar da formação de grandes cristais de calcita (CaCO<sub>3</sub>) levar a um decréscimo na ligação da interface, a formação de minerais de estrutura laminar (brucita) significou uma melhora substancial da interface. Todos esses aspectos têm levado diversos pesquisadores, dos países afetados por esta reação, a desenvolverem pesquisas nesse campo.

### 2.3. MECANISMO DA REAÇÃO

O início dos estudos que contribuíram para explicar as teorias dos mecanismos de expansão da reação álcali-agregado, surgiu no início do século passado, em 1916, quando o geólogo STEPHENSON analisou a formação de um precipitado gelatinoso expansivo que se formava a partir da reação entre o feldspato e o carbonato de sódio (PAPPALARDO, 1998). Os agregados, considerados potencialmente reativos, foram observados em corpos-de-prova de concreto por PEARSON e LOUGHLIN, que relataram uma ação deletéria desconhecida (PAPPALARDO, 1998).

Em 1935, o geólogo HOLDEN do Instituto Politécnico da Virgínia, formalizou a descoberta da expansão causada por reações entre agregados e cimento. STATON em 1940, afirmou que a causa da expansão e fissuração de algumas estruturas de concreto era devido à reação do agregado com hidróxidos alcalinos libertados pelo cimento durante sua hidratação (PAULON, 1981). A partir daí, várias pesquisas iniciaram-se no sentido de descrever e fundamentar teoricamente o fenômeno da RAA (PAPPALARDO, 1998).

A primeira teoria para explicar o mecanismo de expansão do gel, produto da reação, foi elaborada por HANSEN, em 1944. Neste trabalho o autor elaborou a teoria da pressão osmótica, onde hipoteticamente produtos da reação ficavam confinados dentro de uma membrana semipermeável da pasta de cimento, a qual devido a pressões hidráulicas, causava expansão na estrutura. Em outra teoria, desenvolvida por VIVIAN em 1950, relata que as expansões e fissurações ocorrem devido às pressões mecânicas que produtos no estado sólido ou semi-sólido exercem na estrutura (PAULON, 1981).

VIVIAN também observou em seus estudos, que a principal causa de ataque ao agregado reativo é a alta concentração de íons de hidróxido que estão dissolvidos nas soluções dos poros do concreto. Estes íons devem-se ao elevado teor de sódio e potássio, existentes no cimento, podendo também serem provenientes da reação nos agregados, água de amassamento e de pozolanas (PAULON, 1981).

Em conceitos baseados na química de superfície, nas características de expansão de barras de argamassa e na composição química do gel formado, PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO em 1997 idealizaram um modelo para elucidar as

expansões causadas pela RAA. De acordo com os autores, a reação está relacionada com o fato de que a superfície da sílica, carregada com uma dupla camada de cátions (íons sódio, potássio e cálcio) neutraliza a carga negativa, presente na solução dos poros do concreto. Tal reação é responsável pela dissolução da sílica e a formação de um gel, que em presença de água, é expansivo (HASPARYK, 1999).

Segundo FERRARIS (2000), ao se hidratar o cimento produz-se silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio. Na hidratação do cimento os íons cálcio são incorporados nos produtos de hidratação, mas o sódio e o potássio permanecem na solução e eventualmente são parcialmente incorporados nos silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e monossulfatos.

Com a continuação da hidratação e dissolução dos componentes alcalinos do cimento na água de amassamento, a solução vai se tornando alcalina ( $\text{pH} \approx 13,5$ ). Os íons hidroxilas e os álcalis solúveis contribuem para o aumento do pH. Este fator, associado a agregados reativos e álcalis disponíveis, favorecem muito a ocorrência de reação. Nesse meio (pH alto), algumas rochas (agregados compostos de sílica e minerais silicosos) não permanecem estáveis em longos períodos. Isto porque o pH alcalino aumenta muito a dissolução da sílica. Para exemplificar, a solubilidade da sílica aumenta mais de duas ordens de grandeza quando o pH passa de 10 para 11,5, conforme pesquisas de HELMUTH e STARK (1992).

A quantidade de álcalis presente na solução porosa é relacionada à quantidade de álcalis solúveis presentes no concreto. Segundo HELMUTH e STARK (1992), se a sílica é bem cristalizada, as falhas na estrutura cristalina são apenas na superfície externa do agregado, mas no caso da sílica fracamente cristalizada há muitas falhas na estrutura do agregado, levando à desintegração da rede inteira, como mostra a figura 10.

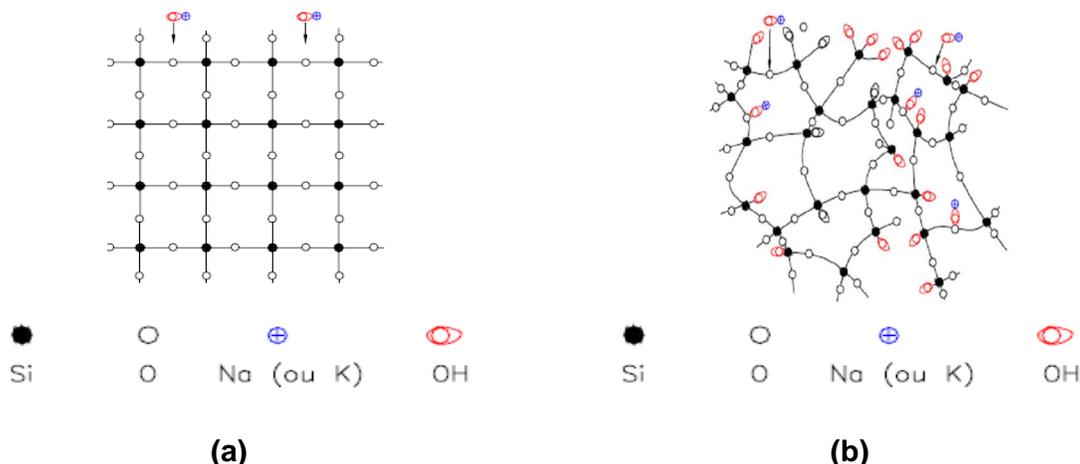


Figura 10 – Representação esquemática do ataque de soluções alcalinas na sílica bem cristalizada (a) e fracamente cristalizada (b). (FERRARIS, 2000).

Para manter o equilíbrio, os cátions  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  espalham-se sobre os íons hidroxilas e a reação entre estes resulta na produção de gel. Porém, a migração de cátions de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  é lenta, conseqüentemente a migração de  $\text{Ca}^{++}$  começa a ocorrer. Estudos de DIAMOND (1983) mostram que há muito pouco cálcio na solução porosa, e isto é explicado pelo alto pH da solução que causa diminuição da solubilidade do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Desse modo, tanto a ligação de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  como de  $\text{Ca}^{++}$  causam formação de gel; a diferença se dá na composição do gel formado. Na figura 11 é possível observar a pequena quantidade de cálcio na solução porosa, quando comparado aos demais elementos químicos.

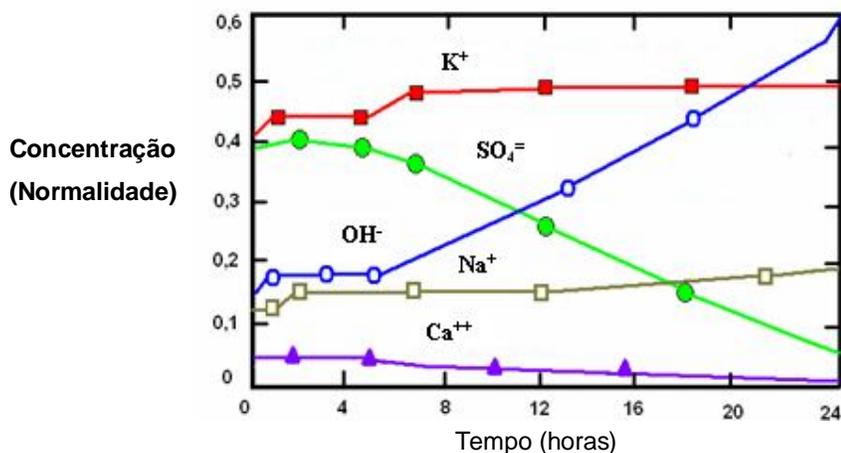


Figura 11 – Composição da solução porosa x tempo (DIAMOND, 1983).

Alguns pesquisadores como POWERS e STEINOUR apud HELMUTH e STARK, (1992) investigaram teorias acerca do mecanismo de expansão de géis expansivos e não expansivos. MORANVILLE-REGOURD apud HELMUTH e STARK, (1992) pesquisou a respeito da composição de produtos de RAA e também constatou diferentes tipos de géis formados, variando de acordo com alguns fatores como o tipo do agregado usado e a proporção dos materiais.

De acordo com VEIGA et al. (1997a), o gel é produto de uma reação instável e intermediária. E suas características, tais como viscosidade, grau de inchamento e absorção de água dependem, sobretudo, de sua composição química e da presença de água. Segundo estes autores, as condições em que se encontra o concreto, as características de suas estruturas e as condições ambientais influenciam diretamente nas características do gel formado.

MONTEIRO et al. (1997) também cita a existência de diferentes tipos de gel, cujas propriedades expansivas vão depender de alguns fatores como:

- Estrutura interna do gel, ou seja, tamanho e distribuição dos poros do gel que influenciarão o comportamento expansão/retração quando sujeitos a ciclos secagem/molhagem;
- Tamanho e forma das partículas do agregado;
- Composição do gel;
- Tipo e concentração dos íons nos fluidos dos poros.

VEIGA et al. (1997a) demonstra que a composição química do gel pode variar também conforme o local da sua formação (no interior do agregado, poros, pasta e regiões microfissuradas), já que este também é variável devido à mobilidade do gel dentro do concreto. Se o gel possuir alto teor de cálcio então é menos expansivo quando exposto a água e, desse modo, não deve produzir fissuras no concreto. Apesar da maior parte dos trabalhos publicados não fazer distinção entre gel expansivo e não expansivo, há conhecimento de que mais de um tipo de gel é produzido nas reações álcali-agregado.

De acordo com THAULOW et al. (1996), referente a formação do gel não expansivo, o teor de cálcio (Ca) aumenta à medida que o gel se afasta do agregado, pois passa a ocorrer uma absorção dos íons de cálcio presentes na pasta de cimento. O teor de silício (Si) diminui nesta mesma ordem. O gel formado longe do agregado (rico em cálcio) possui maior viscosidade e menor capacidade de inchamento, e quando atinge o estado sólido ocorre coagulação e retração, com aparecimento de algumas fissuras na estrutura do próprio gel (VEIGA et al, 1997a). A figura 12 ilustra o processo de absorção dos íons de cálcio por parte do gel.

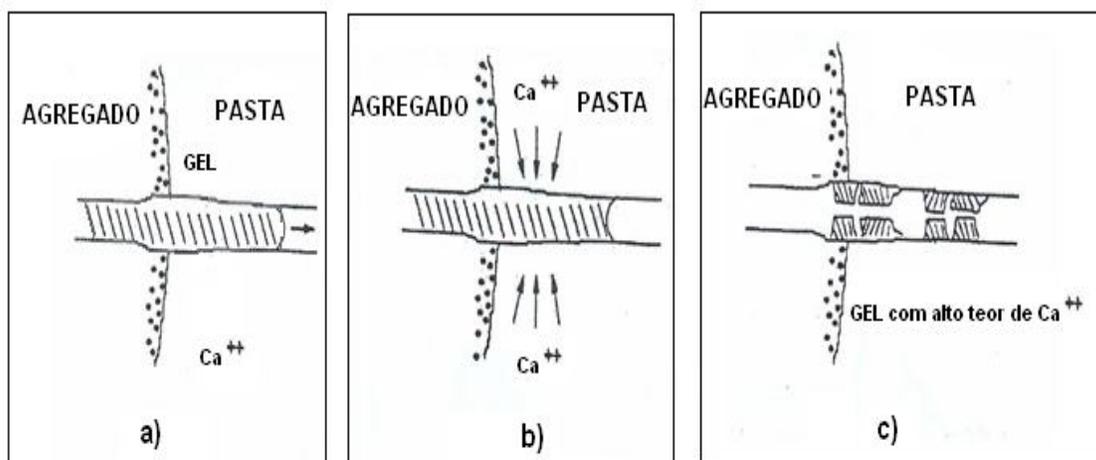


Figura 12 – Mecanismo de formação do gel proveniente de RAA: a) formação do gel próximo ao agregado; b) movimentação do gel ao longo da pasta de cimento com absorção de íons cálcio; c) gel no estado sólido, apresentando algumas fissuras devido à retração (VEIGA et al., 1997a).

Enquanto que na formação do gel expansivo, a expansão ocorre segundo o modelo geral mostrado na figura 13. No estágio 1, o gel cresce induzindo tensões internas, mas não ocorrem microfissuras. No estágio 2, as fissuras induzidas são aumentadas o suficiente para causar microfissuras ao redor das partículas reativas. No estágio 3, o gel migra para dentro de algumas microfissuras e há uma pequena redução das tensões internas. Já no estágio 4, as tensões internas surgidas nas microfissuras preenchidas com gel estão altas o suficiente para causar extensão das microestruturas, o que pode causar grandes expansões (HOBBS, 1988).

ESTÁGIO 1	ESTÁGIO 2	ESTÁGIO 3	ESTÁGIO 4
			
<p>O gel cresce induzindo tensões internas, mas não ocorrem microfissuras.</p>	<p>As fissuras induzidas são aumentadas o suficiente para causar microfissuras ao redor das partículas reativas.</p>	<p>O gel migra para dentro de algumas microfissuras e há uma pequena redução das tensões internas.</p>	<p>As tensões internas surgidas nas microfissuras preenchidas com gel estão altas o suficiente para causar extensão das microfissuras, o que pode causar grandes expansões.</p>

Figura 13 – Esquema de progressão e consequência da expansão da RAA (HOBBS, 1988).

Este processo esta também diretamente relacionado ao tipo de rocha empregado na produção do concreto. A figura 14 mostra o modelo de reação de alguns tipos de rochas reativas devido a RAA: onde começam as fissuras e qual o comportamento das partículas do agregado, segundo IDORN et al. (1992).

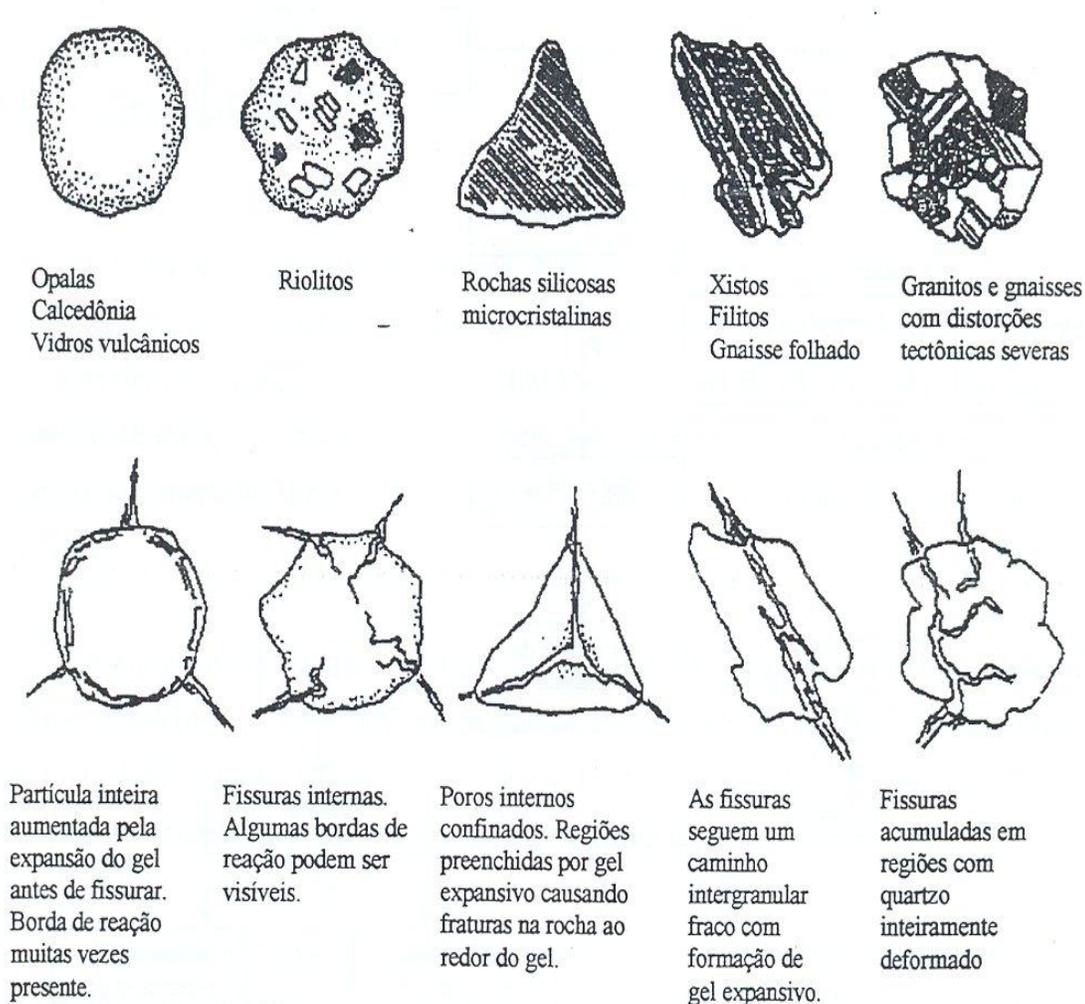


Figura 14 – Textura, morfologia e composição de algumas rochas susceptíveis a RAA e características modelo de desenvolvimento da reação (IDORN et al., 1992).

A seguir, será apresentado na figura 15 um breve resumo referente ao processo da reação, desde a formação do gel até a etapa de fissuração.

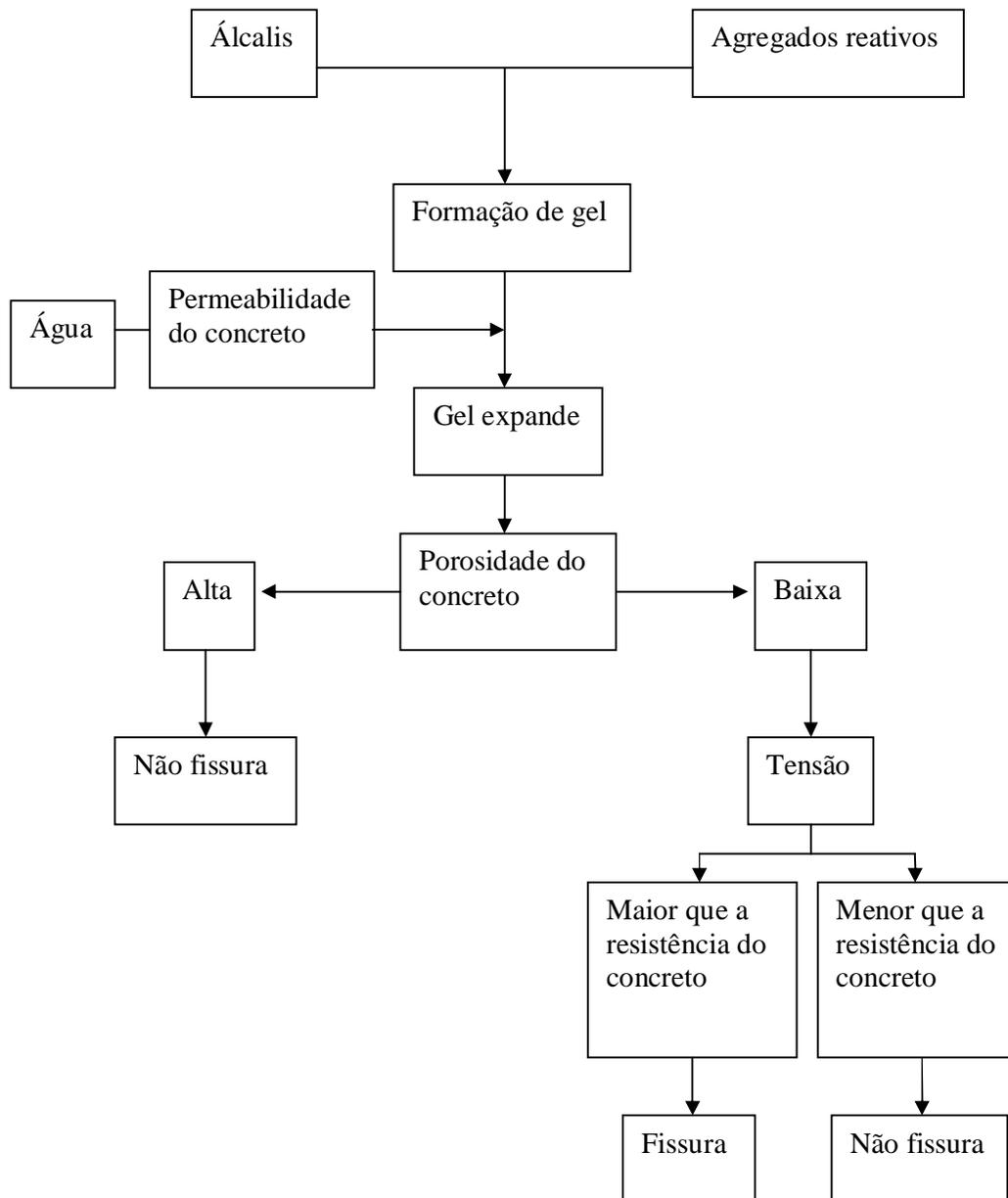


Figura 15 – Resumo do processo da reação álcali-agregado (FERRARIS, 2000).

## 2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A RAA

Existem diversos fatores que influenciam na reação álcali-agregado, uma vez que o concreto é um agrupamento muito complexo de diferentes tipos de materiais com características físicas diversas, as quais geram um produto final (concreto) com condições ideais para a reação, mesmo que se utilizem materiais não reativos ou cimento com baixo teor de álcalis (PAULON, 1981).

Segundo HASPARYK (1999), os fatores mais importantes que influenciam a reação álcali-agregado são: cimento, agregado, umidade, temperatura, relação água/materiais cimentícios, teor de ar incorporado e adições minerais.

### 2.4.1. TEOR DE ÁLCALIS DO CIMENTO

De acordo com HASPARYK (1999), os álcalis são encontrados no cimento de duas formas:

- 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 ( $\text{OH}^-$ ) que são responsáveis pela RAA, isto é, a formação destes íons esta condicionado à quantidade de álcalis no cimento. Segundo a ASTM C- 150 (1997), um cimento é considerado com baixo teor de álcalis se o equivalente alcalino não exceder 0,6%.

Porém, simplesmente o fato de considerar a preparação do concreto com baixo teor de álcalis ( $< 0,6\%$ ) não garante que não ocorra a reação, e por conseguinte, a expansão no concreto (WOLF, 1952; KIHARA, 1986). Existem outras maneiras dos álcalis penetrarem no concreto, seja através de águas que estejam em contato com a massa ou por meio de adições, aditivos e agregados (DIAMOND, 1975; KIHARA, 1986).

Em estudos realizados por KROGH (1973) e SPRUN (1975) na Alemanha, foi demonstrado que existem menores probabilidades de ocorrer reações, se for considerada a quantidade de álcalis no volume do concreto ao invés do valor do teor

de álcalis no cimento, sem levar em conta a sua dosagem no concreto. Atualmente está sendo considerado o teor de álcalis totais ou solúveis por metro cúbico de concreto, levando em consideração o consumo de cimento (HASPARYK, 1999). A figura 16 apresenta os limites deletérios à reação, considerando-se o consumo de cimento no concreto e o teor de álcalis disponíveis no cimento.

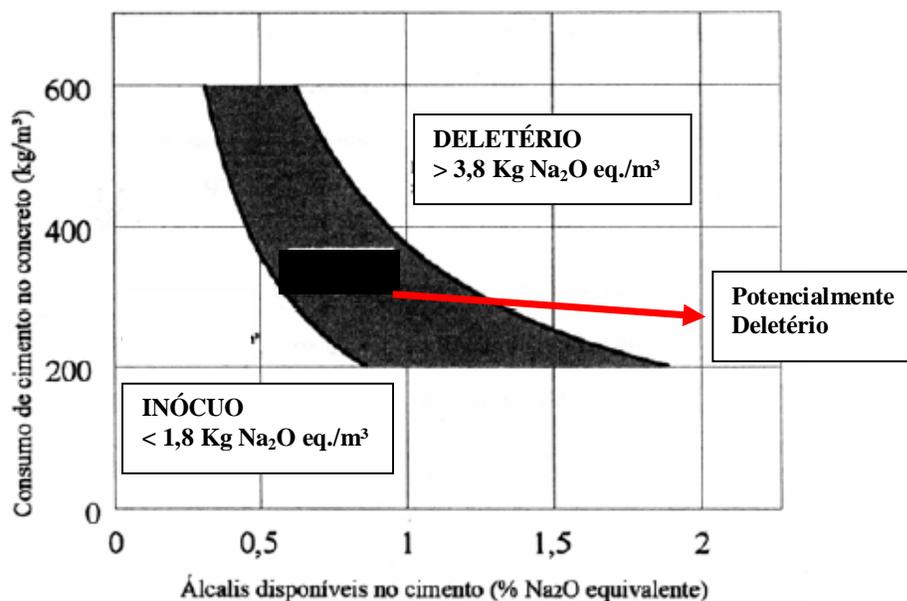


Figura 16 - Classificação do potencial da reação com relação entre a quantidade de álcalis e o consumo de cimento no concreto (OBERHOLSTER et al., 1983).

É possível observar na figura 16 que os limites para o teor de álcalis totais ou solúveis por metro cúbico de concreto estão classificados da seguinte forma (OBERHOLSTER; VAN ARRPT & BRANDT, 1983):

- Comportamento Expansivo:  $> 3,8 \text{ Kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$
- Comportamento Potencialmente Reativo: entre  $1,8 \text{ kg/m}^3$  e  $3,8 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$
- Comportamento Inócuo:  $< 1,8 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$

Sendo assim podemos concretizar a idéia que, sempre que o limite do teor de álcalis apresentar-se abaixo de  $1,8 \text{ Kg}$  de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente por metro cúbico de concreto, o mesmo poderá ser considerado inócuo, não oferecendo assim problemas quanto a um possível comportamento expansivo.

## 2.4.2. AGREGADOS

São vários os fatores que ocasionam reação devido ao agregado utilizado na mistura. Entre eles destacam-se (Bulletin 79,1991):

- Constituintes Mineralógicos: Tipo, histórico tectônico e de alteração.
- Relativos à rocha: estrutura, tamanho dos grãos, porosidade, permeabilidade, área específica e composição.

Quanto mais desorganizada e instável for a estrutura de um agregado, maior será o seu poder de reação. Pode-se citar, por exemplo, os materiais com estrutura amorfa (opala e vidro), microcristalina e criptocristalina (calcedônia). Enquanto que, podemos considerar como menos reativos os minerais metaestáveis (tridimita e cristobalita) e cristilinos (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados) (BULLETIN 79, 1991; HASPARYK, 1999).

Outro fator que aumenta o poder de reação dos agregados são as alterações em rocha, que causam distorções resultantes de deformações tectônicas; como por exemplo, o quartzo. A tabela 03 apresenta um resumo dos agregados, seus componentes reativos e a natureza da reação álcali-agregado (KIHARA 1979, EQUIPE DE FURNAS 1997).

Tabela 03 - Componentes reativos dos agregados (Concreto – Ensaios e Propriedades. Equipe de Furnas, 1997).

TIPO DE AGREGADO	FASE MINERALÓGICA REATIVA	NATUREZA DA REAÇÃO
<b>GRUPO I – ROCHAS METAMÓRFICAS</b>		
Granulito Gnaisse Quartzito Xisto	> 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante > 25°.	Álcali – Silicato
Filitos Homfels Argilito	> 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante > 25°; quartzo microcristalino a criptocristalino.	Álcali – Silicato
<b>GRUPO II – ROCHAS SEDIMENTARES</b>		
Arenito	> 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante > 25°. Opala e Calcedônia.	Álcali – Silicato Álcali – Sílica
Grauvaca	> 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante > 25°; quartzo microcristalino a criptocristalino.	Álcali – Silicato
Chert Calcário	Calcedônia, opala, quartzo criptocristalino e microcristalino. Calcita / dolornita, próxima a 1 e associado a argilominerais. Opala, Calcedônia.	Álcali – Sílica Álcali – Carbonato Álcali - Sílica
<b>GRUPO III – ROCHAS MAGMÁTICAS</b>		
Granito Granodiorito	> 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante > 25°.	Álcali – Silicato
Basalto	Minerais de alteração: patagonita, opala, calcedônia. Vidro vulcânico básico.	Álcali – Sílica Álcali - Sílica
Pedra Pornes Riolito Andesito Dacito Latitos Perlitos Tufos Vulcânicos Fonolitos	Vidros vulcânicos ácidos a intermediários e tridornita.	Álcali - Sílica
<b>GRUPO IV - MINERAIS E OUTROS</b>		
Areia	Opala (> 0,25%), Calcedônia (> 3%). Eventualmente quartzo deformado.	Álcali – Sílica Álcali - Silicato

Um outro fator importante na atividade deletéria dos agregados é a graduação ou distribuição granulométrica. Há indícios de que quanto maior a dimensão da partícula do agregado reativo, menor é a expansão causada por ele. Resultados de BARONIO et al. apud FERRARIS (2000), indicam que as maiores expansões aconteceram com as mais finas graduações usadas em seu estudo, conforme verificado na figura 17.

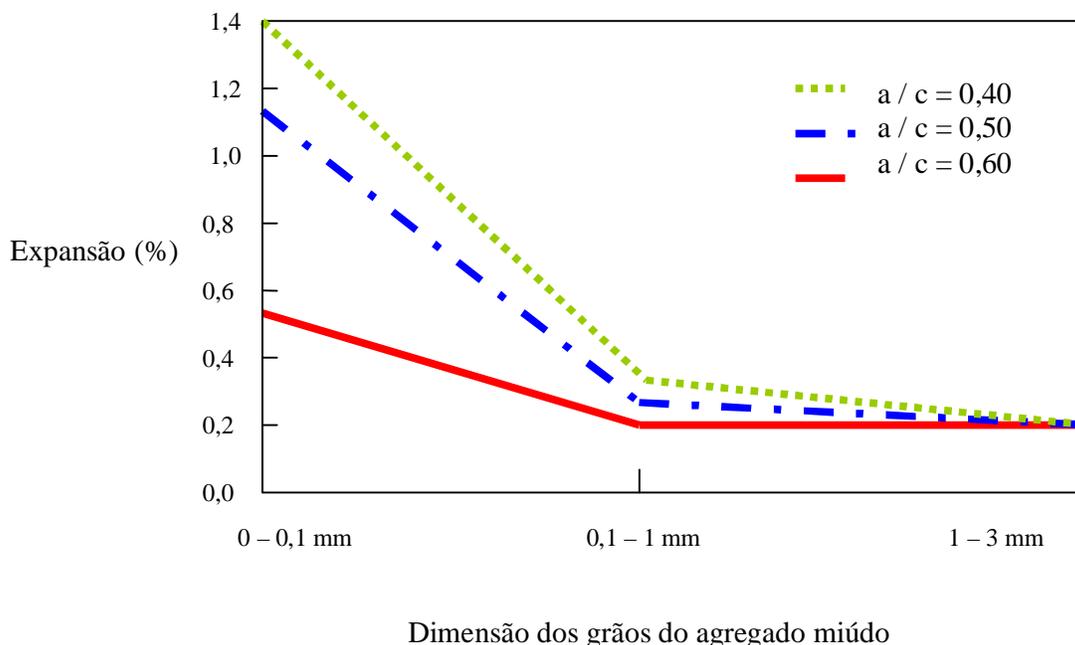


Figura 17 – Expansão versus dimensões do agregado (BARONIO et al. – Citado em FERRARIS 2000).

É possível observar na figura 17 que quanto maior a dimensão dos grãos de agregado miúdo, menor será seu efeito expansivo. Este mesmo comportamento também ocorre com a relação a/c, uma vez que, quanto maior a relação a/c, menor será sua expansão. Com isso, podemos concluir que existe uma importante interação entre  $D_{max}$  e relação a/c, e que estes fatores influenciam bastante no efeito expansivo. HOBBS (1988) também apresenta resultados similares aos de BARONIO. Porém, é possível constatar que o comportamento expansivo mostrou-se mais intenso em maiores idades, conforme colocado na figura 18.

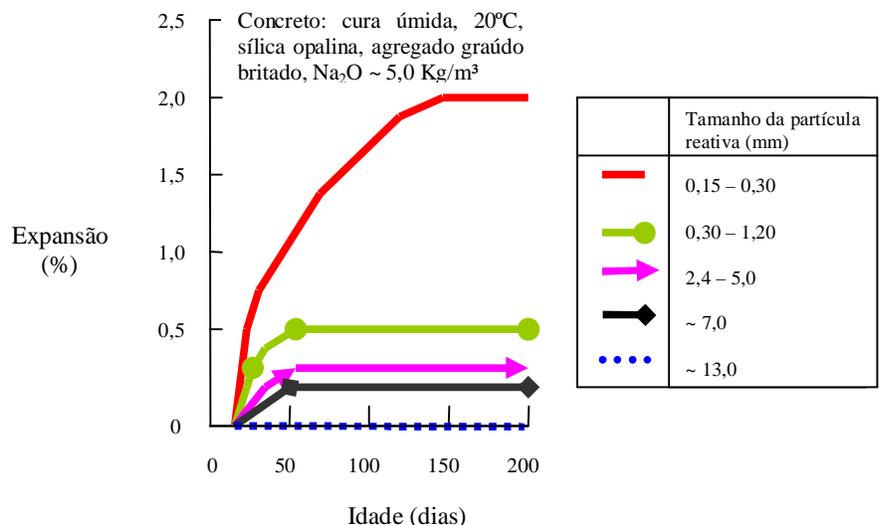


Figura 18 – Expansão versus dimensões do agregado (HOBBS, 1988).

Apesar disso, em dimensões muito pequenas (na ordem de microns), a redução da reação pode ocorrer, visto que passa a existir um efeito pozolânico, ainda que processado de forma lenta. CASTRO et al (1997) realizou pesquisas utilizando agregados pulverizados (fração passante na peneira ABNT # 200) em substituição parcial do cimento e do agregado. E com isso pode observar que houve uma redução dos níveis de expansão causada por RAA. Estes resultados podem ser visualizados na figura 19.

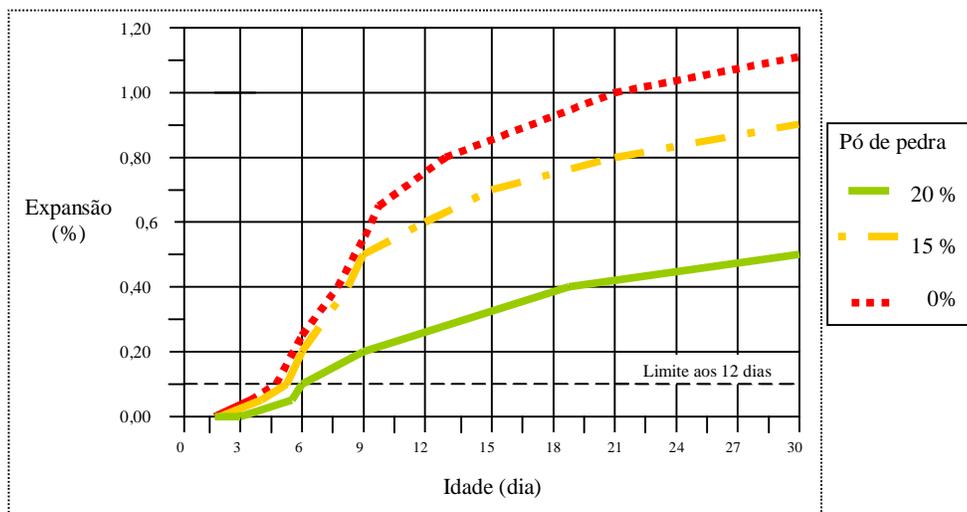


Figura 19 – Redução da expansão causada por RAA devido à substituição parcial de areia artificial de basalto por basalto pulverizado (CASTRO et al., 1997).

### 2.4.3. UMIDADE E TEMPERATURA

Já que o processo de expansão da RAA é desencadeado em função da presença de umidade ou não no concreto, este se torna um fator muito importante no comportamento do mesmo frente a esta reação. Como o gel por si só não é deletério, a deterioração da estrutura de concreto se dá pela absorção de água pelo gel e então a expansão, como colocado anteriormente. Desse modo, estruturas com sistemas de drenagem deficientes, obras hidráulicas como barragens, concretos em contato com terrenos úmidos ou atmosferas úmidas e construções expostas constantemente à chuva são mais susceptíveis à RAA.

Diversos pesquisadores como KIHARA (1986), TOMOSAWA, TAMURA & ABE (1989), verificaram que a umidade relativa acima de 85% tende a ocasionar expansão. A explicação para o fato, segundo KIHARA (1986), é que “a exposição contínua ou cíclica à umidade (maior que 85%) favorece a solubilização e migração dos íons alcalinos na solução dos poros, aumentando a agressividade das soluções nos agregados”. Este autor ainda afirma que os ciclos de secagem/molhagem são bastante prejudiciais às estruturas de concreto, pois esta exposição cíclica à umidade poderá propiciar concentrações de álcalis em determinadas regiões do concreto, intensificando as expansões nestas áreas.

Quanto ao fator temperatura, este também funciona como um catalisador da reação álcali-agregado. Isto porque altas temperaturas, em geral, aceleram as reações químicas e isto se aplica também à reação álcali-agregado. KIHARA (1986) aborda esta situação, onde cita que as altas temperaturas aceleram a hidratação do cimento e intensificam a agressividade das soluções alcalinas, tornando as reações álcali-agregado mais rápidas. RIGDEN et al. (1995) realizou estudos que confirmam a influência catalisadora de altas temperaturas. Dados deste autor mostram que amostras de concreto curadas a temperaturas maiores que 20°C apresentaram aumento não só na taxa como na magnitude das expansões devido à RAA. Fato este muito preocupante, uma vez que em nossa região temos a predominância de temperaturas elevadas com percentual bastante representativo do teor de umidade. Favorecendo assim, a aceleração de possíveis reações e conseqüentemente aumento nas expansões. Em condições como esta HASPARYK (1999) considera que o gel torna-se mais viscoso podendo percorrer com mais facilidade os vazios e as fissuras do concreto.

#### 2.4.4. TEOR DE AR INCORPORADO

O uso de ar incorporado no concreto pode ser considerado benéfico em alguns casos. HOBBS (1988) relata que em concretos confeccionados com agregados reativos que não mostraram expansões deletérias, o gel pode ser encontrado preenchendo os vazios originados pelo ar incorporado. Isto sugere que o ar incorporado pode reduzir o risco de fissuração do concreto devido à RAA, embora não evite a formação do gel em si.

FERRARIS (2000) concorda com HOBBS (1988), explicando o processo de não fissuração do concreto pela expansão do gel dentro dos poros capilares vazios ou disponíveis, sem causar tensão na estrutura da matriz do concreto. Resultados de ensaios de HOBBS (1988) na figura 20 mostram reduções significativas na expansão devido à RAA de acordo com o aumento do teor de ar incorporado.

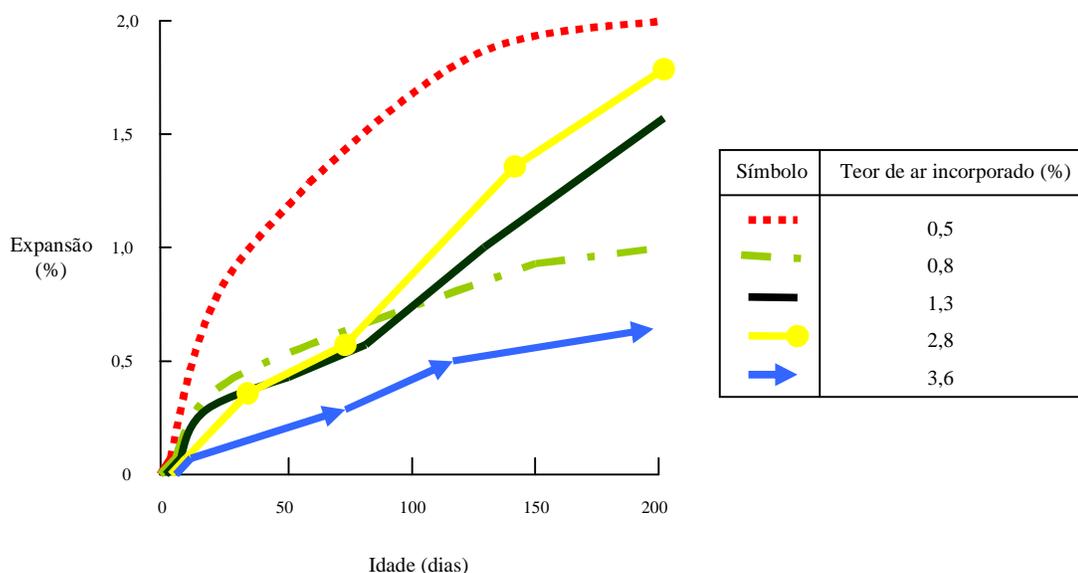


Figura 20 – Influência do teor de ar incorporado na relação expansão versus idade do concreto (HOBBS, 1988).

Pode-se observar na figura acima que a partir do momento que o concreto com cura úmida a 20° C, tamanho das partículas de sílica opalina variando entre 150 a 300 µm e uma a/c = 0,41, sofre um aumento no teor de ar incorporado sua expansão sofre uma diminuição significativa. Comprovando assim a teoria de FERRARIS (2000) e HOBBS (1988) referente a este comportamento.

### 2.4.5. ADITIVOS QUÍMICOS

Os aditivos químicos incorporados a massa de concreto é outra alternativa para inibir a RAA, sendo que as combinações mais estudadas são as com componentes a base de lítio, devido a sua especial eficiência. Porém, seu uso não é comum como às adições pozolânicas. Isso se deve à falta de conhecimento sobre o mecanismo de ação desses aditivos no controle das expansões.

Normalmente considera-se que o lítio ( $\text{Li}^+$ ) substitui parte do sódio e do potássio presente no gel resultante da reação. O  $\text{Li}^+$  é capaz de inibir a reação porque tem menor raio atômico e maior densidade de superfície carregada que o  $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ , o que o capacita a entrar nos produtos da reação mais rapidamente, fazendo com que seja produzido um gel cristalino e não-expansivo. A proporção de íons  $\text{Li}^+$ , com relação aos álcalis comuns ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) incorporados no gel, é função de sua proporção relativa na solução. Então, a eficiência do tratamento com lítio depende da manutenção de uma alta proporção relativa de lítio em relação aos outros cátions da solução. Esta relação molar  $\text{Li}/(\text{Na} + \text{K})$  está entre 0,6 - 0,9, sendo que dosagens inadequadas levam ao aumento da expansão (MO, 2005).

A incorporação do  $\text{Li}^+$  nos produtos da reação é relatada por diversos autores. MITCHELL, BLAUDOIN e GRATAN-BELLEW (2004) ressaltam que a inclusão desse íon no gel leva à formação de um composto não expansivo lítico-silicático, em contraste com o complexo expansivo cálcio-álcali-silicato. Essa teoria também é defendida por COLLINS et al. (2004), que afirmam que os aditivos à base de lítio ( $\text{LiOH}$ ,  $\text{LiCl}$  e  $\text{LiNO}_3$ ) aumentam a dissolução de sílica. Contudo, esse aumento não traduz acréscimos na expansão, pois a expansão devido à reação álcali-sílica na presença de lítio não depende da quantidade de sílica dissolvida, e sim da formação de um complexo lítico-silicático.

KAWAMURA e KODERA (2005) avaliaram o efeito do hidróxido de lítio ( $\text{LiOH}$ ) após o desencadeamento da reação do  $\text{Na}^+$  e do  $\text{K}^+$  com os agregados, através da imersão de barras de argamassas em solução de 0,5M de  $\text{LiOH}$ . Os autores verificaram que após a imersão no  $\text{LiOH}$  as expansões foram decrescendo com o tempo. Além disso, o gel formado na interface entre a pasta e os agregados reativos aparentemente é substituído pelos íons  $\text{Li}^+$  da solução externa. Isso significa que o  $\text{LiOH}$  pode ser capaz de deter as expansões desencadeadas pelo  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ .

### 2.4.6. ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais ao concreto a ser confeccionado com agregados reativos são, até o presente momento, a única maneira de se evitar a RAA. A partir do conhecimento da potencialidade reativa de uma rocha, recomenda-se ensaios com uso de adições para verificação da inibição da reação através deste mecanismo.

Os tipos de adições minerais são bastante variados. Os mais conhecidos e usados na inibição da RAA são a cinza volante, a sílica ativa, a escória de alto-forno e cinza de casca de arroz. Estes são considerados aditivos minerais artificiais, que são geralmente subprodutos industriais, podendo necessitar ou não de algum processamento (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Existem ainda as adições minerais naturais, materiais que tenham sido processados com o único propósito de produzir uma pozolana. Entre estas estão os vidros vulcânicos, tufo vulcânico, argilas ou folhelhos calcinados e as argilas diatomáceas (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Destes, somente o vidro vulcânico e argilas calcinadas (metacaulim) são conhecidos pelo uso em inibições de RAA.

Estudos de PAULON et al. (1982) apresentam o efeito de pozolanas brasileiras na inibição da RAA. O gráfico da figura 21 mostra a redução na expansão devido à reação álcali-sílica, causada pela substituição de 30% do material cimentício por pozolana.

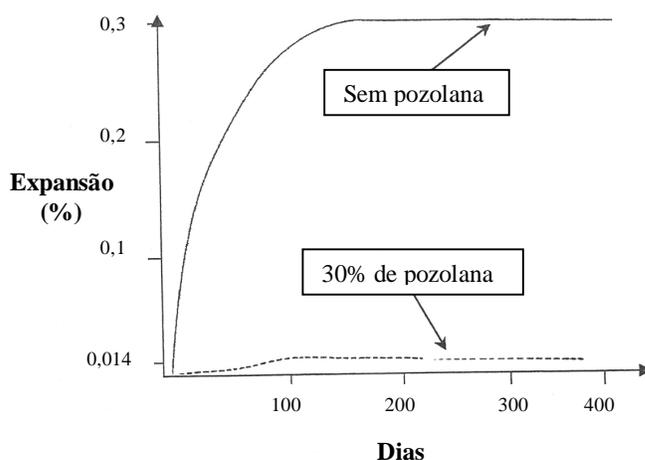


Figura 21 – Redução na expansão devido à reação álcali-sílica por utilização de pozolana (PAULON et al., 1982).

FERRARIS (2000) resume o processo de inibição da reação da seguinte forma, a sílica contida nessas adições reage mais rápido com os íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) do que a sílica contida nos agregados. Consequentemente, os álcalis são mais rapidamente consumidos e o nível de hidroxilas reduzido a um nível em que os agregados reagem muito lentamente ou não reagem.

Por fim, deve ser observado que nem todas as adições são benéficas e que existem limites de teores para cada tipo de adição. Ultrapassados estes limites o efeito pode ser até reverso. URHAN (1987) coloca que para um determinado teor de álcalis presente no cimento, existe um consumo específico (determinado “teor péssimo”) de material pozolânico capaz de produzir o gel da reação a um nível máximo. Deste modo, a incorporação de adições no concreto para inibição de RAA deve sempre ser precedida de estudos, para que seja determinada a melhor porcentagem a ser usada.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A parte experimental consiste na metodologia para determinar a reatividade potencial das amostras, o qual obedecerá aos critérios empregados para definição do material a ser utilizado nos ensaios.

#### 3.1. CAPTAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO NO TRABALHO

Para a definição das jazidas teve-se como instrumento de auxílio o trabalho realizado por NOGUEIRA e CHAGAS (2007), referente à caracterização do seixo utilizado em nossa região. Além disto, realizou-se também visitas as regiões que tem como atividade a extração de agregados graúdos, em especial, destinados à construção civil da região metropolitana de Belém. Com base nestas informações, foram identificadas oito jazidas responsáveis pelo fornecimento de seixo para a produção de concreto, sendo que destas a maioria são provenientes de um único município (Ourém). Dentre essas jazidas não foi possível a coleta de amostra da Jazida Klautau, localizada na cidade de Capanema, pelo fato da mesma esta sem exploração, ficando assim, fora de nossos estudos. Assim sendo, definiu-se que para a realização do trabalho deveria ser feita coleta das amostras em sete jazidas de Ourém e uma jazida do município de Capitão Poço. Um resumo das jazidas selecionadas, bem como sua localização, estão inseridas na tabela 04 e figura 22, respectivamente.

Tabela 04 – Jazidas fornecedoras de amostras (agregado graúdo).

<b>Nome da Jazida</b>	<b>Localidade</b>
Ramal do 15	Ourém
São José	Ourém
Ameta	Ourém
Batuíra	Ourém
Mineração Z – Dantas	Ourém
Kataman	Ourém
WH Mineradora	Ourém
Mineradora MGM	Capitão Poço



Figura 22 – Localização dos municípios fornecedores de agregado graúdo (seixo) para região metropolitana de Belém (NOGUEIRA E CHAGAS, 2007).

Para a coleta das amostras, teve-se como base a NBR NM 26 (ABNT, 2000), que estabelece os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua extração e redução até o armazenamento e transporte das amostras representativas de agregados para concreto, destinadas a ensaios de laboratório. Nas ilustrações a seguir serão apresentadas as jazidas as quais foram coletadas as amostras de seixo nos municípios de Ourém e Capitão Poço.



Figura 23 – Vista geral das jazidas: (a) Jazida Ramal do 15 localizada no município de Ourém; (b) Jazida São José localizada no município de Ourém; (c) Jazida Ameta localizada no município de Ourém; (d) Jazida Batuíra localizada no município de Ourém; (e) Jazida Mineração Z – Dantas localizada no município de Ourém; (f) Jazida Kataman localizada no município de Ourém; (g) Jazida WH Mineradora localizada no município de Ourém; (h) Jazida Mineradora MGM localizada no município de Capitão Poço.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS COLETADAS

Para a caracterização dos agregados foram realizados os ensaios de Composição granulométrica, massa unitária, massa específica e abrasão “Los Angeles”. Na tabela 05, é colocado um resumo com todos os ensaios de caracterização abordados no trabalho com suas respectivas normas.

Tabela 05 – Ensaios de caracterização dos agregados graúdos.

<b>Seixo</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2001)
Massa Unitária	NBR NM 45 (ABNT, 1995)
Massa Específica	NBR NM 53 (ABNT, 2002)
Abrasão “Los Angeles”	NBR NM 51 (ABNT, 2000)

### 3.3. CIMENTO UTILIZADO PARA OS ENSAIOS DE REATIVIDADE

Com o objetivo de uniformizar os resultados obtidos com os diferentes tipos de agregados ensaiados, foi utilizado apenas um tipo de cimento, o cimento CP-V ARI, cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

O cimento CP-V é indicado para argamassas em que se pretende observar o fenômeno de reação álcali-agregado por dois motivos: primeiro por apresentar evolução mais rápida dos processos de hidratação, fato este muito importante na realização de ensaios acelerados. E o segundo é por não conter adições na sua composição, afim de que estas não proporcionem a diminuição da alcalinidade do concreto. A tabela 06, a seguir, apresentará as características químicas, físicas e mecânicas do cimento CPV-ARI, sendo importante ressaltar que os ensaios físicos e mecânicos foram realizados no laboratório da Universidade Federal do Pará, seguindo as orientações da norma NBR 5733 (ABNT, 1991).

Tabela 06 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CPV-ARI.

CARACTERÍSTICAS	DETERMINAÇÕES		VALORES OBTIDOS	NBR 5733 (ABNT, 1991)
QUÍMICAS *	Óxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )		19,41 (%)	–
	Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		4,99 (%)	–
	Óxido de Magnésio (MgO)		0,74 (%)	≤ 6,5 (%)
	Óxido de Cálcio (CaO)		63,83 (%)	–
	Trióxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )		3,09 (%)	≤ 3,5 (%)
	Óxido de Potássio (K <sub>2</sub> O)		0,57 (%)	–
	Óxido de Ferros (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		3,35 (%)	–
FÍSICAS **	Resíduo na peneira 75 µm		4,07 (%)	≤ 6,0 (%)
	Massa específica		3,06 g/cm <sup>3</sup>	–
	Tempo de início de pega		2 h e 07 mim	≥ 1 h
	Tempo de fim de pega		6 h e 28 mim	≤ 10 h
MECÂNICA **	Resistência à compressão	3º dia	24,15 MPa	≥ 24,0 MPa
		7º dia	34,0 MPa	≥ 34,0 MPa

\* Obtidos na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

\*\* Obtidos através de ensaios realizados no laboratório de materiais do Centro Tecnológico de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Constatou-se que os valores contidos na tabela 06, referente às características físicas e mecânicas, os quais foram obtidos através de ensaios no laboratório de materiais do Centro Tecnológico de Engenharia civil da UFPA, encontram-se dentro dos limites especificados na norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Assim como, os valores apresentados pelo fabricante, referente às características químicas.

### 3.4. DETERMINAÇÃO DA REATIVIDADE POTENCIAL

A reatividade potencial foi determinada através de dois métodos, um de avaliação do agregado através do método químico e outro por meio da análise das amostras de argamassa confeccionadas com o agregado em estudo, denominado método acelerado.

#### 3.4.1. PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras foram preparadas para os dois métodos de determinação de reatividade potencial: o acelerado, seguindo as instruções da norma ASTM C – 1260 (1994), e o químico, seguindo as instruções da NBR 9774 (ABNT, 1987). Este preparo teve como primeira etapa a britagem do material, até que o mesmo apresente-se uma granulometria aproximada do agregado miúdo, ou seja, diâmetro menor que 4,8 mm. Para esta britagem utilizou-se o equipamento usado para ensaio de abrasão “Los Angeles”.

Após o processo de britagem, o material foi armazenado e posteriormente peneirado, de maneira a separá-lo em frações granulométricas como especificado pela norma ASTM C – 1260 (1994). Em seguida o material foi lavado em água corrente para total eliminação dos finos. As frações especificadas por norma constam na tabela 07.

Tabela 07 – Frações especificadas para preparo do material (Norma ASTM C–1260, 1994).

Fração	Passante		Retida	
	Peneira Nº	Abertura Nominal	Peneira Nº	Abertura Nominal
<b>Fração 01</b>	4	4,8 mm	8	2,4 mm
<b>Fração 02</b>	8	2,4 mm	16	1,2 mm
<b>Fração 03</b>	16	1,2 mm	30	0,6 mm
<b>Fração 04</b>	30	0,6 mm	50	0,3 mm
<b>Fração 05</b>	50	0,3 mm	100	0,15 mm

A seguir, na figura 24, estão colocadas algumas ilustrações da etapa de armazenamento, peneiramento, lavagem do material, secagem em estufa e armazenamento em recipientes plásticos fechados.

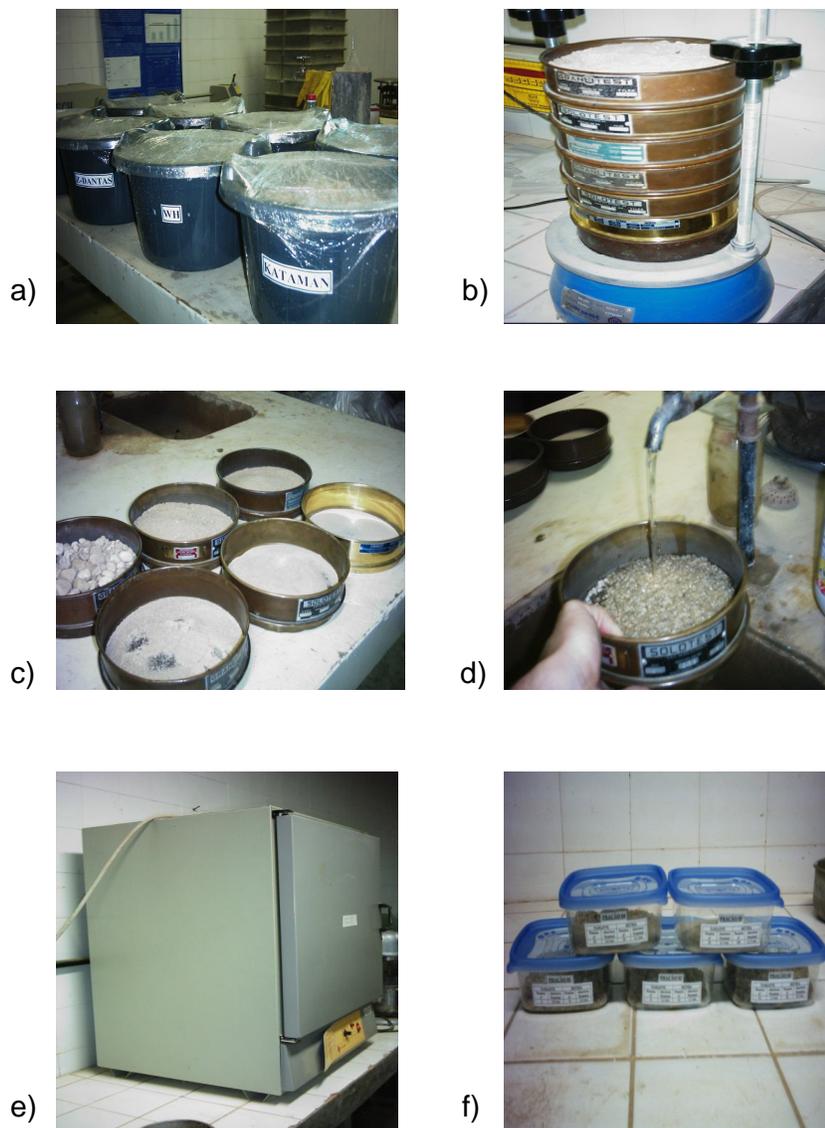


Figura 24 – (a) Armazenamento do material após a etapa de britagem; (b) Processo de peneiramento do material em peneirador mecânico; (c) Peneiras estabelecidas na norma ASTM C – 1260 (1994); (d) Lavagem do material em água corrente; (e) Estufa utilizada para secagem do material; (f) Material armazenado em recipientes plásticos.

### 3.4.2. MÉTODO ACELERADO

Este método permite a avaliação do comportamento de um agregado face a uma reação álcali-silica. Sua metodologia é baseada no método acelerado Sul Africano ou NBRI (National Building Research Institute), que foi inicialmente desenvolvido por OBERHOLSTER e DAVIES (1986) e é um dos métodos mais difundidos e utilizados no mundo no que se refere a estudos sobre a reação álcali-agregado. É chamado de método acelerado porque o tempo de ensaio é bastante reduzido, sendo sua leitura de referência aos 16 dias de idade. No presente trabalho, seguiu-se as recomendações de VALDUGA (2002) que propõe que o mesmo seja levado até os 28 dias, para observar o comportamento de agregados frente à reações mais lentas. Este método é normatizado como ASTM C-1260 (1994).

Para este ensaio, após o preparo das amostras, foram confeccionados 24 corpos-de-prova (três para cada amostra de agregado graúdo), com uma composição de agregado utilizando as frações citadas na tabela 07. As porcentagens de cada fração utilizadas nas argamassas estão especificadas na norma ASTM C – 1260 (1994) e estão apresentadas na tabela 08.

Tabela 08 – Porcentagens de cada fração utilizadas na confecção das argamassas (Norma ASTM C – 1260, 1994).

<b>Fração</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
<b>Fração 01</b>	10
<b>Fração 02</b>	25
<b>Fração 03</b>	25
<b>Fração 04</b>	25
<b>Fração 05</b>	15

Todas as argamassas foram confeccionadas com traço definido de 1:2,25 em massa e uma relação água/cimento também fixa de 0,47. O traço e a quantidade de cada material estão na tabela 09.

Tabela 09 – Traço das argamassas em massa, segundo a ASTM C – 1260 (1994).

	<b>Cimento</b>	<b>Agregado</b>	<b>Água</b>
<b>Traço</b>	1	2,25	$a/c = 0,47$
<b>Massa (g)</b>	440	990	206,8

Após definidos os traços em massa dos materiais, os mesmos foram levados para a argamassadeira para dar início ao processo de confecção da argamassa, conforme colocado na figura 25 (a). As moldagens dos corpos-de-prova foram feitas em moldes metálicos, com dimensões de aproximadamente 285x25x25mm, conforme pode ser visto na figura 25 (b). Suas extremidades apresentam orifícios para encaixe de parafusos, que ficam parcialmente engastados dentro da barra de argamassa após a desfôrma, com o objetivo de criar um suporte para realização das leituras no relógio comparador.



Figura 25 – (a) Argamassadeira utilizada no processo de confecção da argamassa; (b) Moldes metálicos utilizados para confecção dos corpos-de-prova.

Antes da fixação dos parafusos nos moldes metálicos foi dado início a etapa de aplicação do agente liberador (óleo mineral) nas superfícies internas dos moldes, conforme ilustrado na figura 26 (a). Em seguida os corpos-de-prova foram moldados em duas camadas com compactação uniforme, com posterior rasadura e alisamento da face superior com a espátula, conforme figura 26 (b) e figura 26 (c) respectivamente. Na etapa seguinte, os corpos-de-prova ficaram estocados em câmara úmida para cura durante 24 horas. Após este período foram desformados, com posterior marcação da primeira medição de cada barra em relógio comparador, conforme figura 26 (d).

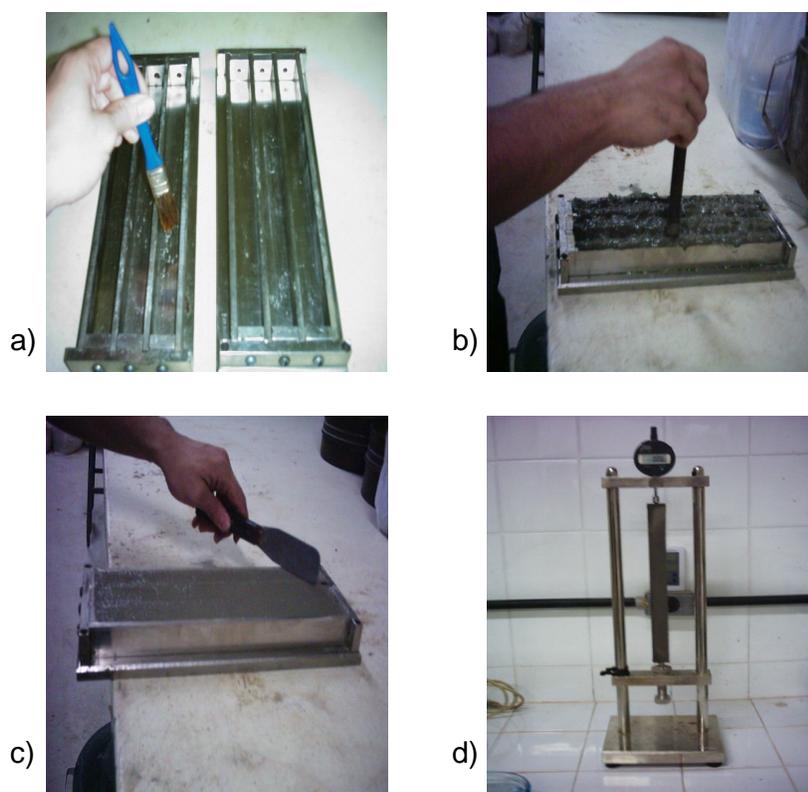


Figura 26 – (a) Aplicação do óleo mineral para facilitar no processo de desfôrma; (b) Compactação uniforme; (c) Rasadura e alisamento do corpo-de-prova; (d) Medição dos corpos-de-prova em relógio comparador.

Em seguida foram imersos em um tanque de água destilada à temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Essa temperatura foi aumentada gradativamente até alcançar  $80 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Os corpos-de-prova ficaram imersos em água destilada por mais 24 horas, com o objetivo das expansões causadas pelo aumento da temperatura ocorrerem neste período.

Após as 24 horas em imersão em água destilada, as amostras foram retiradas do tanque, novamente medidas e estocadas em outro tanque contendo solução de NaOH na concentração de 1N, na temperatura de  $80 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Como já ocorreram as expansões causadas pela temperatura, tem-se que as próximas expansões medidas podem ser seguramente relacionadas à RAA. Com isso, foram feitas leituras diárias de expansão através do relógio comparador, as quais foram expressas em porcentagem de expansão e inseridas em um gráfico de expansão (%) x idade (dias).

Segundo a ASTM C-1260 (1994), foi verificado que o teor de álcalis do cimento tem efeitos desprezíveis ou mínimos na expansão neste ensaio. Devido a isso, a norma ASTM C-1260 (1994) interpreta os resultados deste ensaio através de limites de expansão, como segue:

1. Expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias indicam um comportamento inócuo na maioria dos casos.
2. Expansões com valores entre 0,10% e 0,20% aos 16 dias indicam a possibilidade da presença de agregados tanto com comportamento inócuo como deletério. Portanto, neste caso sugere-se que investigações adicionais sejam realizadas para confirmar se a expansão é devida à reação álcali-sílica.
3. Expansões superiores a 0,20% aos 16 dias são um indicativo de expansão potencialmente deletéria.
4. O método estabelece que expansões superiores a 0,11% até 12 dias de ensaio representam reações expansivas deletérias.

### 3.4.3. MÉTODO QUÍMICO

O método químico permite avaliar a reatividade potencial álcali-sílica de um agregado através da relação entre a concentração de sílica dissolvida e a redução de alcalinidade. Este método foi desenvolvido por Richard Mielenz apud PAULON (1981), entre 1947 e 1952, tendo como vantagem a rapidez do ensaio, visto que o tempo de submissão às chamadas “condições péssimas” (alta temperatura e ambiente agressivo) é inferior a outros métodos. Ficando a amostra submetida a uma solução de NaOH 1N à 80°C por apenas 24 horas. No Brasil este método é normatizado pela NBR 9774 (ABNT, 1987). Embora seja um ensaio rápido, este método não é totalmente confiável, portanto seus resultados devem ser avaliados em conjunto com outros métodos.

Após o preparo das amostras, conforme colocado no item 3.4.1, incluindo a etapa de britagem e lavagem dos agregados, foram separadas as frações necessárias para realização do ensaio químico. A fração utilizada neste ensaio foi a correspondente à fração 5 da tabela 07, ou seja, passante na peneira de abertura nominal 0,3 mm e retida na peneira 0,15 mm. O agregado na quantidade de 25 g, foi colocado dentro de um reator juntamente com 25 ml de solução de NaOH na concentração 1N. Sendo que foram preparados quatro reatores para cada amostra de jazida, ficando um desses reatores responsável pelo ensaio em branco, o qual é utilizado como referência. Na figura 27 a seguir, pode-se observar os quatro reatores fechados e preparados para realização do ensaio químico.



Figura 27 – Reatores utilizados nos ensaios de reatividade pelo método químico, sendo um deles destinado ao ensaio em branco (referência).

Após fechados, os reatores foram levados para estufa e conservados por 24 horas a temperatura de  $80 \pm 1^\circ\text{C}$ . Após este período foram abertos para dar início a etapa de filtração da solução. Com o vácuo ligado, decantou-se uma pequena quantidade da solução existente no reator sobre um disco de papel de filtração média contido em um cadinho de Gooch. Em seguida, sem agitar o mesmo, decantou-se o restante da solução.

Terminada esta operação, desligou-se o vácuo e transferiu-se o sólido remanescente no reator para o cadinho, espalhando-o sobre o papel com uma espátula de aço inoxidável. Ligou-se novamente o vácuo, ajustando-o para 380 mm de mercúrio aproximadamente. E continuou-se a filtração até que o filtrado, contido no cadinho, fosse recolhido à razão de uma gota a cada 10 segundos em um tubo de ensaio fixado em um kitassato, conforme estabelecido na norma NBR 9774 (ABNT, 1987). Anotou-se o tempo total de aplicação do vácuo, e o considerou como tempo de filtração. Na figura 28, estão ilustrados alguns materiais utilizados no processo de filtração da solução, assim como, o aparelho de vácuo utilizado na decantação da solução.

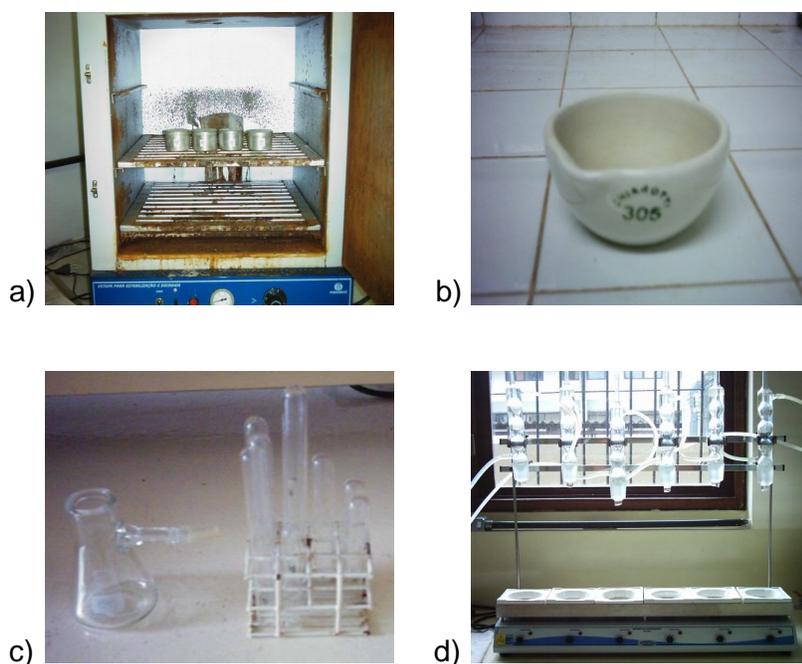


Figura 28 – a) Reatores na estufa, os quais ficaram pelo período de 24 horas; b) Cadinho de Gooch de porcelana; c) Tubo de ensaio de 50 ml de capacidade e kitassato; d) Aparelho de vácuo utilizado na decantação da solução de NaOH.

Terminada a filtração, tampou-se o tubo de ensaio com uma rolha de borracha, agitou-se o filtrado para homogeneizá-lo, transferiu-se uma alíquota de 10 ml, com auxílio de uma pipeta, para um balão volumétrico de 200 ml e completou-se o volume com água. A partir deste filtrado é que foram realizadas as análises.

Do filtrado foram feitos dois tipos de análise: quantificação da redução da alcalinidade da solução original e avaliação da quantidade de sílica do agregado que foi dissolvida e está presente no filtrado. Com estes dois parâmetros, foi traçado um gráfico que expressa a reatividade do agregado conforme a região do gráfico situada:

- Inócuo;
- Potencialmente deletério;
- Deletério.

### 3.5. ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Com objetivo de verificar a microestrutura das amostras e o seu comportamento frente uma possível reação álcali-agregado, foi realizada uma análise petrográfica no seixo coletado e uma análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos corpos-de-prova prismáticos utilizados no ensaio acelerado.

#### 3.5.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA

Segundo VIEIRA e OLIVEIRA (1997), a análise petrográfica é muito importante na detecção de agregados reativos. Através da petrografia pode-se estabelecer características texturais dos agregados, assim como, importantes informações sobre a composição mineralógica dos mesmos. Esta metodologia fornece resultados rápidos na previsão da potencialidade de agregados, embora não possa prever o comportamento de tal agregado no concreto ou argamassa. Tal análise pode ser realizada em amostras de rochas e de concretos e as normas para a realização destes ensaios são respectivamente a ASTM C-295 e a ASTM C-856.

Para o ensaio de análise petrográfica, foram coletados inicialmente algumas informações a respeito do seixo a ser analisado (uniformidade). Em seguida, procedeu-se o preparo das lâminas delgadas, com cerca de 30 µm de espessura, a fim de que o material estivesse na espessura exata para observação em microscópio óptico de luz transmitida. O preparo das lâminas delgadas, assim como, a análise microscópica, o qual teve como utilização o microscópio petrográfico da marca STANDARD 25 POL - ZEISS, foram realizados no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), seguindo as indicações da ASTM C-295/90. Na figura 29, é possível visualizarmos as lâminas delgadas utilizadas na análise.

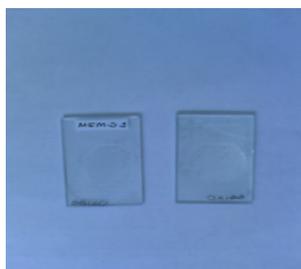


Figura 29 – Lâminas delgadas utilizadas na análise petrográfica.

### 3.5.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica que vem sendo largamente utilizada na análise da microestrutura de concretos e argamassas, dentre vários outros materiais utilizados na construção civil. É bastante utilizada para análise de produtos de hidratação do cimento e produtos de ataques de agentes agressivos, entre eles os produtos de reação álcali-agregado.

O MEV possui alta resolução e grande profundidade de foco. A amostra é alcançada por um feixe de elétrons, através dos quais, diversas informações podem ser fornecidas a partir dos sinais originados. Os elétrons secundários são os mais importantes na formação de imagens e fornecem informações topológicas da amostra. Em paralelo tem-se neste tipo de investigação o emprego do EDS que emite raio-X, o qual identifica e quantifica os elementos químicos presentes no material (HASPARYK, 1999).

Os raios-X gerados a partir dos elementos que compõem a amostra são emitidos na forma de um único conjunto, composto por raios-X com diferentes níveis de energia, onde cada nível energético é característico do elemento de onde ele provém. Este conjunto de "feixes" é detectado por um acessório acoplado ao MEV, que vai discriminar os diferentes níveis de energia dos raios-X provenientes da amostra, separando-os em faixas. Através das intensidades de cada um desses níveis, medidas em "elétrons-volt", o processamento dos sinais permite que se tenha uma avaliação da composição química da amostra.

As análises de MVE feitas nesta pesquisa foram realizadas no laboratório de microscopia eletrônica de varredura do Museu Paraense EMILIO GOELDI (Campus de Pesquisa), que utiliza o microscópio eletrônico de varredura da marca LEO, modelo 1450 VP.

### 3.5.2.1. PROCEDIMENTO DE ENSAIO DO MEV

Após o término do ensaio de reatividade potencial pelo método acelerado, foi dado início a análise de microscopia eletrônica de varredura, onde para isso, foram usadas as barras confeccionadas para a realização do ensaio acelerado.

Foram selecionadas, dentre as três barras confeccionadas de cada amostra (método acelerado), as que apresentaram áreas de maior índice de reação, tais como fissuras. Essas barras foram então conservadas para análise através de imersão em acetona por 30 minutos, com posterior secagem ao ar e armazenamento em dessecador. A acetona promove a paralisação das reações de hidratação do cimento, enquanto que a sílica-gel contida no dessecador remove a umidade do ar, evitando alterações nas mesmas.

Depois de reduzidas a um tamanho específico, as barras passaram por um processo de metalização, por meio de recobrimento de uma fina camada de ouro, tornando-as visíveis ao MEV. Em seguida foram coladas em um suporte de amostras de alumínio com cola de prata e levadas ao microscópio. Através do detector de elétrons secundários pôde-se verificar sua morfologia e com a técnica de espectrometria por energia dispersiva (EDS) verificou-se a composição química dos produtos formados. A seguir, na figura 30, é possível visualizar o microscópio eletrônico de varredura usado na análise.



Figura 30 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado na análise microscópica.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISE

São apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios juntamente com análise dos dados obtidos.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

#### 4.1.1. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Este ensaio é normatizado como NBR NM 248 (ABNT; 2001) e prescreve o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e grãos para concreto. Os principais resultados obtidos neste ensaio estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Resumo dos resultados de diâmetro máximo e módulo de finura do ensaio de composição granulométrica.

SEIXO		
AMOSTRAS	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
	DIÂMETRO MÁXIMO (mm)	MÓDULO DE FINURA
WH	25,00	7,09
MGM	25,00	7,47
Z – DANTAS	25,00	7,04
AMETA	25,00	7,12
BATUÍRA	31,50	7,69
RAMAL DO 15	25,00	7,23
KATAMAN	25,00	7,13
SÃO JOSÉ	25,00	6,94

É possível observar na tabela 10 que o menor valor de módulo de finura constatado foi da amostra São José referente a 6,94. Enquanto que as demais amostras apresentaram uma média de 7,25, tendo como valor máximo a amostra Batuira equivalente a 7,69. Pode-se observar também, que todas as amostras apresentaram diâmetros máximos semelhantes, com exceção da amostra Batuira, que teve como valor de seu diâmetro máximo 31,50 mm. É importante ressaltar que as amostras que apresentaram os menores valores de diâmetros máximos (25,00 mm) apresentaram maiores teores de areia, o que não é benéfico para o concreto, pois grandes teores de areia significam aumento no teor de finos da mistura, e conseqüentemente, aumento da quantidade de água com posterior diminuição da resistência. Prejudicando assim, a dosagem de argamassas e concretos.

No trabalho realizado por NOGUEIRA e CHAGAS (2007), o qual realizou o ensaio de composição granulométrica dos agregados graúdos de algumas jazidas que fornecem seixo para a região metropolitana de Belém, verificou-se que as amostras apresentaram resultados diferentes aos deste trabalho, como por exemplo, as amostras Kataman, Batuira, Ramal do 15 e São José. Os quais tiveram como diâmetros máximos os respectivos valores 75 mm, 50 mm, 63 mm e 19 mm. Esta diferença nos resultados pode ser explicada pela forma como as amostras foram coletadas. Sendo importante ressaltar que este trabalho teve como base, para a coleta dos agregados graúdos, o procedimento descrito na NBR NM 26 (ABNT, 2000). O qual estabelece os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua extração e redução até o armazenamento e transporte das amostras destinadas a ensaios de laboratório. Outro fator que pode explicar a diferença nos resultados é o peneiramento realizado nas jazidas, visando o fornecimento de agregados com  $D_{max}$  menores. Este procedimento pode ser a principal causa da não conformidade de valores entre o presente trabalho e o realizado por NOGUEIRA e CHAGAS (2007).

#### 4.1.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA

Este ensaio é normatizado como NBR NM 45 (ABNT; 1995) e prescreve o método para a determinação da massa unitária de agregados miúdos, grãos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto. Os resultados obtidos neste ensaio estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 11 – Resultados obtidos do ensaio de determinação de massa unitária.

SEIXO	
AMOSTRAS	MASSA UNITÁRIA (Kg/dm <sup>3</sup> )
BATUÍRA	1,40
Z – DANTAS	1,39
AMETA	1,27
MGM	1,39
SÃO JOSÉ	1,39
KATAMAN	1,44
RAMAL DO 15	1,41
WH	1,49

Todas as amostras ensaiadas apresentaram massa unitária superior a 1,0 kg/dm<sup>3</sup> e inferior a 2,0 kg/dm<sup>3</sup>. Produzindo assim, os chamados concretos normais com aproximadamente 2,4 kg/dm<sup>3</sup> de massa específica (BAUER, 2000). Com isso, foi possível defini-los como agregados médios, segundo a NBR 9935 (ABNT, 1987).

Fato semelhante pode ser observado no trabalho de NOGUEIRA e CHAGAS (2007), onde os agregados grãos estudados também foram classificados como agregados médios, por apresentarem o valor de sua massa unitária intervalados entre 1,0 kg/dm<sup>3</sup> e 2,0 kg/dm<sup>3</sup>.

#### 4.1.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

Pode-se definir a massa específica dos agregados como sendo a massa da unidade de volume, excluindo deste os vazios permeáveis e os vazios entre grãos. Através deste ensaio é possível a determinação do volume ocupado pelo agregado no concreto ou argamassa. Este ensaio é normatizado como NBR NM 53 (ABNT; 2002) e prescreve o método para a determinação de massa específica dos agregados graúdos, na condição saturados superfície seca, destinado ao uso em concreto. Os resultados obtidos neste ensaio estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados obtidos do ensaio de determinação da massa específica.

<b>SEIXO</b>	
<b>AMOSTRAS</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA (g/cm<sup>3</sup>)</b>
SÃO JOSÉ	2,58
Z – DANTAS	2,59
KATAMAN	2,62
MGM	2,64
RAMAL DO 15	2,64
WH	2,67
AMETA	2,64
BATUÍRA	2,64

Todas as amostras tiveram resultados aceitáveis se comparados a estudos realizados em outras regiões do Brasil, onde tem-se a predominância de valores de massa específica na ordem de 2,60 g/cm<sup>3</sup> a 2,70 g/cm<sup>3</sup> para os agregados utilizados em construções (IBRACON, 2006). Os ensaios realizados por NOGUEIRA e CHAGAS (2007), referente à massa específica, também apresentaram resultados semelhantes a este trabalho. É possível observar que todos os resultados foram aproximados, tendo como média 2,62 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.4. ENSAIO DE ABRASÃO “LOS ÁNGELES”

Este ensaio é normatizado como NBR NM 51 (ABNT; 2000) e prescreve o método de ensaio de abrasão de agregados graúdos usando a máquina “Los Angeles”. Os resultados obtidos neste ensaio estão apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Resultado do percentual de perda de massa obtido no ensaio de resistência à abrasão “Los Angeles”.

<b>AMOSTRAS</b>	<b>RESISTÊNCIA A ABRASÃO PERDA DE MASSA (%)</b>
BATUÍRA	39,20
Z – DANTAS	21,92
AMETA	31,41
MGM	32,72
SÃO JOSÉ	26,33
KATAMAN	31,46
RAMAL DO 15	34,90
WH	26,94

A NBR 6465 (ABNT, 1984) estabelece que a perda máxima de porcentagem em massa do agregado deverá ser inferior a 50% para concreto. Com isso, foi verificado que 100% das amostras ensaiadas atenderam às especificações normativas, ficando todas abaixo de 50%. Tendo como amostra de menor resistência à abrasão, com 39,20% de perda de massa do agregado, a amostra batuíra e como maior a amostra Z-Dantas com 21,92%. Com isso, pode-se observar que todos os resultados obtidos referente ao ensaio de Abrasão Los Angeles, estão dentro da comparação e dos parâmetros normativos. Diferentemente dos resultados apresentados por NOGUEIRA e CHAGAS (2007), os quais pouco mais da metade das amostras atenderam às especificações normativas. A possível explicação para este fato pode ser atribuída também ao peneiramento realizado nas jazidas, conforme mencionado na composição granulométrica.

## 4.2. REATIVIDADE POTENCIAL

A reatividade potencial foi determinada por dois métodos: o método acelerado e o método químico, os quais se apresentam a seguir.

### 4.2.1. MÉTODO ACELERADO

Este método é normatizado como ASTM C-1260 (1994) e prescreve a metodologia para determinar as reações expansivas. Esta determinação é feita medindo-se o aumento (ou diminuição) do comprimento de barras de argamassa de uma dada combinação, produzidas e curadas em determinadas condições de ensaio. A seguir será apresentado na tabela 14, juntamente com os gráficos de expansão (%) x idade (dias) das figuras de 31 a 38, o valor de expansão das amostras aos 16 dias e aos 28 dias, sendo que nas duas idades adotou-se a média dos resultados de três corpos-de-prova, em porcentagem (%).

Tabela 14 – Expansões aos 16 e 28 dias (em %) para cada amostra.

<b>AMOSTRA</b>	<b>EXPANSÃO AOS 16 DIAS (%)</b>	<b>EXPANSÃO AOS 28 DIAS (%)</b>
BATUÍRA	0,019	0,021
Z – DANTAS	0,020	0,020
AMETA	0,021	0,022
MGM	0,017	0,017
SÃO JOSÉ	0,000	0,000
KATAMAN	0,000	0,000
RAMAL DO 15	0,002	0,002
WH	0,000	0,000

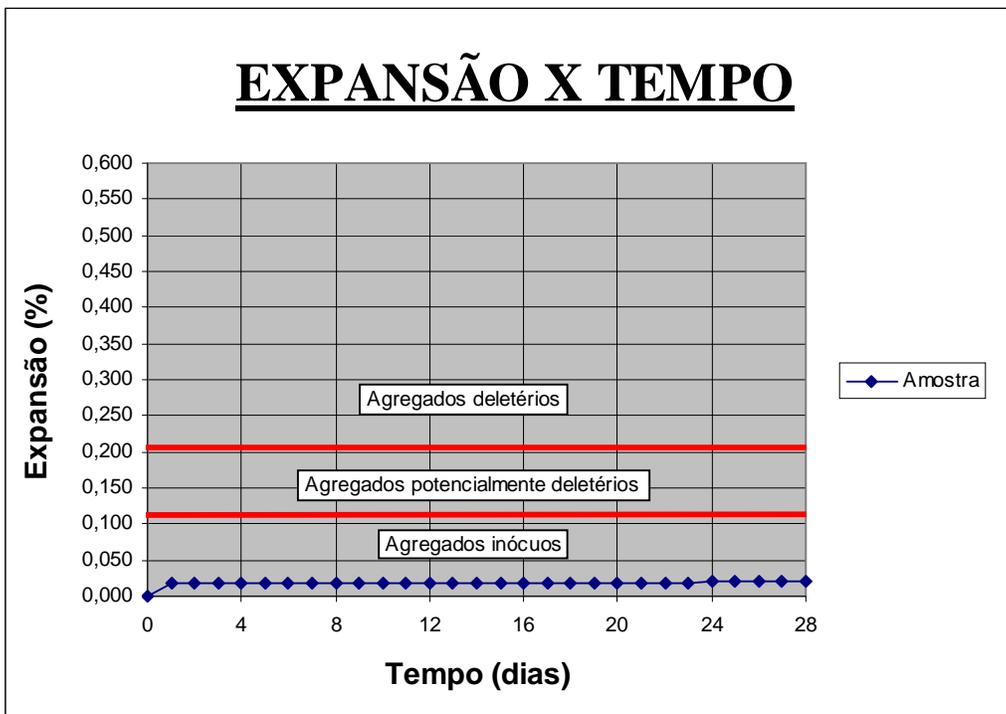


Figura 31 – Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Bатуíra.

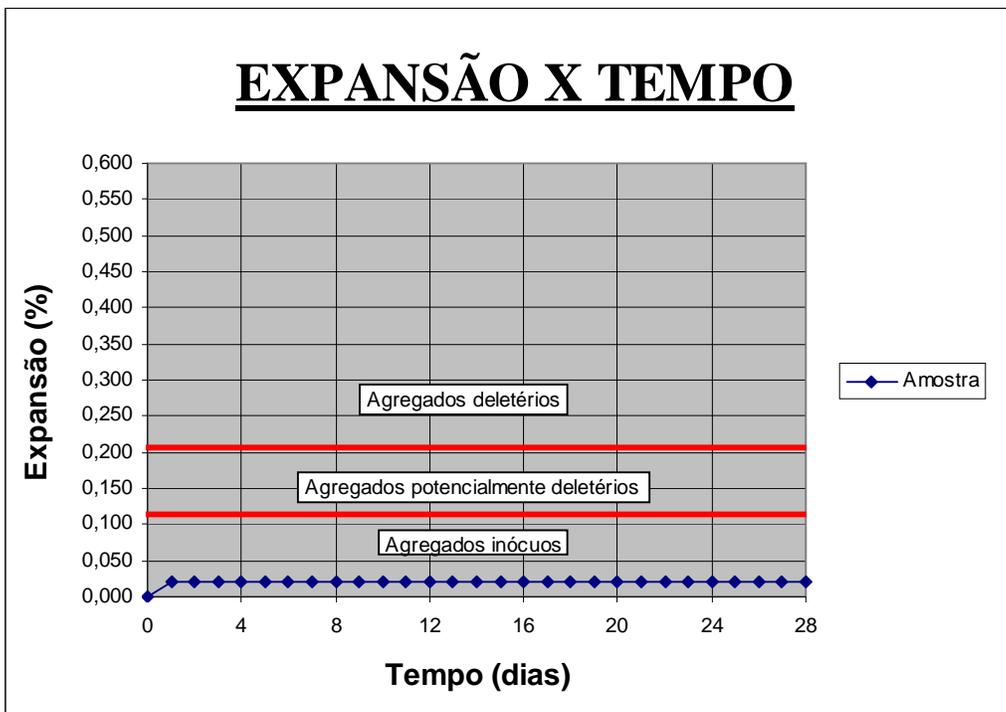


Figura 32 – Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Z-Dantas.

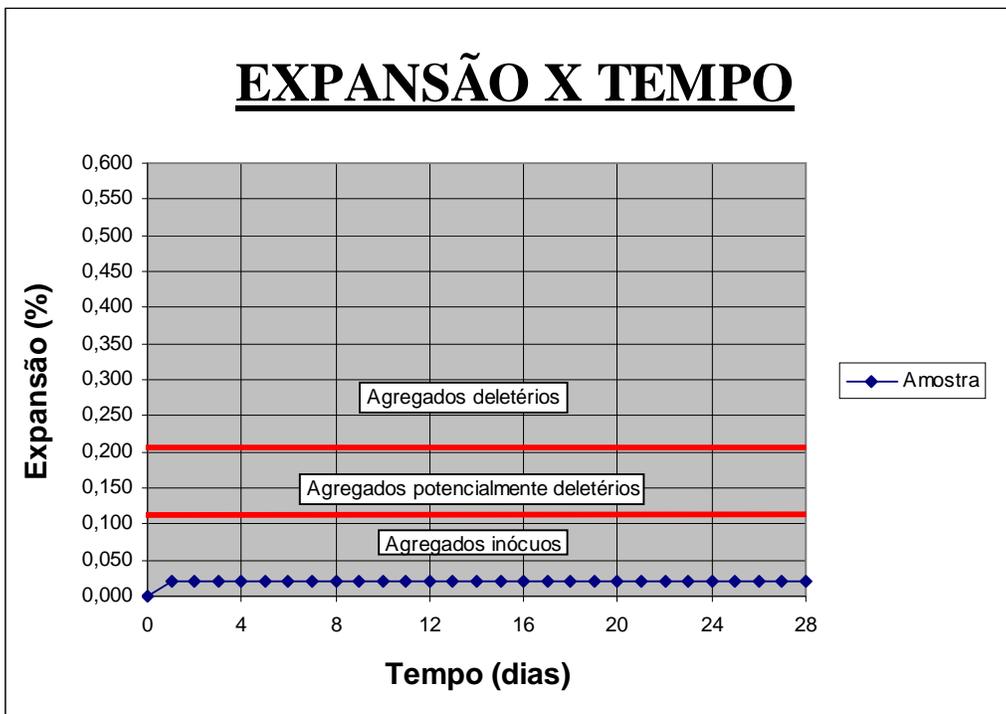


Figura 33 – Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Ameta.

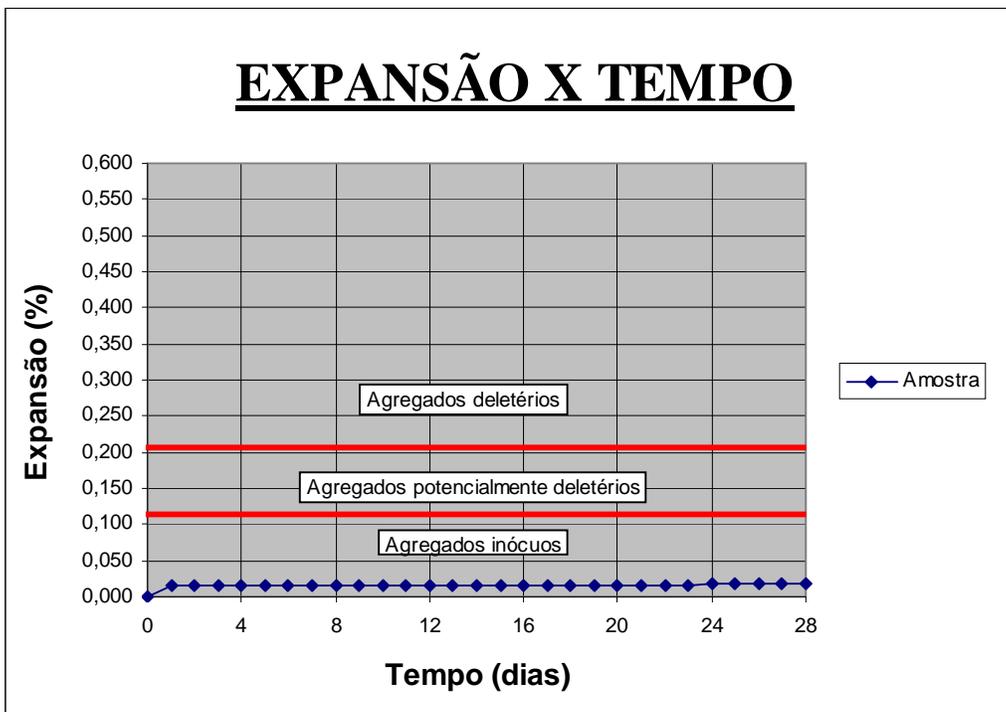


Figura 34 – Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra MGM.

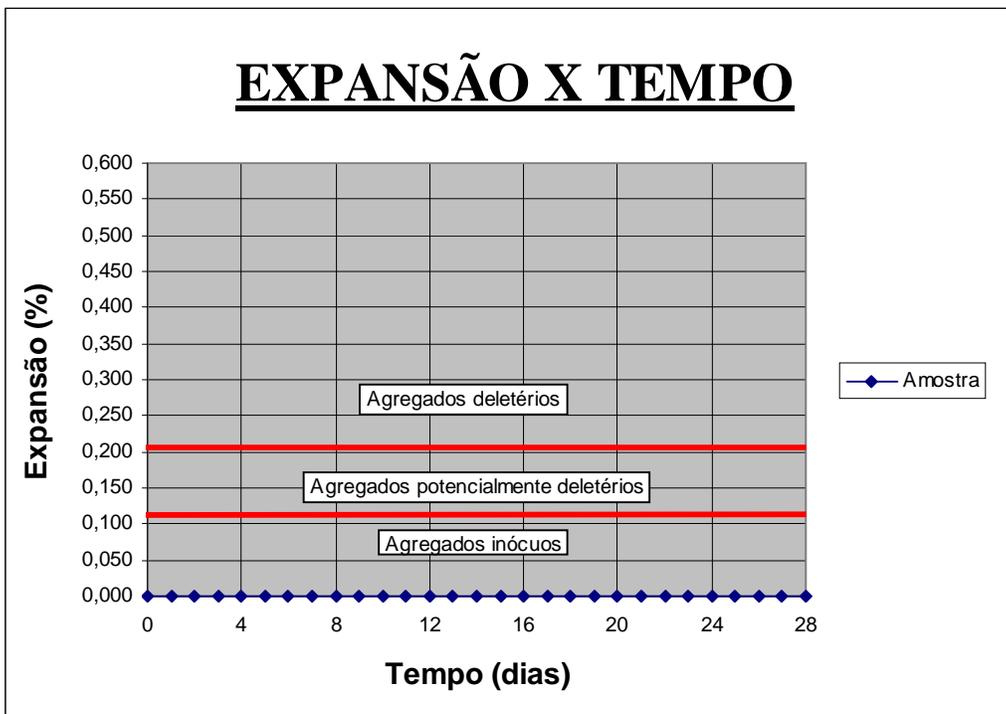


Figura 35 – Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra São José.

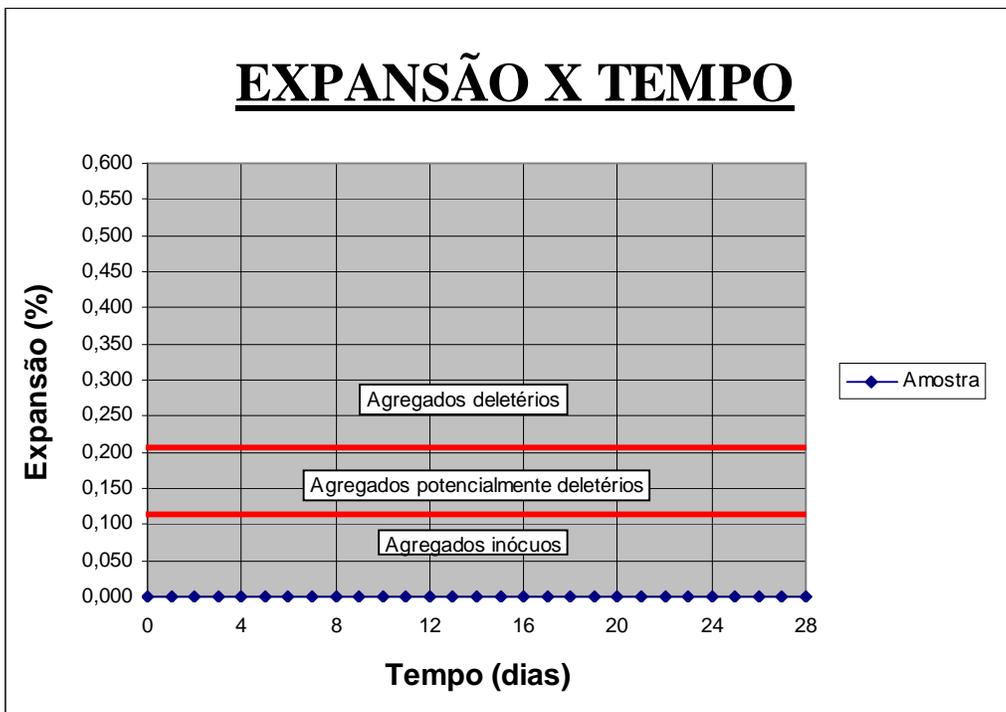


Figura 36 – Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Kataman.

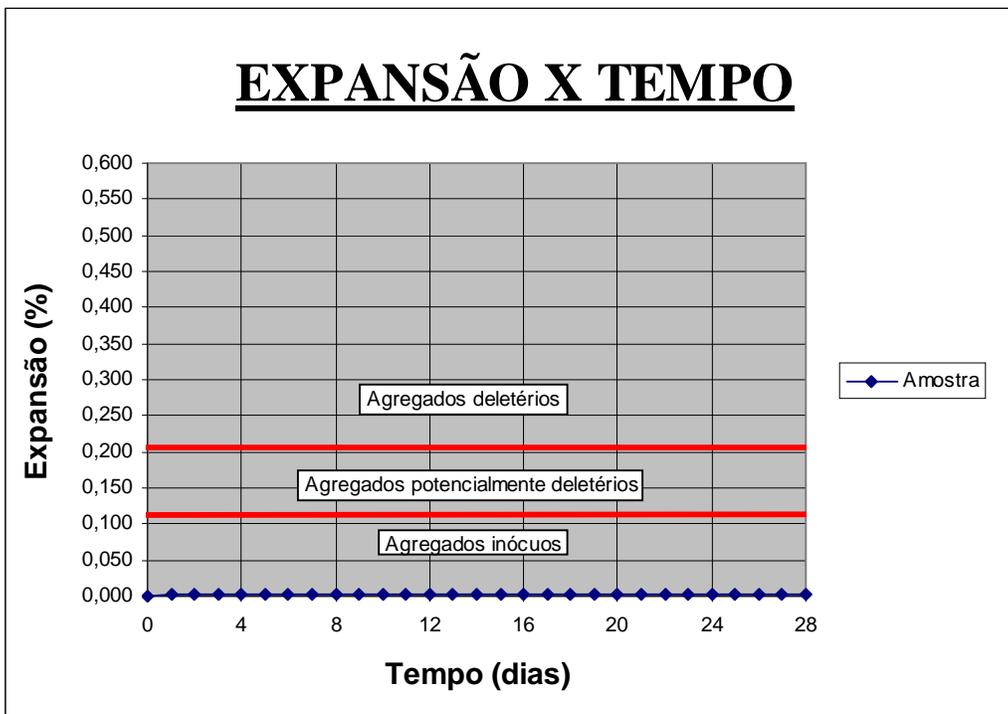


Figura 37 – Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra Ramal do 15.

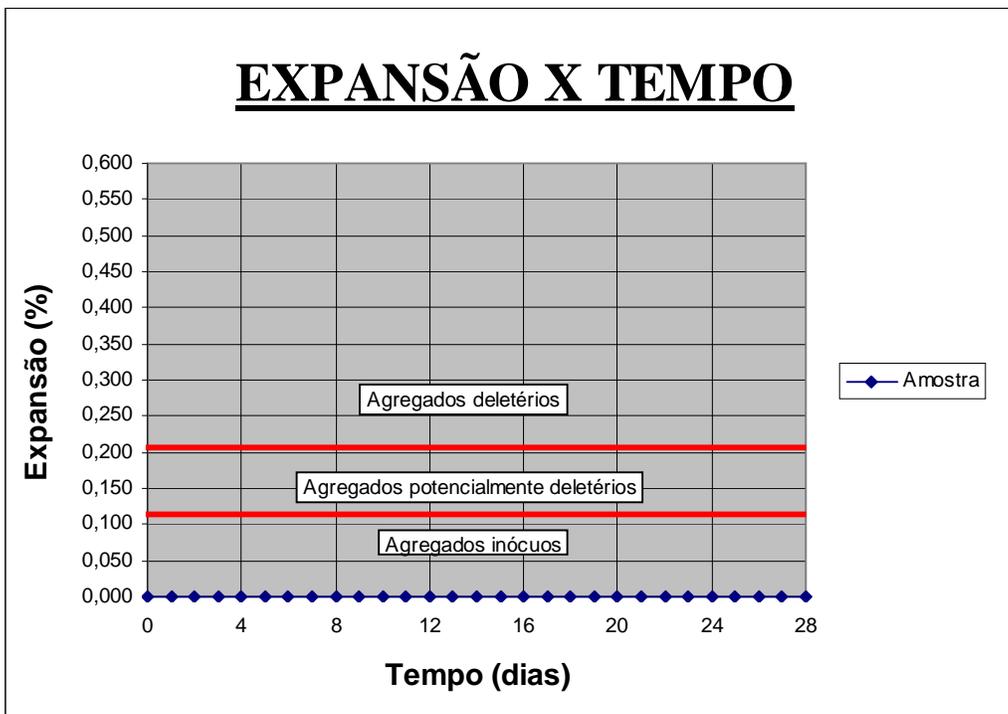


Figura 38 – Gráfico de expansão (%) x idade (dias) da amostra WH.

É possível observar na tabela 14 que todas as amostras apresentaram um percentual de expansão, tanto aos 16 dias quanto aos 28 dias, abaixo do especificado na norma ASTM C-1260 (1994), onde rege que as amostras seriam consideradas reativas, a partir do momento que as mesmas apresentassem expansões superiores a 0,10% aos 16 dias de idade. Fato este não ocorrido, o que indica um comportamento inócuo das amostras estudadas. A amostra que apresentou maior índice de expansão foi a amostra **AMETA** com 0,021% aos 16 dias e 0,022% aos 28 dias. Enquanto que as amostras **SÃO JOSÉ, KATAMAN e W.H**, foram as que apresentaram menor índice de expansão, ou seja, 0,000% tanto aos 16 dias quanto aos 28 dias. Em ambos os casos, tanto no maior quanto no menor índice de expansão, todas ficaram bem abaixo do percentual estabelecido em norma. Este fato também pode ser observado nas figuras 31 a 38, onde é possível verificar que em nenhum dos casos, as amostras apresentaram valores que ficassem acima da região delimitada como agregados potencialmente deletérios.

Em comparação ao trabalho realizado por VALDUGA (2002), pode-se definir os agregados graúdos da região de Belém como estáveis em relação à reação álcali-agregado, uma vez que em nenhum dos casos houve manifestação de tal fenômeno químico. Situação esta não ocorrida nos estudos realizados por VALDUGA (2002), onde das 18 amostras de agregados graúdos ensaiados, 15 apresentaram, na avaliação final, um comportamento deletério. A explicação para este fato deve-se provavelmente ao tipo de rocha estudada, sendo sua maioria basalto e granito.

Após o ensaio de determinação da reatividade potencial pelo método acelerado, procedeu-se uma análise visual para constatação do aspecto das barras. Nesta análise foi observado que as barras não apresentavam grandes mudanças em seu aspecto, ficando isento de fissuras, manchas superficiais, exsudações e grandes quantidades de poros, o que caracteriza o não surgimento de reação álcali-agregado. Outro fato importante a ser observado é o empenamento dos corpos-de-prova, onde o mesmo deve ser colocado em uma superfície plana, de modo que suas extremidades toquem a superfície de referência, sendo sua medição realizada com aproximação de 0,3 mm. Todos os corpos-de-prova foram verificados durante o ensaio de determinação da reatividade potencial pelo método acelerado, e foi possível constatar que em nenhum dos casos houve empenamento, evidenciando novamente a não manifestação da reação álcali-agregado.

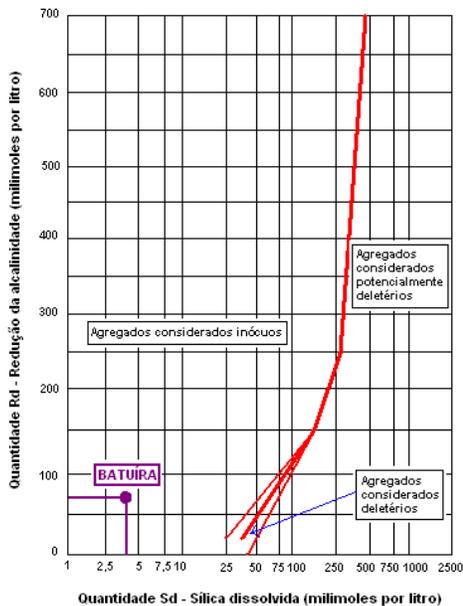
#### 4.2.2. MÉTODO QUÍMICO

Este método é normatizado como NBR 9774 (1987) e prescreve o método químico para verificação da reatividade potencial de agregados com álcalis de cimento portland, através da reação entre solução de hidróxido de sódio 1N com o agregado convenientemente preparado, durante 24 horas, à temperatura de 80°C.

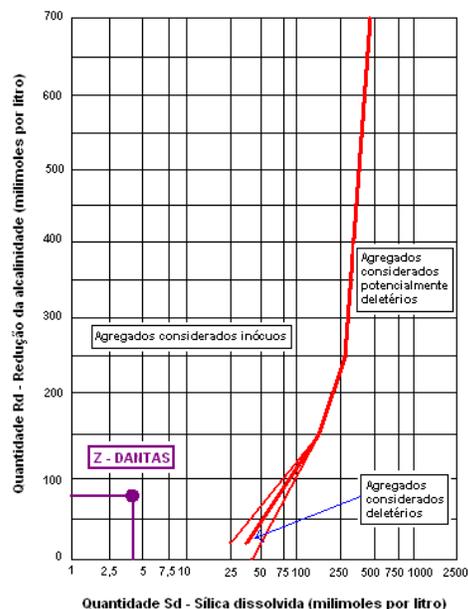
Na tabela 15, assim como nas figuras de 39 a 42, constam os valores de sílica dissolvida (concentração de SiO<sub>2</sub> em mmol/l no filtrado original) e de redução da alcalinidade (também expressa em mmol/l) para cada amostra ensaiada. Os dois valores correspondem à média de três determinações, já descontando o resultado do ensaio em branco.

Tabela 15 – Valores de sílica dissolvida (em mmol/l) e redução da alcalinidade (em mmol/l) para cada amostra.

<b>AMOSTRAS</b>	<b>SÍLICA DISSOLVIDA (mmol/l)</b>	<b>REDUÇÃO DA ALCALINIDADE (mmol/l)</b>
BATUÍRA	4,20	74,88
Z – DANTAS	4,47	81,03
AMETA	4,95	82,54
MGM	4,03	68,00
SÃO JOSÉ	1,74	10,76
KATAMAN	1,82	10,81
RAMAL DO 15	2,60	10,05
WH	1,77	10,98

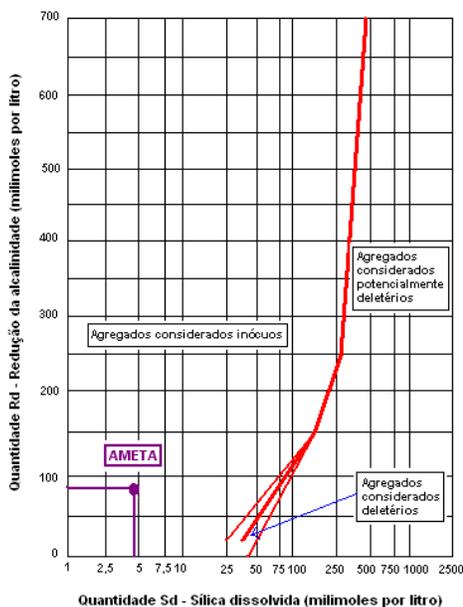


(a)

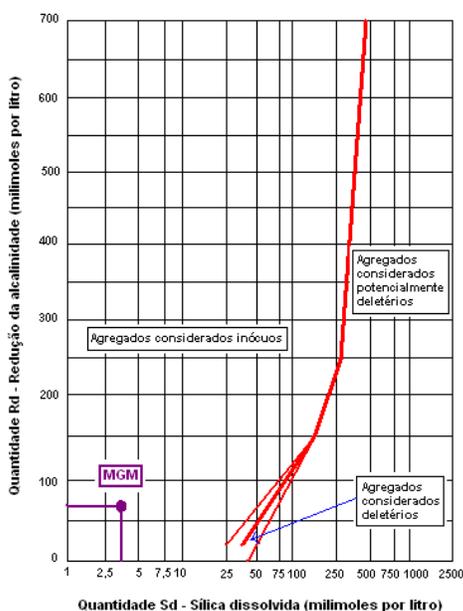


(b)

Figura 39 – Gráfico de redução da alcalinidade (mmol/l) x sílica dissolvida (mmol/l) da amostra Baturá (a) e da amostra Z – Dantas (b).

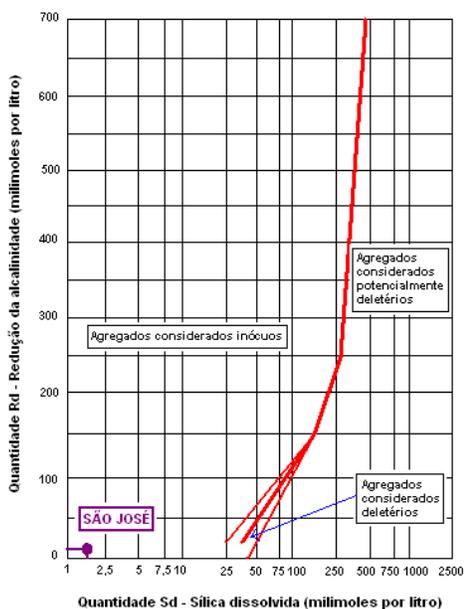


(a)

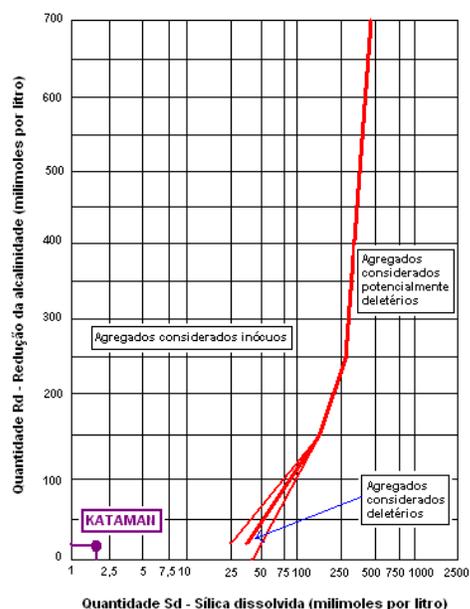


(b)

Figura 40 – Gráfico de redução da alcalinidade (mmol/l) x sílica dissolvida (mmol/l) da amostra Ameta (a) e da amostra MGM (b).

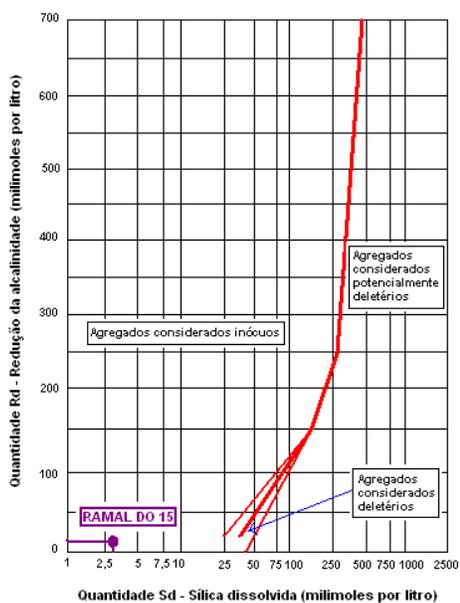


(a)

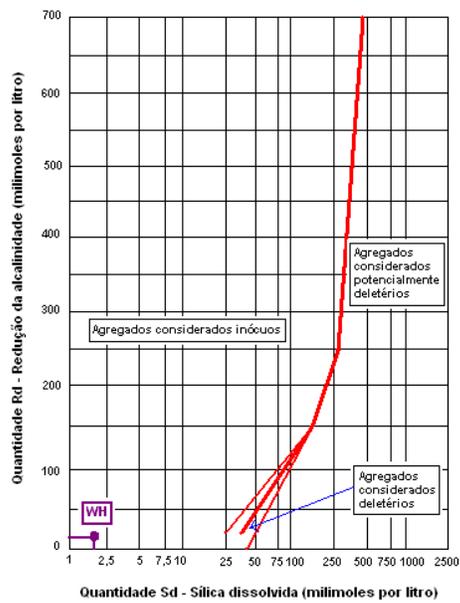


(b)

Figura 41 – Gráfico de redução da alcalinidade (mmol/l) x sílica dissolvida (mmol/l) da amostra São José (a) e da amostra Kataman (b).



(a)



(b)

Figura 42 – Gráfico de redução da alcalinidade (mmol/l) x sílica dissolvida (mmol/l) da amostra Ramal do 15 (a) e da amostra WH (b).

Pode-se constatar na tabela 15, que todas as amostras apresentaram resultados satisfatórios no que diz respeito ao não surgimento da reação álcali-agregado. Sendo a amostra **AMETA** responsável pelo maior valor de sílica dissolvida e de redução da alcalinidade, com 4,95 mmol/l e 82,54 mmol/l, respectivamente. Enquanto que a amostra **SÃO JOSÉ**, apresentou o menor valor de sílica dissolvida, com 1,74 mmol/l, e a amostra **RAMAL DO 15** o menor valor de redução da alcalinidade, com 10,05 mmol/l. Pode-se observar também nos gráficos, que todas as amostras ensaiadas apresentaram resultados semelhantes, ou seja, nenhuma delas apresentou o surgimento de reação álcali-agregado. Em todos os casos, os pontos de interseção entre a redução da alcalinidade e a sílica dissolvida das amostras, localizaram-se em regiões os quais estavam dentro dos limites especificados nos gráficos como sendo agregados inócuos.

Os resultados obtidos neste ensaio, serviram para ratificar ainda mais os resultados apresentados no ensaio de potencialidade reativa pelo método acelerado. Pois, em ambos os casos, não houve qualquer tipo de manifestação referente à reação álcali-agregado. É importante mencionar também que, a amostra **AMETA** foi a que apresentou maiores índices favoráveis ao surgimento da reação, tanto no ensaio acelerado quanto no químico. Porém, os valores apresentados podem ser considerados não preocupantes, uma vez que, estão bem abaixo dos valores estabelecidos para o desencadeamento da RAA.

Em comparação aos estudos realizados por VALDUGA (2002), constatou-se que os resultados, referentes ao ensaio químico, foram semelhantes. Apresentando em ambos os casos, um comportamento inócuo das amostras estudadas. Contudo, é importante ressaltar que embora o ensaio químico realizado por VALDUGA (2002), não tenha apresentado o surgimento do fenômeno da reação álcali-agregado, o mesmo não ocorreu com o ensaio acelerado. A provável explicação para tal fato, deve-se ao tipo de reação desenvolvida: tipo álcali-silicato que é uma reação lenta, portanto não facilmente detectável por este método.

Em virtude da reação desenvolvida neste trabalho também poder ser uma reação álcali-silicato, optou-se por realizar investigações auxiliares através da análise petrográfica e da técnica de microscopia eletrônica de varredura. Com a realização destes dois ensaios é possível fechar de forma conclusiva a análise das amostras coletadas.

### 4.3. ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

A seguir serão apresentadas as análises de petrografia e microscopia eletrônica de varredura.

#### 4.3.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA

Devido às amostras coletadas serem provenientes de jazidas localizadas próximas uma das outras e retiradas do mesmo leito de rio (rio Guamá), e com isso, apresentarem as mesmas características e formações mineralógicas, como mencionado anteriormente no programa experimental, optou-se por analisar apenas o seixo da jazida M.G.M. Onde foi possível observar, através da petrografia, que tal amostra apresentava-se como um mineral de relevo baixo positivo, hábito granular, cor de interferência cinza de 1ª ordem, caráter ótico uniaxial, sinal ótico positivo e inúmeras fissuras em sua superfície. Estas fissuras apresentavam-se orientadas, seguindo um padrão de direcionamento, sendo em sua maioria preenchidas por minerais opacos e quartzo. A seguir, na figura 43, é possível observar as fissuras orientadas presentes na superfície do seixo.



Figura 43 – Fissuras orientadas presentes na superfície do seixo da jazida M.G.M.

Em virtude das características apresentadas pela amostra analisada, é possível afirmar que o seixo coletado da jazida M.G.M é um mineral de quartzo. E as fissuras presentes em sua superfície são provenientes do esforço físico sofrido na etapa de retirada do material do leito do rio.

Com objetivo de complementar os estudos, realizou-se algumas verificações, através da análise petrográfica, no corpo-de-prova prismático da jazida M.G.M, utilizado no ensaio acelerado. E verificou-se que sua matriz é composta por argilo minerais, minerais opacos e carbonatos. Sendo possível observar a formação de poros arredondados e de diâmetros diferentes. Totalizando um índice de porosidade de aproximadamente 10% a 15%, e que, em razão do tritramento da matéria prima original, necessário para confecção do corpo-de-prova, os pórfiros apresentaram-se angulosos e de tamanhos diversos. Na figura 44 é possível observar os pórfiros de quartzo em meio a uma matriz porosa.

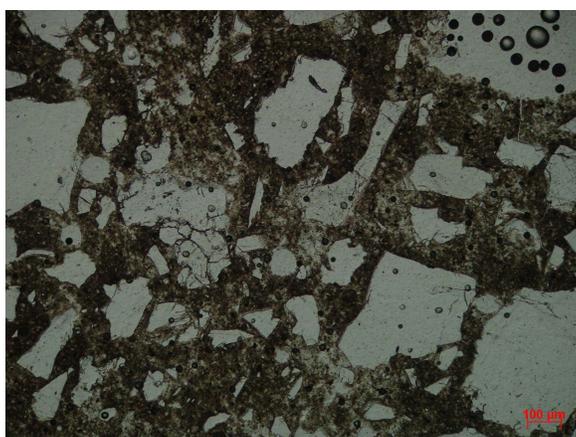


Figura 44 – Análise petrográfica realizada no corpo-de-prova prismático da amostra M.G.M, utilizada no ensaio de potencialidade reativa pelo método acelerado.

Através da análise petrográfica foi possível verificar que o mineral de quartzo, mesmo triturado a uma granulometria menor que 4,8 mm, manteve suas características originais. Isso ocorre pelo fato do seixo retirado das jazidas de Ourém e Capitão Poço, o qual é extraído do leito do rio Guamá, ser um mineral de quartzo de estrutura bem definida e sem extinção ondulante. Em função disso, pode-se concluir que estas amostras são inócuas. Pois sob essas condições, não há possibilidade de manifestação do fenômeno da reação expansiva, uma vez que, para o surgimento da mesma, é necessário que o mineral apresente uma estrutura instável e com extinção ondulante. Tal fato acaba confirmando os resultados apresentados nos ensaios de reatividade potencial pelos métodos químico e acelerado.

### 4.3.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Conforme mencionado anteriormente, fez-se uso da técnica de análise da microestrutura, visando ratificar os resultados obtidos nos ensaios acelerado e químico. Deste modo, tem-se colocado a seguir, as observações obtidas na microscopia eletrônica de varredura. Em paralelo ao emprego do MEV, fez-se uso da técnica de espectrometria de energia dispersiva (EDS), com o objetivo de identificar a composição química dos materiais analisados. A seguir serão apresentadas, nas figuras 45 a 52, as imagens e os espectros de cada amostra.

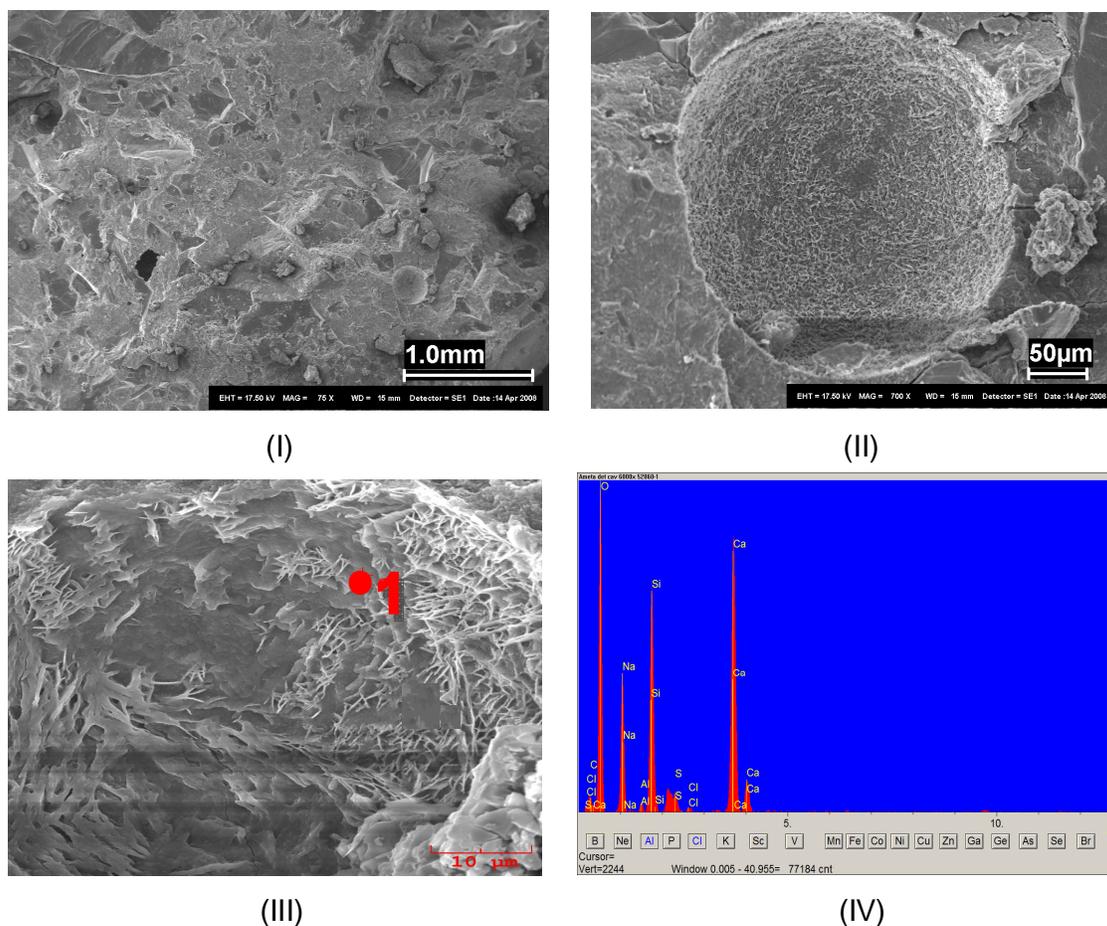
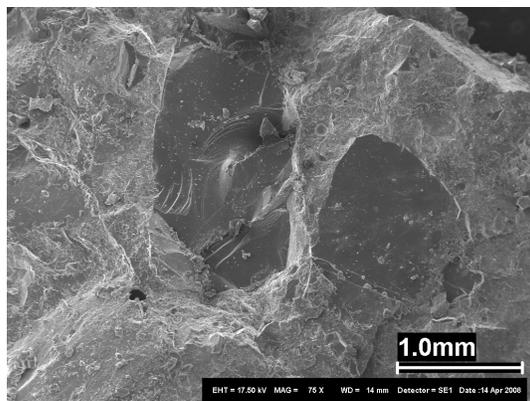
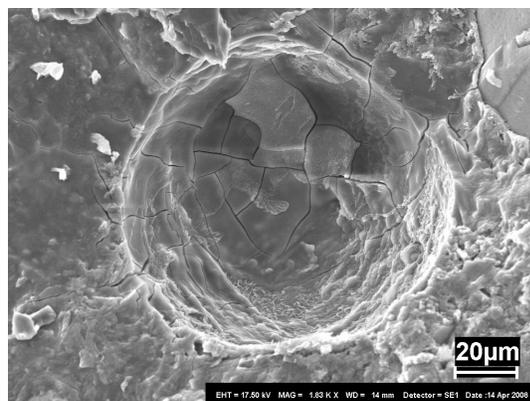


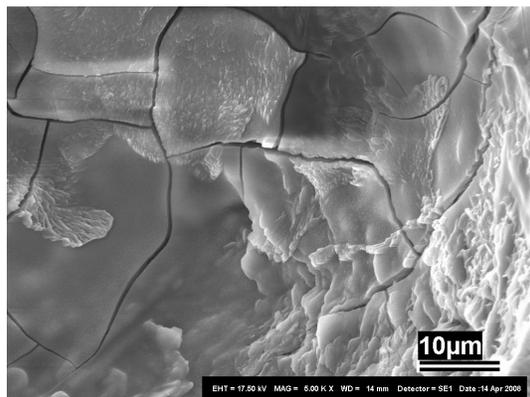
Figura 45 – (I) Vista geral da amostra **Ameta** submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **Ameta**; (III) Ponto escolhido para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (IV) Espectro do **ponto 01** da amostra **Ameta**.



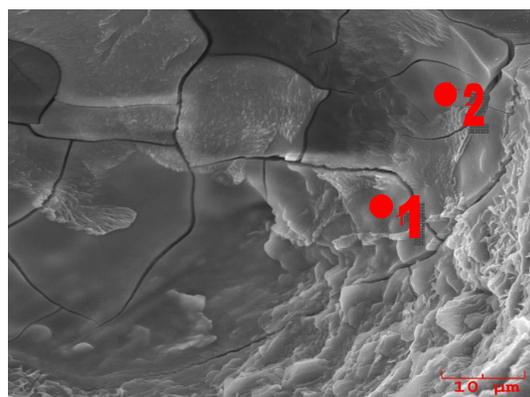
(I)



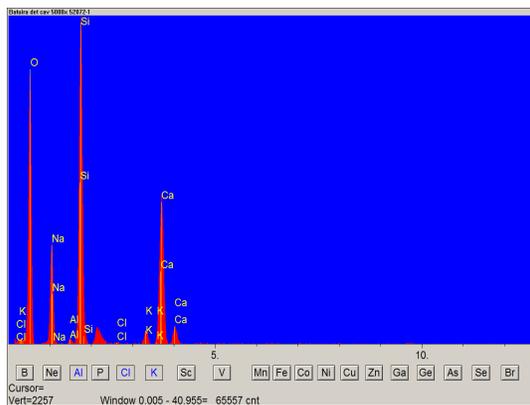
(II)



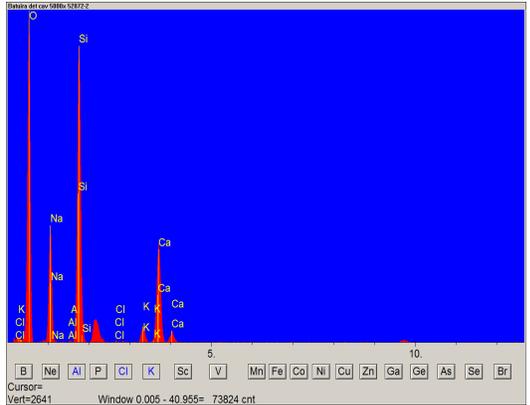
(III)



(IV)

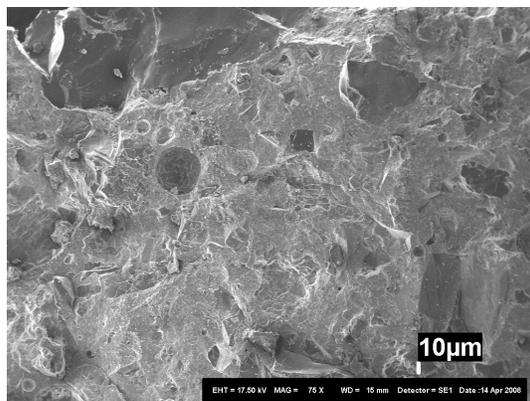


(V)

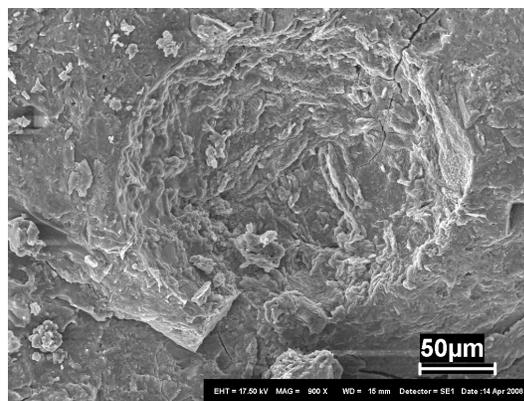


(VI)

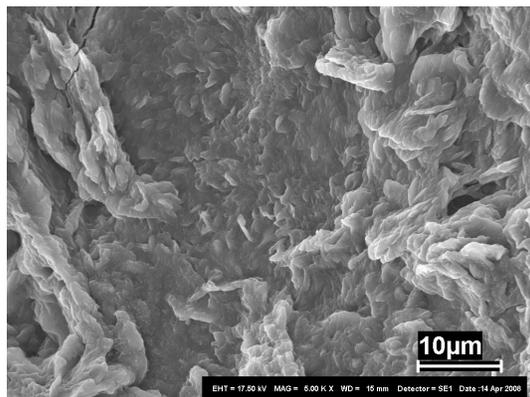
Figura 46 – (I) Vista geral da amostra **Batuíra** submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **Batuíra**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **Batuíra**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **Batuíra**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **Batuíra**.



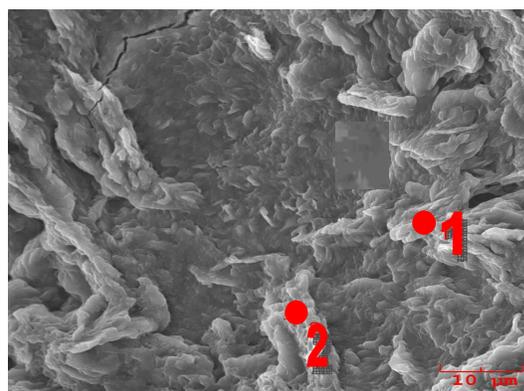
(I)



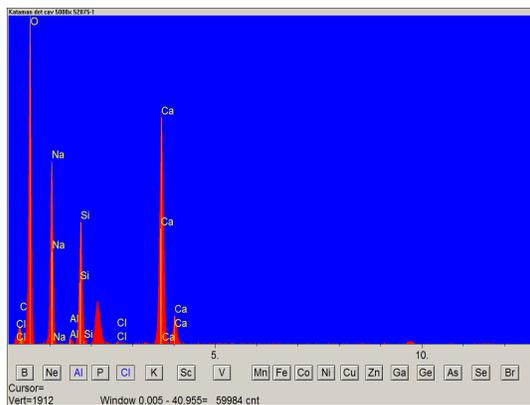
(II)



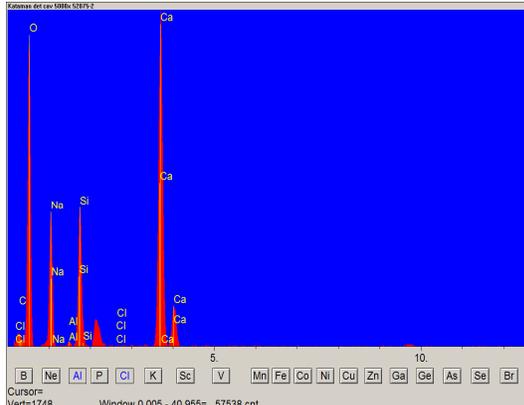
(III)



(IV)

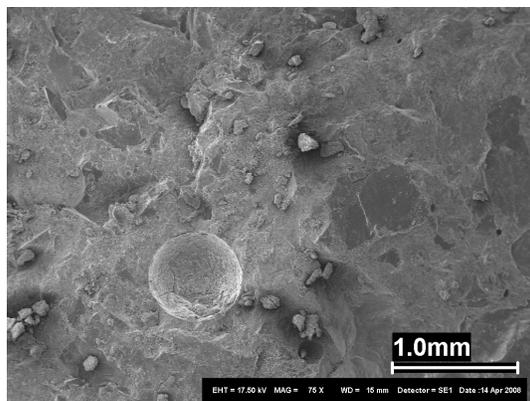


(V)

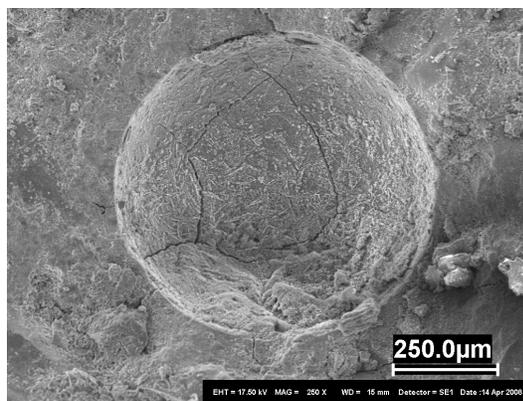


(VI)

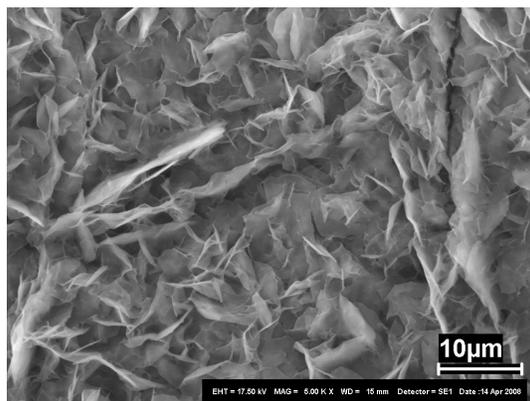
Figura 47 – (I) Vista geral da amostra **Kataman** submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **Kataman**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **Kataman**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **Kataman**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **Kataman**.



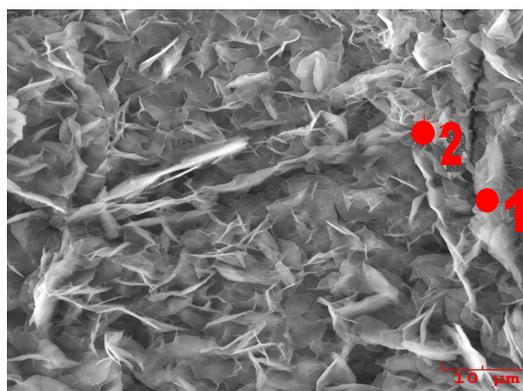
(I)



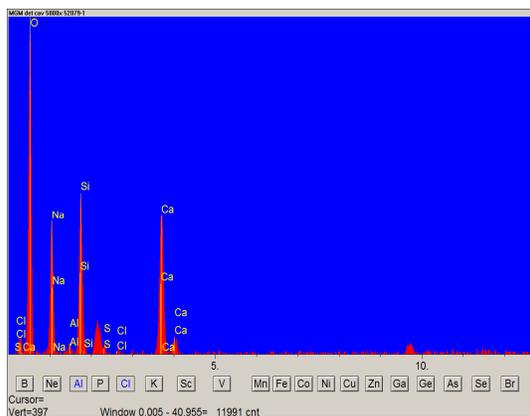
(II)



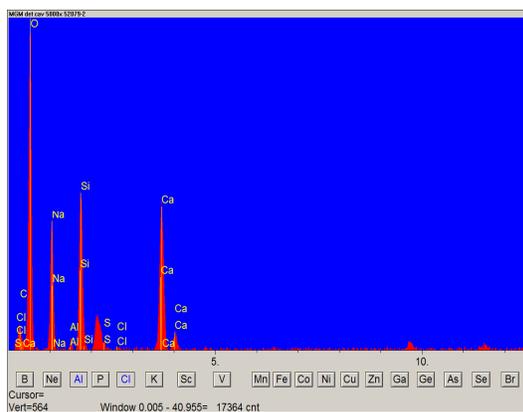
(III)



(IV)

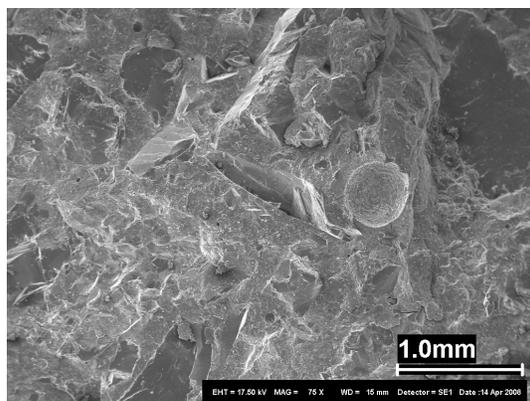


(V)

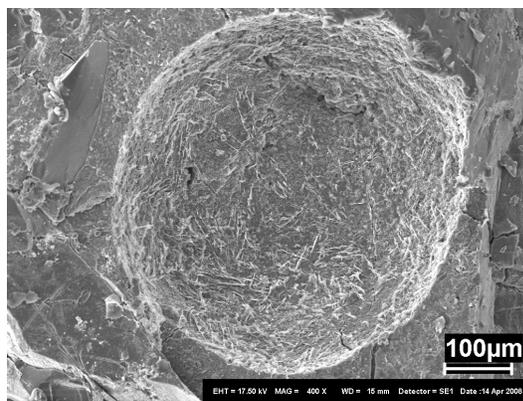


(VI)

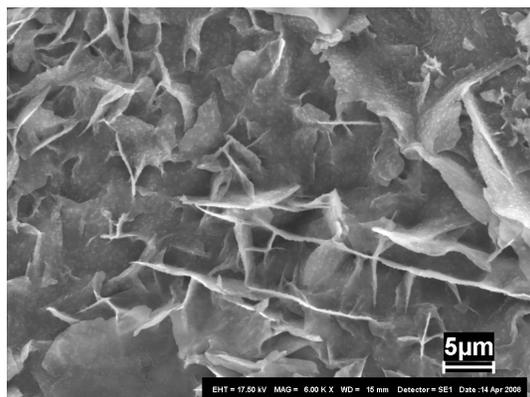
Figura 48 – (I) Vista geral da amostra **MGM** submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **MGM**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **MGM**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **MGM**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **MGM**.



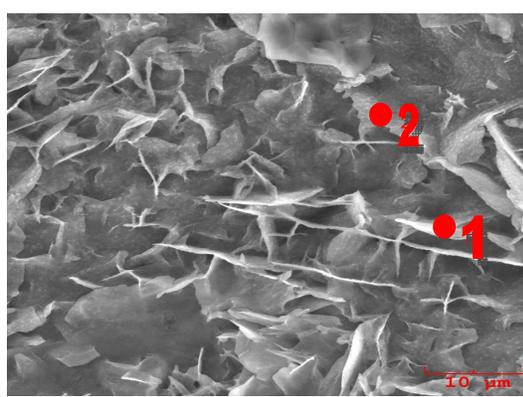
(I)



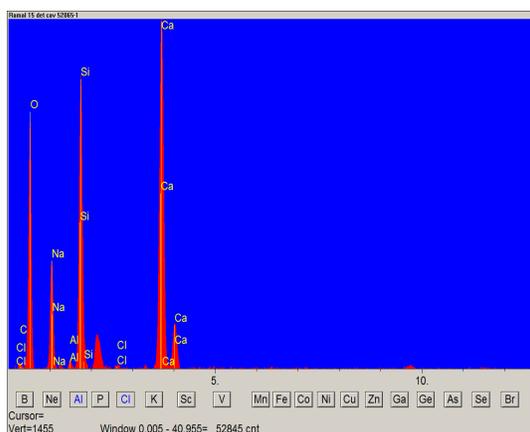
(II)



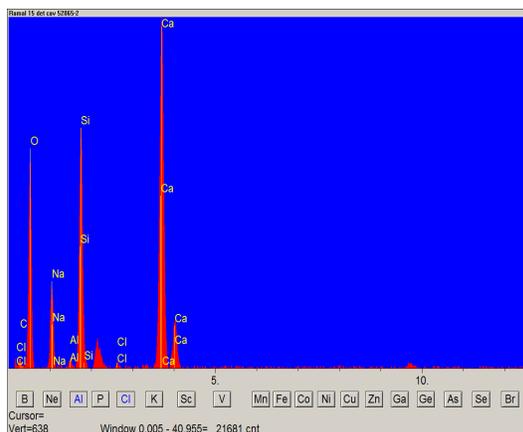
(III)



(IV)

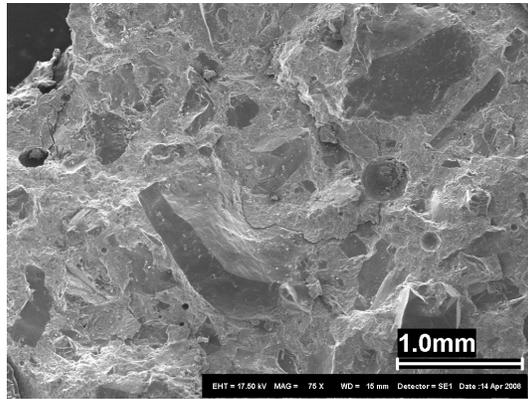


(V)

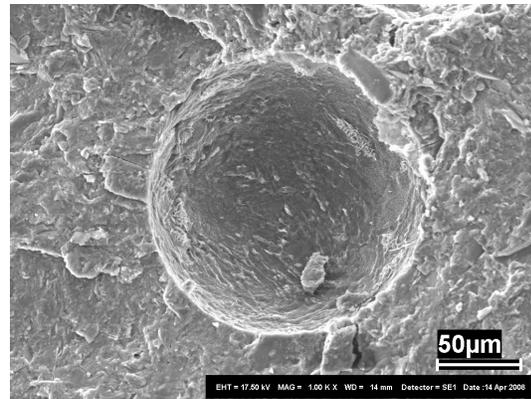


(VI)

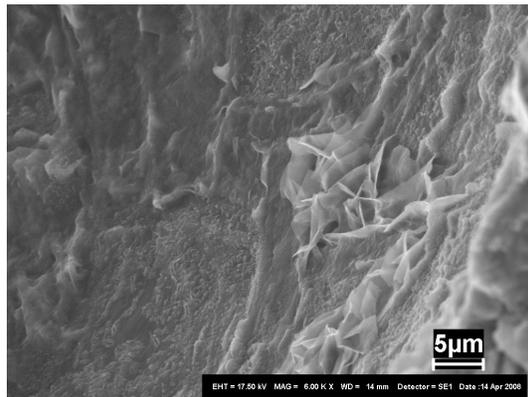
Figura 49 – (I) Vista geral da amostra **Ramal do 15** submetida ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **Ramal do 15**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **Ramal do 15**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **Ramal do 15**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **Ramal do 15**.



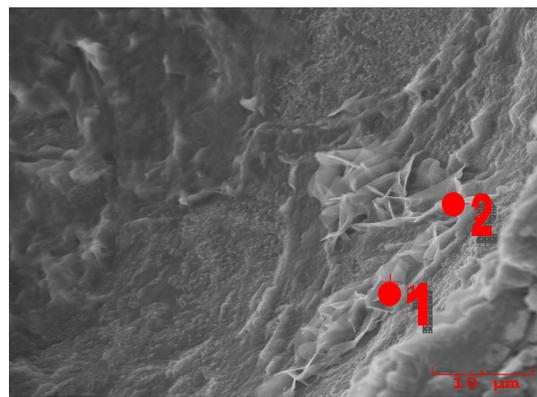
(I)



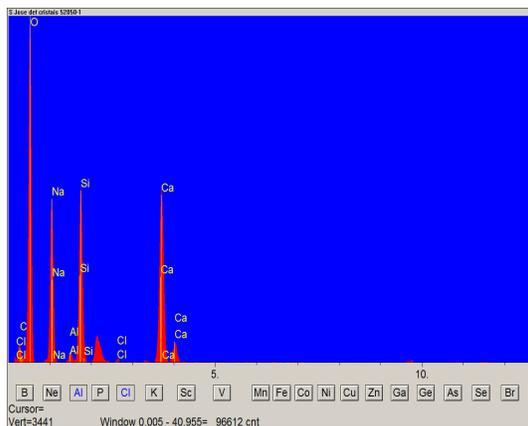
(II)



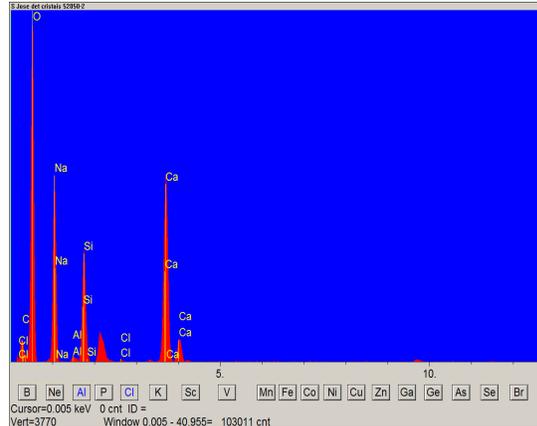
(III)



(IV)

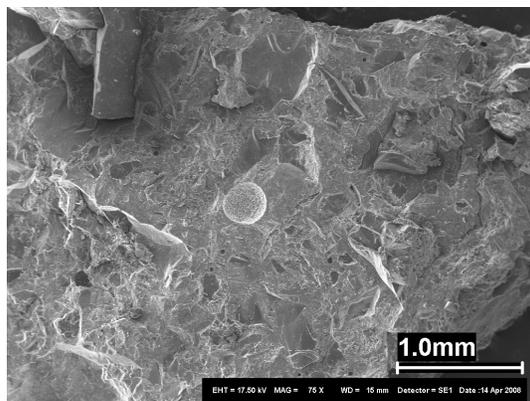


(V)

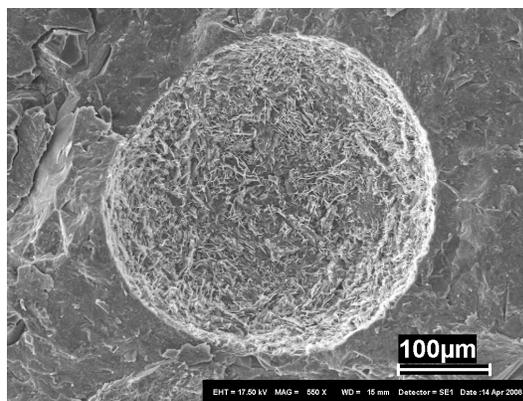


(VI)

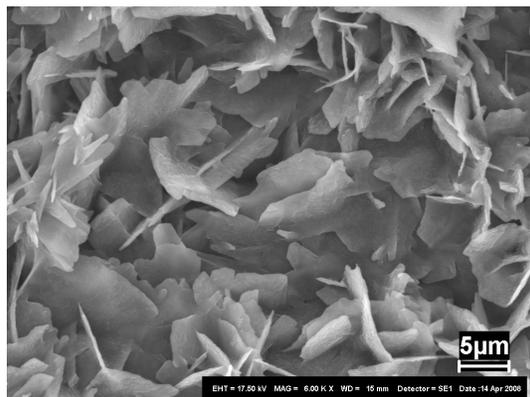
Figura 50 – (I) Vista geral da amostra **São José** submetido ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **São José**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **São José**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **São José**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **São José**.



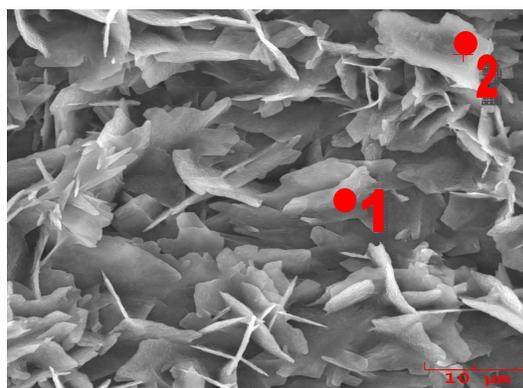
(I)



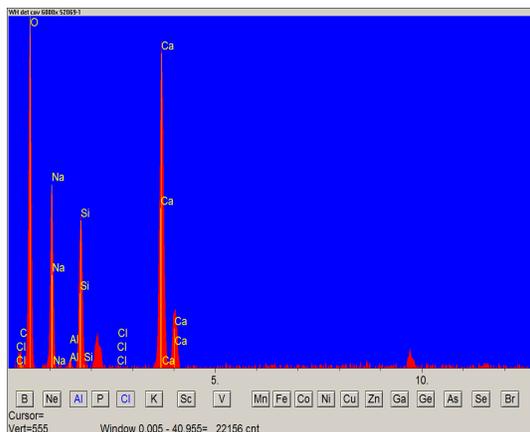
(II)



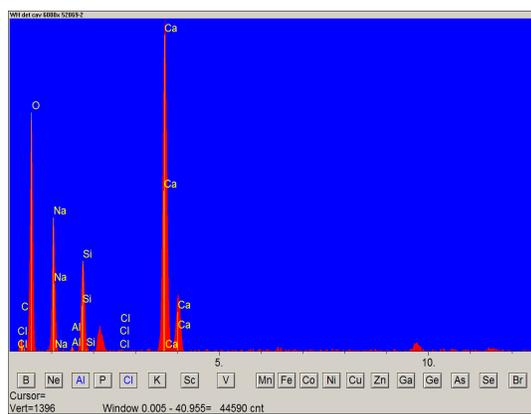
(III)



(IV)

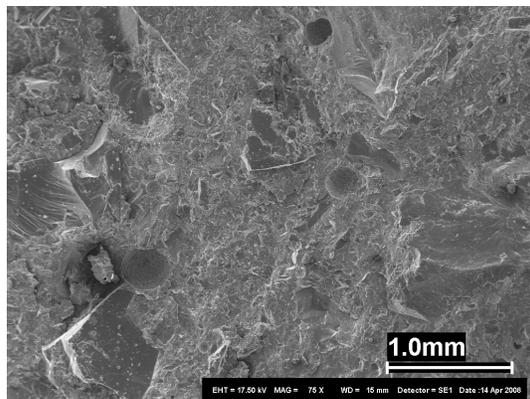


(V)

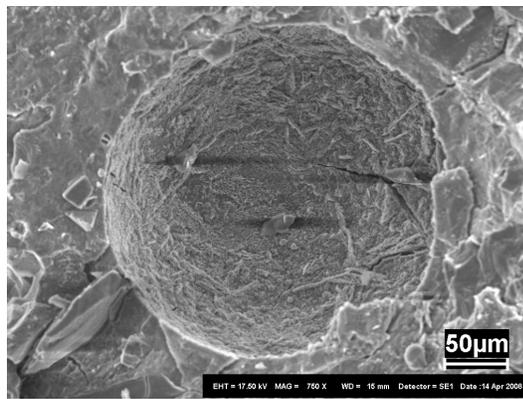


(VI)

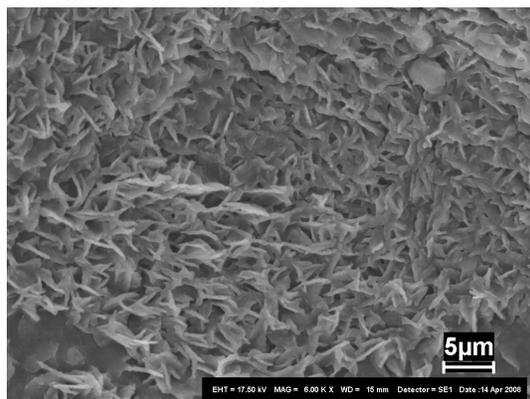
Figura 51 – (I) Vista geral da amostra **WH** submetido ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **WH**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **WH**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **WH**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **WH**.



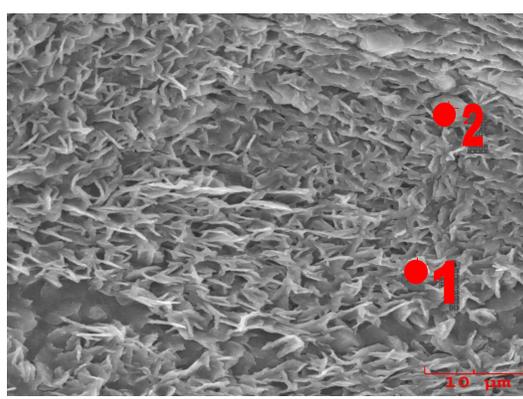
(I)



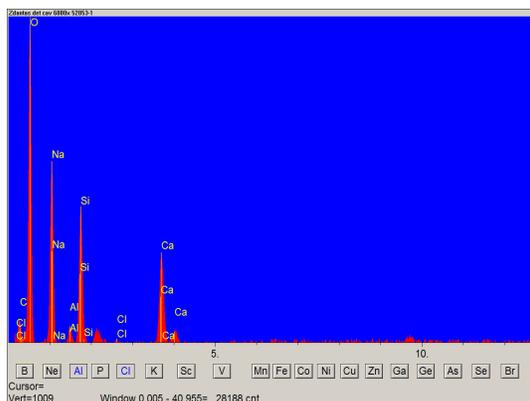
(II)



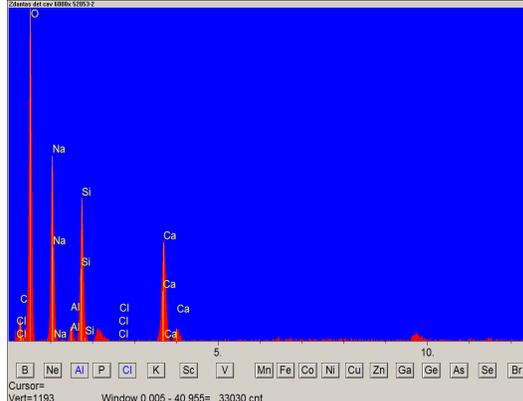
(III)



(IV)



(V)



(VI)

Figura 52 – (I) Vista geral da amostra **Z-Dantas** submetido ao ensaio do MEV; (II) Aproximação da imagem para melhor visualização do poro da amostra **Z-Dantas**; (III) Detalhamento da superfície do poro da amostra **Z-Dantas**; (IV) Pontos escolhidos para espectrometria de energia dispersiva (EDS); (V) Espectro do **ponto 01** da amostra **Z-Dantas**; (VI) Espectro do **ponto 02** da amostra **Z-Dantas**.

Foi possível observar, pela espectrometria de energia dispersiva, que todas as amostras ensaiadas apresentaram composição química semelhante, fato este já esperado, uma vez que as mesmas foram extraídas de jazidas localizadas na mesma região e do mesmo leito de rio. Contudo é importante ressaltar que as amostras Ameta, Batuíra e MGM apresentaram outros elementos químicos, como enxofre e potássio, mais em quantidades insignificantes. Na análise de microscopia eletrônica de varredura foi possível constatar a presença de quartzo em todas as amostras ensaiadas, fato este de grande importância, uma vez que o quartzo, quando apresenta extinção ondulante, é considerado um dos principais elementos responsáveis por ocasionar a reação álcali-agregado, o que não é o nosso caso. Pois o quartzo presente nas amostras analisadas em nosso estudo, apresentou-se com uma estrutura muito bem definida e sem extinção ondulante, fato este que pôde ser observado na análise petrográfica realizada na amostra M.G.M. É importante mencionar também que, as oito amostras ensaiadas apresentaram uma alta concentração de cálcio, ocasionando com isso, uma redução em sua concentração alcalina, tornando as amostras completamente inócuas. Caso a concentração de cálcio das amostras não fosse suficiente e o quartzo não apresentasse uma estrutura estável, os álcalis iriam reagir formando um gel álcali-sílica, que em presença de água, se expandiria e ocasionaria fissuras quando as forças de expansão fossem superiores à resistência à tração da pasta de cimento.

A análise de microscopia eletrônica de varredura, juntamente com a espectrometria de energia dispersiva, foi de grande valia para este trabalho. Pois através destes dois ensaios, foi possível afirmar de forma conclusiva, que o seixo coletado das jazidas de Ourém e Capitão Poço, as quais abastecem a região metropolitana de Belém, não é reativo na presença de álcalis. O que acaba ratificando os resultados obtidos nos ensaios acelerado, químico e petrográfico. Na tabela 16 a seguir, estão as análises referentes ao EDS, para cada amostra ensaiada.

Tabela 16 – Análise das amostras ensaiadas - EDS.

AMOSTRAS	ANÁLISE	REATIVA?
São José Z-Dantas Ramal do 15 Kataman WH	As referidas amostras apresentaram em sua composição os seguintes elementos químicos: oxigênio, cloro, sódio, alumínio, silício e cálcio. Sendo que apenas o oxigênio, sódio, silício e o cálcio apresentaram quantidades expressivas. Mesmo com a elevada concentração de silício e com a presença de quartzo, as amostras apresentaram-se inócuas, devido o alto teor de cálcio presente nas mesmas. Pois o cálcio diminui a concentração alcalina, tornando a reação sem efeito deletério.	Não
Ameta MGM	As referidas amostras apresentaram em sua composição os seguintes elementos químicos: oxigênio, cloro, enxofre, sódio, alumínio, silício e cálcio. Sendo que apenas o oxigênio, sódio, silício e o cálcio apresentaram quantidades expressivas. O elemento químico enxofre encontrado nas amostras apresentou-se em quantidades desprezíveis, não influenciando em nada a reação. Também foi constatado nas amostras a presença de quartzo e elevada concentração de silício, contudo o alto teor de cálcio foi suficiente para assegurar a não formação de gel expansivo.	Não
Batuíra	A referida amostra apresentou em sua composição os seguintes elementos químicos: oxigênio, cloro, potássio, sódio, alumínio, silício e cálcio. Sendo que apenas o oxigênio, sódio, silício e o cálcio apresentaram quantidades expressivas. Enquanto que o potássio manifestou-se em pequenas quantidades, podendo ser considerado desprezível. A amostra batuíra também apresentou alto teor de silício e quartzo, mais assim como as demais amostras estudadas, também foi considerada inócua devido o alto teor de cálcio, fazendo com que houvesse uma redução na concentração alcalina, impedindo assim, o surgimento do gel expansivo.	Não

#### 4.4. SÍNTESE DOS RESULTADOS E MAPEAMENTO DAS JAZIDAS

Com a finalização dos ensaios, foi possível montar uma tabela com resumo de todos os ensaios utilizados para identificação da potencialidade reativa das amostras. A tabela 17 tem por finalidade, além de fazer um resumo dos resultados dos ensaios, classificar e avaliar de forma final e conclusiva as amostras ensaiadas.

Tabela 17 – Resumo dos resultados dos ensaios de determinação da potencialidade reativa.

Amostras	Acelerado			Químico Reativo?	Petrografia Reativo?	MEV Reativo?
	16 dias	28 dias	Reativa?			
Batuíra	0,019	0,021	Não	Não	–	Não
Z-Dantas	0,020	0,020	Não	Não	–	Não
Ameta	0,021	0,022	Não	Não	–	Não
MGM	0,017	0,017	Não	Não	Não	Não
São José	0,000	0,000	Não	Não	–	Não
Kataman	0,000	0,000	Não	Não	–	Não
Ramal do 15	0,002	0,002	Não	Não	–	Não
WH	0,000	0,000	Não	Não	–	Não

No presente trabalho foi possível constatar, tendo como parâmetro os resultados colocados na tabela 17, que nenhuma das amostras apresentou caráter reativo, podendo assim ser classificadas todas como inócuas. É importante mencionar também que, todos os ensaios foram de grande importância para a classificação do material coletado. Sendo cada um responsável por um papel importante na avaliação do mesmo. É possível observar, no que se refere à análise petrográfica, que apenas o seixo da jazida M.G.M foi analisado. Isso porque, como mencionado anteriormente, todas as amostras eram provenientes do leito do rio Guamá. Logo, apresentavam as mesmas características, sendo todas um mineral de quartzo de estrutura bem definida e sem extinção ondulante.

A seguir, na figura 53, encontra-se o mapeamento das principais jazidas fornecedoras de agregados graúdos da região metropolitana de Belém. Através deste mapeamento, é possível observar a proximidade existente entre as jazidas, assim como, sua localização. É possível constatar na legenda, a exemplo da tabela 17, que todas as amostras ensaiadas apresentaram-se sem efeito deletério.

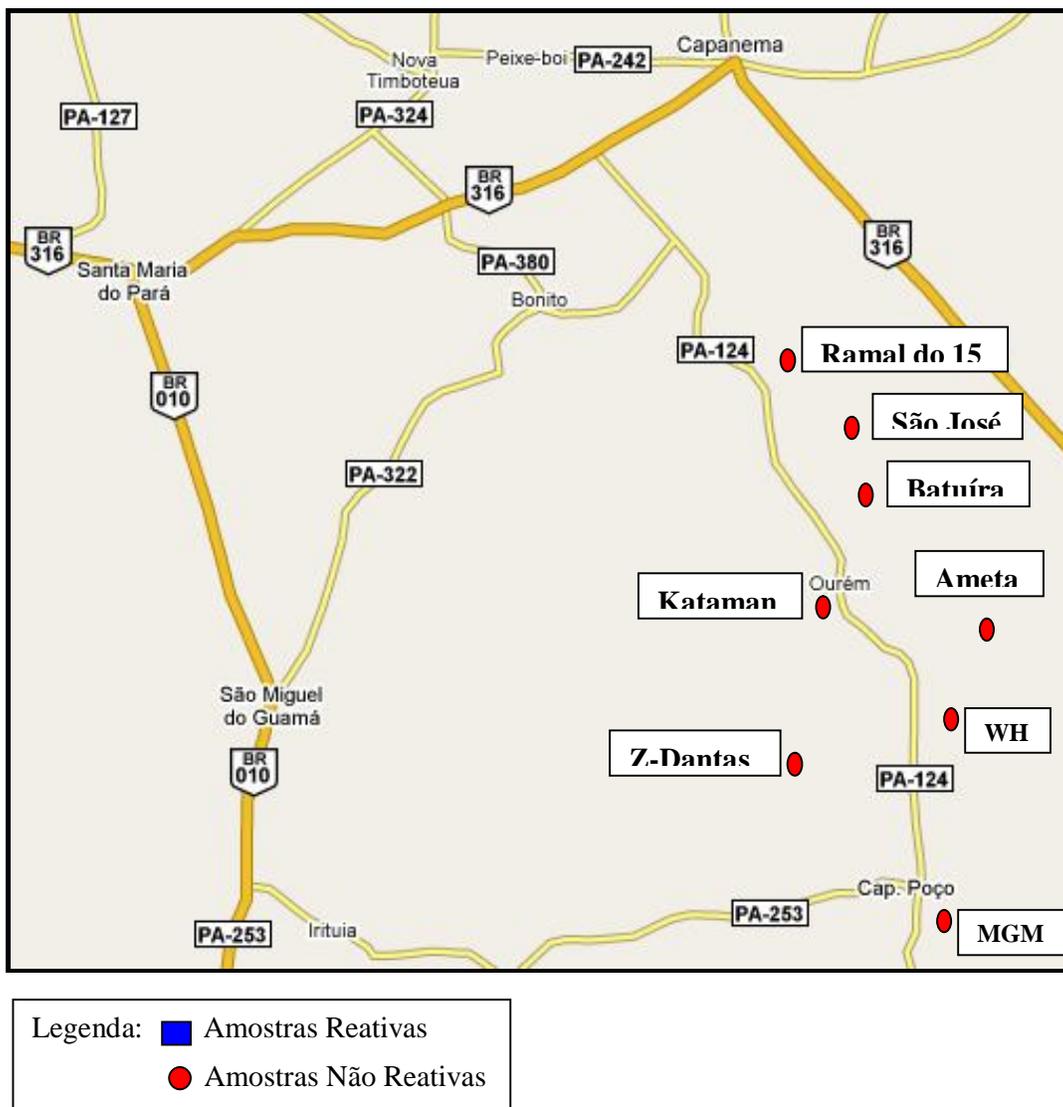


Figura 53 – Mapeamento das principais jazidas fornecedoras de seixo de Belém.

## 5. CONCLUSÕES

Com os estudos realizados no presente trabalho foi possível fazer uma avaliação concreta e conclusiva, referente ao potencial reativo de cada amostra. Os agregados graúdos coletados para análise, os quais foram provindos das jazidas de Ourém e Capitão Poço, apresentaram-se inócuos, ou seja, sem efeito deletério. A explicação pra este resultado deve-se ao alto teor de cálcio presente na composição química das amostras e ao fato das mesmas apresentarem-se como um mineral de quartzo de estrutura muito bem definida e sem extinção ondulante. Além do objetivo principal ter sido alcançado, que consistiu na avaliação e classificação quanto a reatividade potencial dos agregados graúdos provindos das principais jazidas fornecedoras da região metropolitana de Belém, teve-se também alcançado o objetivo secundário proposto no trabalho, visto que analisou-se os métodos de ensaio utilizados na verificação da potencialidade reativa frente ao álcalis do cimento, assim como, mapeou-se as jazidas estudadas e ofereceu dados que servirão de referência aos profissionais da nossa região, quanto ao uso destes materiais para a produção de concreto. A avaliação final dos agregados constituiu numa análise conjunta das várias metodologias empregadas, onde observou-se a eficiência e confiabilidade de cada método.

O método acelerado foi considerado satisfatório para avaliação das amostras ensaiadas. Mesmo sendo um método bem simples, houve todo um cuidado em sua realização, principalmente no que diz respeito ao controle das condições de ensaio, moldagens e medições dos corpos-de-prova. Todas as amostras apresentaram expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias de idade, o que caracteriza um comportamento inócuo, tendo como maior expansão a amostra coletada da jazida Ameta, com 0,021% aos 16 dias e 0,022% aos 28 dias. Houve também o cuidado em se fazer uma análise visual nos corpos-de-prova após o ensaio. Tal análise teve como finalidade verificar possíveis manifestações patológicas que pudessem evidenciar o surgimento da reação álcali-agregado. Contudo, foi verificado que nenhuma das amostras ensaiadas apresentou grandes mudanças em seu aspecto, como por exemplo, fissuras e empenamento. Confirmando assim, o não surgimento da reação expansiva.

O método químico também foi considerado satisfatório na avaliação das amostras coletadas, sendo que através dele foi possível constatar que todas as amostras apresentaram resultados, de sílica dissolvida e de redução da alcalinidade, satisfatórios ao não surgimento da reação álcali-agregado. Fato este que pode ser verificado através dos gráficos, uma vez que todas as amostras situaram-se em regiões que as classificavam como inócuas.

A análise petrográfica desempenhou um papel de grande importância na classificação das amostras coletadas. Graças a este ensaio foi possível constatar que o seixo, extraído dos municípios de Ourém e Capitão Poço, trata-se de um mineral de quartzo de estrutura estável. Tendo em sua superfície pequenas fissuras, provenientes do esforço físico sofrido no processo de captação do material quando retirado do leito do rio Guamá. Em condições como estas, onde a estrutura apresenta-se bem definida, é possível afirmar que não há possibilidade de expansão. Visto que o material não apresentou extinção ondulante. Fato este que pôde ser comprovado através da análise petrográfica realizada no corpo-de-prova prismático da amostra MGM. Onde mesmo o seixo sendo reduzido a uma granulometria menor que 4,8 mm, continuou com suas propriedades físicas, podendo assim, ser considerado inócuo. Esta constatação ratificou os resultados obtidos nos ensaios acelerado e químico.

A microscopia eletrônica de varredura também foi considerada uma ferramenta importantíssima neste estudo, pelo fato da mesma ser muito útil na identificação dos produtos de reação e na avaliação final acerca do comportamento das amostras estudadas. Foi possível verificar, através das imagens fornecidas por este ensaio, a não manifestação de gel expansivo nos poros. Enquanto que o EDS teve como alvo a identificação dos elementos químicos presentes nas amostras, possibilitando assim, entender o porquê da não manifestação da reação álcali-agregado. Todas as amostras apresentaram basicamente os mesmos elementos químicos em sua composição. Sendo o oxigênio, o sódio, o silício e o cálcio, os que apresentavam maior concentração, enquanto que os elementos como cloro e alumínio, uma concentração mais baixa. Outros elementos como enxofre e potássio também foram identificados nas amostras Ameta, Batuíra e MGM, porém em quantidades muito pequenas, podendo ser considerados como desprezíveis. A explicação para a não manifestação da reação expansiva pode ser atribuída ao alto teor de cálcio existente nas amostras ensaiadas. Pois o elevado teor de cálcio faz

com que haja uma diminuição na concentração de álcalis, e com isso, inibição da formação do gel expansivo. Assim, pode-se concluir que a quantidade de cálcio presente nas amostras, juntamente com a estrutura estável apresentada nestes minerais, foi suficiente para assegurar o não desencadeamento de uma possível reação alcalina, e conseqüentemente, o surgimento do gel álcali-sílica, que em contato com a água começa a se expandir, ocasionando fissuras e perda de resistência no concreto. Através da análise de microscopia eletrônica de varredura, foi possível fazer um apanhado geral dos resultados apresentados dos demais ensaios, e concluir que o seixo, provindo das regiões de Ourém e Capitão Poço, não é reativo perante o álcalis do cimento.

O mapeamento apresenta-se como uma forma de localização e identificação das jazidas. Através dele foi possível verificar a proximidade entre as mesmas, fato este que explica a semelhança dos resultados obtidos. É importante mencionarmos também que, as características da região onde as amostras foram coletadas, também foram levadas em consideração na avaliação e classificação das mesmas.

### **5.1. SUGESTÕES DE NOVAS PESQUISAS**

Como primeira sugestão para futuras pesquisas, propõe-se a utilização da metodologia adotada neste trabalho em outras regiões paraenses, com a finalidade de abranger todo estado do Pará. Desta forma, será possível avaliar e classificar, quanto à reatividade potencial, os agregados utilizados em nosso estado.

Outra sugestão é fazer uma avaliação quanto à reatividade potencial dos agregados miúdos utilizados em nossa região. E com isso efetuar, a partir da base de dados aqui apresentados, uma análise comparativa entre os dados obtidos.

Por fim, seria interessante repetir este mesmo estudo em outros estados brasileiros. Pois estes dados seriam de grande importância na escolha do material utilizado em futuras obras, evitando assim, a manifestação da reação álcali-agregado e seus efeitos deletérios.

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado – Reatividade potencial de álcalis em combinações cimento/agregado**. NBR 9773. Rio de Janeiro: 1987.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados – Verificação da reatividade potencial pelo método químico**. NBR 9774. Rio de Janeiro: 1987.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Materiais Pozolânicos – Determinação da Eficiência de Materiais Pozolânicos em evitar a Expansão do Concreto devido à Reação Álcali-Agregado**. NBR 12651. Rio de Janeiro: 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Determinação da composição granulométrica dos agregados – Método de ensaio**. NBR 7217. Rio de Janeiro: 1982.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária – Método de ensaio**. NBR 7251. Rio de Janeiro: 1982.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água – Método de ensaio**. NBR NM 53. Rio de Janeiro: 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado graúdo – Determinação da resistência ao esmagamento – Método de ensaio**. NBR 9938. Rio de Janeiro: 1987.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro: 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios**. NBR NM 45. Rio de Janeiro: 1995.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”**. NBR NM 51. Rio de Janeiro: 2000.

Associação Brasileira de normas Técnicas. **Agregados – Amostragem**. NBR NM 26. Rio de Janeiro: 2000.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**. NBR 5733. Rio de Janeiro: 1991.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles” – Método de ensaio**. NBR 6465. Rio de Janeiro: 1984.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete**. ASTM C-295. Philadelphia: 1990.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for petrographic examination of hardened concrete**. ASTM C- 856. Philadelphia: 1995.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Potencial Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)**. ASTM C-1260. Philadelphia: 1994.

ANDERSEN, K.T.; THAULOW.N. **The application of undulatory extinction angles (UEA) as an indicator of alkali-silica reactivity of concrete aggregates**. In: K. Okada, S. Nishibayashi and M. Kawamura (Editors). Alkali-Aggregate Reaction. Proceedings of the 8th International Conference. Kyoto. 1989. pp. 489-494.

ANDRIOLO, F.R. **AAR Dams affected in Brazil - Report on the Current Situation**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. Anais... Québec, 2000. p. 1243-1252.

ANDRIOLO, F.R. **Documentação sobre o panorama brasileiro.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio – Parte I. Goiânia, 1999. p. 9-59.

ARMELIN, J.L. e PAULON, V.A. **Análise e diagnóstico de barragem apresentando reação deletéria.** In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, IV, 1997, Porto alegre Anais... Porto Alegre, 1997. p. 197-202.

BALLIVY, G.; BOIS, A.P.; SALEH, K.; RIVEST, M. – **“Monitoring of the Stresses Induced By AAR in the Beauharnois Concrete Gravity Dam”** - Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams – Chattanooga / Outubro / 1995.

BATIC, O.R, SOTA, J.D. **Identification of Alkali-Silica Reactive Granite Aggregates. Proceedings of 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete.** Beijing, China. 2004.

BLIGHT, G.E.; BALLIM, Y. **Properties of AAR-affected concrete studied over 20 years.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. Anais... Québec, 2000. p. 1109-1118.

CASTRO, C.H.; SANTOS, M.C.; TRABOULSI, M.A.; BITTENCOURT, R.M. **Influência do agregado pulverizado na reação álcali-agregado.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais... Goiânia, 1997. p. 87-94.

CAVALCANTI, A J C T, JULIANI, M A, IGUTI, E T, HAHNER, I, ZUNIGA, J E. (2004) - **AAR Effects at the Paulo Afonso IV Power Intake.** 12 International Conference in Alkali-Aggregate Reaction, Beijing, 2004. China.

CHARLWOOD, C.G., ZOLTAN, S.V., “**Long term management of AAR – affected structures – an international perspective**”, 2<sup>nd</sup> International Conference on Alkali-aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Chattanooga, EUA, October/1995.

CHARLWOOD, R.G; STEELE, R.R – (1992) – “**A Review of Alkali aggregate in Hydro-Electric Plants and Dams**” – CEA/CANCOLD, Fredericton, Canada.

CHARLWOOD, R.G.; SOYMAR, Z.V. – “**An International Perspective: AAR in Hydroelectric projects and Dams**” – Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams – Chattanooga / Outubro / 1995.

CHATTERJI, S. (1989), “**Mechanisms of alkali-silica reaction and expansion**”. Proceedings of the 8th International Conference of the Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, pp. 101-105.

CORRÊA, W. G. **Estudo da Reatividade Álcali – Agregado, Rodovia BR 401, Execução das estruturas das pontes de concreto armado sobre os rios Arraia e Itacutú**. Estado de Roraima, Laudo Técnico, janeiro, 2002.

CSA. Appendix B – **Alkali-aggregate reaction**. CSA A23.2-4 – concrete materials and methods of concrete construction. Canadian Standards Association. Toronto, Ontario. 1994.

DCT.C.01.014.2006-R0. **Caracterização de Agregados Quanto à Reatividade Potencial e aos Sulfetos**. Relatório Técnico, Departamento de Apoio e Controle Técnico, Laboratório de Concreto, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., fevereiro, 2006.

DENT-GLASSER, L. S., KATAOKA, N. (1981), “**The Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction**”. Cement and Concrete Research, v. 11, pp. 1-9.

DIAMOND, S. **alkali reactions in concrete pore solutions effects**. In: Internacional Conference Alkalis in Concrete, 6., 1983. Idorn G.M. and Rostam S. eds., p. 155-156.

DRON, R., BRIVOT, F. And CHAUSSADENT, T. (1997), “**Mechanism of the Alkali-Silica Reaction**”. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Suécia.

FARAGE, M.C.R., ALVES, J.L.D., FAIRBAIRN, E.M.R. (2004), “**Macroscopic Model of Concrete to Alkali-Aggregate Reaction**”. Cement and Concrete Research, v. 34, no 3, pp 495-505.

FERRARIS, C.F. **Alkali-silica reaction and High Performance Concrete**. Disponível em: <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build95/art004.html>. Acesso em: 21 março 2006, às 9:00h.

FERRARIS, C.F. (1995) “**Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete**”. Report NISTIR 5742. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland.

FONTOURA, J.T.F. **Investigações sobre a reação álcali-agregado – metodologias e ensaios**. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio – Parte II – Tema I. Goiânia, 1999. p. 65-80.

FOURNIER.B.; BÉREBÉ, M. A. **Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications**. Canada Journal Civil Engineering. 27. 2000. pp -167-191.

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

HASPARYK, N. P.; ARMELIN, J.L.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI, W. **Investigação da reação álcali-agregado em testemunhos de concreto através da microscopia eletrônica de varredura.** In: III CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 1998, Juiz de Fora. Anais... Juiz de Fora: UFJF, 1998. p. 437-446.

HEIJNEM, W.M.M. Alkali-silica reactions in the Netherlands. In: Poole, AB. (Ed). Proceedings of 9<sup>th</sup> **International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete**, 1992, voll, p. 432-439.

HELENE, Paulo, “**Alkali-aggregate Reaction in Foundation Blocks of the Paulo Guerra Bridge, Inspection and Diagnosis**” (in Portuguese) Colloquia 2002, July 2002, pp 27-36.

HELMUTH, R., STARK, D. **Alkali-silica reactivity mechanisms.** In: SKALNY, J.; MINDESS, S. Materials Science of Concrete III. Estados Unidos: American Ceramic society, 1992. p. 131-208.

HOOPS, D.W. **Alkali silica reaction in concrete.** Londres: Ed. Thomas Telford, 1988.

IDORN, G. M.; JOHANSEN, V.; THAULOW, N. **Assessment of causes of cracking in concrete.** In: SKALNY, J.; MINDESS, S. Materials Science of Concrete III. Estados Unidos: American Ceramic Society, 1992. p. 131-208.

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

KIHARA, Y. & SCANDIUZZI, L - 1993 - **Reação Álcali-Agregado: Mecanismo, Diagnose e Casos Brasileiros.** In: Anais do 3º Congresso Brasileiro de Cimento, São Paulo - SP, V. 1, p. 319-338.

KUPERMAN, S.C., FERREIRA, W.V.F., DAL FABBRO, J.C., NEGRINI, M.A, CIFU,S., KAKO,H., MARIANO,A, TAVARES,F. **Ocorrência de reação álcali-agregado em tomada d'água.** Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, CBDB - Furnas, Goiânia, 1997.

KUPERMAN, S.C., VIEIRA, S.R.S.S., FERREIRA, W.V.F., TIBA, R. **Tentativas para determinação do término da reação álcali-agregado na estrutura de uma tomada d'água.** Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, CBDB - Furnas, Goiânia, 1997.

LIMA, M.A.; **“Ocorrência de reação expansiva nos concretos da usina Apolônio Sales (Moxotó), com repercussão no comportamento das máquinas”** – Simpósio sobre Casos Históricos de Deterioração de Barragens e Reservatórios – São Paulo / Agosto / 1996.

LIU YAN, LEE, C.F., FU PEI-XING. **Alkali-silica reaction (ASR) Characteristics of Concrete Made from Granite Aggregates.** Proceedings of 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China. 2004.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais.** São Paulo: Ed. Pini, 1994.

MONTEIRO, P.J.M.; PREZZI, M.; SPOSITO, G. **The alkali-silica reaction, part I.** ACI Materials Journal, USA, v. 94, n. 1, p. 10-17, jan. 1997.

MORANVILLE - REGOURD, M. (1997) **“Modelling of Expansion Induced by ASR – New Approaches”**, Cement and Concrete Composites, v. 19, pp. 415-425.

NOGUEIRA, G.S.J.; CHAGAS, S.V.M. **Mapeamento dos agregados usados na região metropolitana de Belém na produção de concreto.** 2007 Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará.

OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G. 1986. **An accelerated Method for testing the Potential alkali-reactivity of Siliceous aggregates.** Cement and Concrete Research, USA, v. 16, n. 2, p. 181-189, 1986.

PACELLI, W. A.; FONTOURA, J. T. F. **Visita técnica às barragens de Chickamauga, Hiwassee e Fontana.** Goiânia, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S. A., maio 1996. (Relatório interno DCT.T.1.029.96-R0).

PAULON, V. A. **Alkali-aggregate reaction at Moxotó Dam – Brazil.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 7., 1986, Ottawa. Anais... Ottawa, 1986. p. 65-70.

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

RIGDEN, S.R.; MAJLESI, Y.; BURLEY, E. **Investigation of factors influencing the expansive behavior, compressive strength and modulus of rupture of alkali-silica reactive concrete using laboratory concrete mixes.** Magazine of Concrete Research, v. 47, n. 170, p. 11-21, mar.1995.

RODRIGUES, E. P. **Parâmetros texturais de deformação em “granitóides” e sua relação com a reação álcali-agregado: aplicação ao concreto da Barragem de Pedro Beicht.** São Paulo, 1994. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociência.

SCANDIUZZI, L., BATTAGIN, A. F. e KIHARA, Y. – **Estudos da reação álcali-agregado em obras brasileiras.** In: Anais XXIV Seminário Nacional Grandes Barragens, Fortaleza – CE, p.197 – 209, novembro 2001.

SETO, K.; NISHIZONO, T.; MIKATA, Y.; MAEDA, S.; MIYAGAWA, T.; **Maintenance for ASR damaged road viaduct.** Proceeding, 12th International Conference on RAA in concrete. Beijing, 2004. pp. 1277-1282.

SILVA, C.A.R.; FONTOURA, J.T.F.; SANTOS, M.C; ANDRADE, N.P.H. **Métodos utilizados na investigação da reação álcali-agregado.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais... Goiânia, 1997. p. 53-60.

SILVEIRA, A. A. **O efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado.** 2001 Proposta de tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVEIRA, J.F.A. – (1992) – **“A deterioração de barragens e usinas hidroelétricas provocadas pela reatividade álcali-agregado”** – Simpósio sobre instrumentação geotécnica em barragens – Revista do comitê brasileiro de grandes barragens; publicação 01/96 – 1996, Rio de Janeiro.

SILVEIRA, J.F.A. – **“AAR – Moxotó – Ten Years of Monitoring and Remedial Measures”** Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams – Chattanooga / Outubro / 1995.

STANTON, T. E. **Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate.** Proceedings of American Society of Civil Engineers, Dec. 1940, p. 1781-1811.

TANG, M., DENG, M., XU, Z. **Comparison Between Alkali-silica Reaction and Alkali-carbonate Reaction.** In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. Anais... Québec, 2000. p. 109-118.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** London: Academic Press, 1990.

THAULOW, N.; JAKOBSEN, U.H.; CLARK, B. **Composition of alkali-silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses.** Cement and Concrete Research, USA, v. 26, n. 2, p. 309-318, fev. 1996.

TQS News – **Entrevista: Investigador de estruturas.** TQS News – Tecnologia e Qualidade em Sistemas, n. 22: 3-10, janeiro, 2006.

TOMOSAWA, F., TAMURA, K., ABE, M. – **Influence of water content on concrete on alkali-aggregate reaction.** In: INTERNATIONAL Conference on Alkali-aggregate Reaction, 8<sup>th</sup>, Tokyo, 1989, p. 881-885.

URHAN, S. **Alkali-silica and pozzolanic reactions in concrete. Part. 1: interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism.** Cement and Concrete Research, USA, v. 17, n. 1, p. 141-152, fev. 1987.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado – Mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo.** 2002 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

VEIGA, F.N.; GONÇALVES, I.N.; ANDRADE, N.P.H. **Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidroelétricas.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 1997 a, Goiânia. Anais... Goiânia, 1997. p. 69-79.

VEIGA, F.N.; GONÇALVES, I.N.; ARMELIN, J.L.; ANDRADE, N.P.H. **Reação álcali-agregado: a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos.** In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 1997 b, Goiânia. Anais... Goiânia, 1997. p. 13-20.

VIEIRA, S.R.S.S.; OLIVEIRA, M.A.F. **Estudos Petrográfico de alguns agregados brasileiros, com ênfase na avaliação de sua reatividade potencial frente aos álcalis do cimento.** In: REIBRAC, 39., 1997, São Paulo. Anais...São Paulo, 1997. p. 77-91.

VIEIRA, S.R.S.S.; PECCHIO, M.; ABREU, J.V.; FERREIRA, M.C.N.F. **Avaliação de diferentes cimentos como inibidores da reação álcali-agregado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 40., 1996, São Paulo. Anais... São Paulo, 1996. p. 579-590.

XU, Z., LAN, X., DENG, M., TANG, M. **A new accelerated method for determining the potential alkali-carbonate reactivity.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. Anais... Québec, 2000. p. 129-138.

ZAMPIERI, V.A. & KIHARA, Y. & SCANDIUZZI, L. - 1992 - **The Alkali-Silicate Reaction in Some Brazilian Dams.** In: International Congress on the Chemistry of Cement, 9º, New Delhi, Índia, V.5, p. 174-180.

## ANEXOS

**ANEXO A – Modelo da planilha de composição granulométrica**

Planilha A.1 – Modelo da planilha de composição granulométrica.

<b>QUANTIDADE DE AGREGADO GRAÚDO</b> <b>Para diâmetro máximo de 19 mm : 5 Kg</b>			
<b>AMOSTRA:</b>			
<b>ABERTURA DAS PENEIRAS (mm)</b>	<b>MÉDIA DO PESO RETIDO (g)</b>	<b>PORCENTAGEM MÉDIA RETIDA (%)</b>	<b>PORCENTAGEM MÉDIA RETIDA ACUMULADA (%)</b>
75 mm			
63 mm			
50 mm			
37,5 mm			
31,5 mm			
25 mm			
19 mm			
12,5 mm			
9,5 mm			
6,3 mm			
4,75 mm			
2,36 mm			
1,18 mm			
600 µm			
300 µm			
150 µm			
<b>FUNDO</b>			
<b>TOTAL</b>			
<b>DIÂMETRO MÁXIMO</b>		<b>UFPA</b> <b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ</b>	
<b>MÓDULO DE FINURA</b>			

**ANEXO B – Modelo das planilhas de ensaio de reatividade potencial pelo método acelerado.**



**ANEXO C – Modelo do gráfico de verificação da reatividade potencial pelo método químico.**

Planilha C.1 – Modelo do gráfico utilizado para verificação da reatividade potencial pelo método químico.

